

**Stabile Isotope als Umwelttracer - Fließwege,
Mischprozesse und die Belastungssituation an einem
ehemaligen Gaswerksstandort**

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

der Geowissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität Tübingen

vorgelegt von

Sonja Angloher-Reichelt
Gräfelfing b. München

2001

Tag der mündlichen Prüfung:

18. Juli 2001

Dekan:

Prof. Dr. Dr. h.c. M. Satir

1. Berichterstatter:

Prof. Dr. Dr. h.c. M. Satir

2. Berichterstatter:

Prof. Dr. P. Grathwohl

3. Berichterstatter:

Prof. Dr. A. Pekdeger

Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA) Reihe E:
Mineralogie, Petrologie und Geochemie

Band 2/2001

Sonja Angloher-Reichelt

**Stabile Isotope als Umwelttracer - Fließwege,
Mischprozesse und die Belastungssituation an
einem ehemaligen Gaswerksstandort**

D 21 (Diss. Universität Tübingen)

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Angloher-Reichert, Sonja:

Stabile Isotope als Umwelttracer - Fließwege, Mischprozesse und die Belastungssituation an einem ehemaligen Gaswerksstandort/
Sonja Angloher-Reichert. Aachen : Shaker, 2001

(Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA) Reihe E:

Mineralogie, Petrologie und Geochemie ; Bd. 2001,2)

Zugl.: Tübingen, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9662-5

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9662-5

ISSN 1431-4533

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Für Michael

Kurzfassung

Grundwässer und Böden an einem ehemaligen Gaswerksstandort in Süddeutschland sind durch Teere und Teeröle aus der früheren Gasproduktion stark kontaminiert. Zur richtigen Einschätzung des Gefährdungspotentials in solchen Schadensfällen sind grundlegende Kenntnisse der hydrogeologisch-geochemischen Bedingungen sowie der Schadstoffausbreitung von großer Bedeutung. In der vorliegenden Studie wird gezeigt, wie sich anhand der stabilen Isotope von Wasserstoff und Sauerstoff der Wasser sowie Kohlenstoff des gelösten anorganischen Kohlenstoffs (DIC) Aussagen zu den Einzugsgebieten, Fließwegen und Mischprozessen der verschiedenen Wässer treffen lassen. Ferner wird gezeigt, wie mittels der C-Isotopie und Konzentrationen des DIC als natürlichem Tracer Informationen zur Belastungssituation der Kiesgrundwässer durch die organischen Schadstoffe gewonnen werden können.

Die verschiedenen Oberflächen-, Grund- und Mineralwässer lassen sich anhand ihrer O- und H-Isotopenzusammensetzung charakterisieren und deutlich gegeneinander abgrenzen. Die O- und H-Isotopenwerte ermöglichen den Rückschluß auf eine lokale, räumlich differenzierte Neubildung der verschiedenen Wässer. Weiterhin lassen sich kleinräumige Mischprozesse zwischen den verschiedenen Wassergruppen erkennen. In kombinierter Betrachtung mit den C-Isotopenwerten des gelösten anorganischen Kohlenstoffs (DIC) lassen sich auf dem Gaswerksgelände folgende Einflüsse auf den kontaminierten Kiesgrundwasserleiter feststellen: es erfolgt ein randlicher Zufluß durch Hangwässer vom westlich gelegenen Talhang, am Ost- rand des Geländes findet Infiltration durch Flußwässer (Uferfiltrat) von dem unmittelbar angrenzenden Fluß statt. Im nördlichen Teil des Geländes erfolgt ein lokaler Aufstieg durch artesisch gespannte Mineralwässer. Anhand der stabilen Isotope von O, H und C_{DIC} wurden Mischungsreihen zwischen den Kiesgrundwässern und den Neckar- bzw. Mineralwässern dargestellt und für einzelne Pegelstellen Mischungsanteile kalkuliert. In den verschiedenen Pegeln zeigen sich unterschiedliche Mischungen, sie variieren auch in Abhängigkeit vom Abflußregime des Neckars bzw. besonderen Niederschlags- und Abflußbedingungen. Ein Vergleich zwischen den in zwei Jahreszeiträumen durchgeführten Isotopenmessungen ergab generell ähnliche Isotopenwerte und Trends, was auf keine besonderen Veränderungen der Witterungsverhältnisse hinweist. Abweichende Isotopenzusammensetzungen in einzelnen Monaten lassen sich auf besondere Niederschlagsereignisse zurückführen und ermöglichen für einige Pegel Rückschlüsse auf besondere Wegsamkeiten tektonischer oder baulicher Art, die nur unter erhöhten Niederschlags-Abfluß-Bedingungen wirksam werden. Die saisonalen Isotopenvariationen der verschiedenen Wässer stehen in Zusammenhang mit den jahreszeitlich schwankenden Temperaturverhältnissen und verschiedenen Luftmasseneinflüssen. Die Höhe der Variationen zeigt eine deutliche Abnahme von den Niederschlägen zu den Oberflächen- und Grundwässern. Bei den tiefen Gipskeuper- und Mineralwässern ist aufgrund zunehmender Aufenthalts- und Durchmischungszeiten im Untergrund kein Bezug mehr zu dem aktuellen Niederschlagsgeschehen erkennbar. Bei den Kiesgrundwässern lassen sich im randlichen Bereich des Gaswerksgeländes Isotopenvariationen mit einer 1-monatigen Versetzung gegenüber den Niederschlägen erkennen, was einen schnellen randlichen Zustrom zum Kiesgrundwasserleiter innerhalb eines Monats (oder kürzer) belegt; im Zentralbereich des Geländes ist dieser Trend aufgrund längerer Fließwege und Aufenthaltszeiten nicht erkennbar.

Die Interpretation der C-Isotopenwerte des gelösten anorganischen Kohlenstoffs (DIC) erfolgt vor dem natürlichen Hintergrund der verschiedenen Komponenten (CO₂, Karbonate, organische Substanzen) des Kohlenstoffsystems. Die verschiedenen Komponenten weisen signifikante Unterschiede in ihrer C-Isotopenzusammensetzung auf: die marinen Karbonate der Sedimente sowie das atmosphärische und Mantel-CO₂ zeigen eine deutliche Anreicherung an ¹³C gegenüber den natürlichen und anthropogenen organischen

Substanzen sowie dem Boden- CO_2 . Vor dem Hintergrund des natürlichen Kohlenstoffsystems lassen sich anhand der C-Isotopie und Konzentrationen des DIC Informationen über den biogen-geogenen Kohlenstoffhaushalt der verschiedenen Wasser gewinnen. Bei den Oberflächenwässern und Hangquellen liegt ein dominierender Einfluß durch Boden- CO_2 vor, bei den Flußwässern findet zusätzlich Isotopenaustausch mit atmosphärischem CO_2 statt. Bei den tiefen Gipskeuper- und Mineralwässern läßt sich eine deutliche Beeinflussung des DIC durch die marinen Karbonate des Grundwasserleiters erkennen. Die kontaminierten Kiesgrundwässer dagegen zeigen stark an ^{13}C abgereicherte Isotopenwerte des DIC, die Werte sind sogar niedriger, als sie im natürlichen Gleichgewicht mit Boden- CO_2 zu erwarten wären. Die auffällig niedrigen $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ -Werte vor allem im Bereich der Schadstoffquellen lassen sich daher nicht mit dem Einfluß durch natürliche organische Substanzen erklären. Dagegen lassen sich für die oxidativen Abbauprodukte aus der Biodegradation der organischen Schadstoffe sehr niedrige Isotopenwerte kalkulieren, die vermutlich für die niedrigen C-Isotopenwerte des DIC in den Kiesgrundwässern verantwortlich sind. Die niedrigsten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte und gleichzeitig höchsten DIC-Konzentrationen treten im unmittelbaren Abstrom der Schadensherde auf. Weiter im Abstrom lassen sich - abgesehen von den mineralwasserbeeinflußten Pegeln - sinkende DIC-Konzentrationen und höhere $\delta^{13}\text{C}$ -Werte ermitteln, was auf zunehmende Verdünnungs- und Mischeffekte zurückzuführen ist. Die generell niedrigen C-Isotopenwerte auch im Zustrom auf das Gaswerksgelände weisen auf eine Vorbelastung der Kiesgrundwässer durch die industrielle Nutzung und Altlastensituation im Neckartal hin. Saisonale Schwankungen von C-Isotopie und Konzentrationen des DIC in den verschiedenen Oberflächen- und Grundwässern lassen sich auf jahreszeitlich variierende Niederschlags- und Abflußbedingungen zurückzuführen, sie zeigen in der Regel keinen Zusammenhang mit dem Photosynthese-Respirations-Zyklus natürlicher Pflanzen.

Abstract

Groundwaters and soils at a former gas production plant in southern Germany are highly contaminated by tar and tar oils from the former gas production. For an exact estimate of the hazard, knowledge of the hydrogeological and geochemical conditions as well as the dispersion of the pollutants are of vital importance. The present study demonstrates how information about recharge areas, flow paths, and mixing processes of different waters can be obtained by measurements of the stable isotopes of hydrogen and oxygen of water and carbon of the dissolved inorganic carbon (DIC). Furthermore, it is demonstrated how the carbon isotope composition and concentration of DIC serve as natural tracers for the organic pollution in the Quarternary carbonate gravel aquifers.

The different surface waters, groundwaters, and mineral waters can be characterized and clearly differentiated on the basis of their O and H isotope composition. Variations in the O and H isotope compositions of the different waters provide information on local recharge areas. Furthermore, small-scale mixing processes between different groups of water can be recognized. In combination with the carbon isotope compositions of DIC the following influences can be distinguished within the Quarternary aquifer at the former gas production site: infiltration from shallow groundwaters derived from the steep hill along the western margin of the site; river infiltration along the eastern margin of the site, and local infiltration by artesianly confined mineral waters in the northern part of the site. Variable mixtures of these different waters within the gravel aquifers can be represented as mixing lines in terms of their stable isotope composition of O, H, and C_{DIC}, allowing for calculation of the mixing proportions within individual boreholes. The proportions of different waters in the boreholes vary considerably, both in terms of space and time, depending on the flow regime of the adjacent Neckar river and special events of precipitation and runoff. A comparison of the isotopic compositions of waters sampled on a monthly basis over the course of two years indicates similar trends throughout each year, which reflects that there were no drastic changes in the weather pattern over the sampling period. Deviations in the isotopic compositions of surface- and groundwaters for individual months are caused by particular precipitation events and do allow for evaluation of reservoir effects and influences of man-made and geologic structures on the hydrology of the system. Seasonal variations in the isotopic composition of the different waters are related to seasonal variations in temperature and changing influences of air masses in the recharge area. The magnitude of variation decreases significantly from precipitation via surface waters to groundwaters. The deep Gipskeuper groundwaters and mineral waters of the Muschelkalk aquifer show no relationship to the local precipitation owing to their distant recharge area and significantly longer flow paths, residence, and mixing times within the aquifer. In the marginal areas of the site, groundwaters of the Quarternary gravel aquifer reflect the seasonal isotopic variations in precipitation but with a delay of about one month, indicating infiltration to the aquifer within one month or less. Such seasonal variation is not recognizable in the central areas of the site owing to longer flow paths and residence times.

Interpretation of the carbon isotope compositions of the dissolved inorganic carbon (DIC) have been made in the context of different natural and anthropogenic carbon components making up the background (CO₂, carbonates, organic substances). The different components have significant differences in their carbon isotope composition: marine carbonates of the sediments as well as atmospheric and mantle-derived CO₂ are clearly enriched in ¹³C compared to the natural and anthropogenic organic substances and the soil CO₂. Within this framework, the characteristic concentrations and isotopic compositions of DIC provide information on the biogenic and/or geogenic carbon system in the different groups of water. DIC of fluvial sur-

face waters and local spring waters is predominantly influenced by soil CO₂, while DIC of the large river is, in addition, influenced by atmospheric CO₂. Seasonal variations of the carbon isotope composition and concentrations of DIC in different surface and groundwaters correlate with variable amounts of precipitation and runoff but generally do not correlate with the photosynthesis-respiration-cycle of natural plants. DIC in deep Gipskeuper and mineral aquifer waters is clearly dominated by marine carbonates, which make up these aquifers. In contrast to waters from uncontaminated sources, the DIC in the contaminated Quarternary aquifer is characterized by significant depletion of ¹³C with values lower than those expected to be in equilibrium with natural soil CO₂. The remarkably low δ¹³C_{DIC} values, especially in the polluted aquifers can not be explained by variations in the natural organic substances measured. Oxidative decomposition products from biodegradation of the organic pollutants are expected, however, to have low ¹³C content and are likely to be responsible for the low δ¹³C values of DIC in the Quarternary aquifer. The lowest δ¹³C values and at the same time the highest DIC concentrations have been measured immediately downstream of the known pollution. Further downstream the DIC concentrations decrease and δ¹³C_{DIC} values increase again, except for boreholes influenced by mineral waters, which have significantly higher DIC concentrations. Thus dilution and mixing effects can be clearly resolved. Generally low δ¹³C values upstream of the former gas production site are likely to reflect regional anthropogenic contamination in the industrialized Neckar valley.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Geochemie des Instituts für Mineralogie, Petrologie und Geochemie der Eberhard-Karls-Universität Tübingen. Herrn Prof. Dr. Muharrem Satir, meinem Doktorvater, danke ich ganz herzlich für die freundliche Aufnahme in den Arbeitskreis, für sein Vertrauen in meine Arbeit, sein reges Interesse und seine fortwährende Unterstützung.

Mein ganz besonderer Dank gebührt meinem Lehrer und Betreuer Dr. Torsten W. Vennemann, der mir mit seiner ansteckenden Begeisterung die Welt der Stablen Isotope eröffnet hat. Ich bin ihm nicht nur für die Initiierung des Projektes, sondern auch für seine gewissenhafte, engagierte Betreuung und sein stetes Vertrauen in meine Arbeit zu größtem Dank verpflichtet. Sein großes Interesse, seine unermüdliche Diskussionsbereitschaft und die vielen Anregungen haben ganz wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Den Herren Prof. Dr. Peter Grathwohl vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Tübingen und Herrn Prof. Dr. Asaf Pekdeger von der Universität Berlin gebührt mein großer Dank für die Übernahme der Zweit- und Drittgutachten.

Für die Finanzierung meiner Arbeit im Rahmen eines Promotionsstipendiums bin ich der Hans-Böckler-Stiftung zu großem Dank verpflichtet. Ich bedanke mich ganz herzlich bei meinem Vertrauensdozenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Neumann-Mahlkau, ehem. Präsident des Geologischen Landesamtes von Nordrhein-Westfalen, für seine Unterstützung und sein reges Interesse an meiner Arbeit. An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei Herrn Werner Fiedler vom Referat Promotionsförderung für seine allzeit freundliche und engagierte Betreuung bedanken. Die Durchführung meiner Promotion im Rahmen eines Stipendiums stellte für mich eine große persönliche Bereicherung dar, da ich durch die Teilnahme an Seminaren der Stiftung zu verschiedenen sozial-, umwelt- und gesellschaftspolitischen Themen viele zusätzliche Erfahrungen "jenseits des Tellerrandes" gewinnen konnte. Nicht zuletzt die Treffen mit der StipendiatInnengruppe Tübingen stellten eine wichtige, fachübergreifende Austauschmöglichkeit dar.

Ein ganz besonderes Dankeschön für die sehr angenehme, produktive sowie auch gesellige Arbeitsatmosphäre gebührt allen Kolleginnen und Kollegen vom Lehrstuhl für Geochemie. Ohne das freundliche, hilfsbereite Miteinander hätten die Arbeiten am Institut nur halb so viel Spaß gemacht. Besonders hervorheben möchte ich Frau Gabriele Stoschek und Herrn Bernd Steinhilber, die mir mit ihrer großen Erfahrung und ihrem Fachwissen im Labor immer wieder eine wichtige Hilfe waren. Auch Frau Gisela Bartholomä und Frau Marcella Schumann danke ich für ihre hilfreichen Tips. Unseren Diplomanden Friedhelm Hierling und Urs Rothenhäusler ein herzliches Dankeschön für die Vorstudie und die ergänzenden Daten. Den Mitarbeitern der Institutswerkstatt unter Leitung von Herrn Norbert Walker möchte ich ein großes Lob und Dankeschön für Ihre kreativen Ideen und den engagierten Einsatz aussprechen.

Für den fachlichen Austausch und die inspirierenden Diskussionen danke ich auch allen anderen am Untersuchungsstandort tätigen Wissenschaftlern, vor allem Frau Dr. Daniela Zamfirescu, Herrn Dr. Martin Herfort und Herrn Thomas Holder von der Universität Tübingen sowie Frau Dr. Eva Annweiler von der Universität Hamburg.

Herrn Dr. Wolfgang Ufrecht vom Amt für Umweltschutz der Landeshauptstadt Stuttgart, Experte auf dem Gebiet der Stuttgarter Mineralwässer, danke ich sehr für seine fachkundigen Informationen, für seine Diskussionsbereitschaft und das rege Interesse an meiner Arbeit.

Im Zuge meiner Probenahmen und Geländearbeiten stand ich in Kontakt mit Mitarbeitern der Neckarwerke Stuttgart, der Kur- und Badebetriebe Stuttgart, dem Deutschen Wetterdienst und den Technischen Werken der Stadt Stuttgart. Ich bedanke mich bei allen für die reibungslose Zusammenarbeit und die engagierte Unterstützung, welche nicht nur bei fehlendem Werkzeug auf dem Gaswerksgelände sondern auch bei der Beprobung der Mineralwasserbrunnen im labyrinthischen Untergrund immer wieder ganz hilfreich war.

Ein ganz herzliches, warmes Dankeschön geht an meinen Mann, an meine Eltern und meinen Bruder sowie an meine Freunde hier in Tübingen und in München. Ich bedanke mich bei allen für ihre liebe Unterstützung, für Ihre Ermutigung, Ihre Geduld und vor allem für die oft so wichtige Ablenkung.

Tübingen, im November 2001

Sonja Angloher-Reichelt

*Alles Wissen und Vermehrung unseres Wissens endet
nicht mit einem Schlußpunkt, sondern mit Fragezeichen.
Ein Plus an Wissen bedeutet ein Plus an Fragestellungen,
und jede von ihnen wird immer wieder von neuen Frage-
stellungen abgelöst.*

Hermann Hesse

Wißbegier ist das Geheimnis ewiger Jugend.

Walter A. Heiby

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Danksagung	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Einführung und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
2 Stand der Forschung	5
2.1 Stabile Isotope (H, C, O) in der Umweltforschung	5
2.2 Geochemische Grundlagen der stabilen Isotope von H, C und O	10
2.2.1 Isotopengeochemische Grundlagen	10
2.2.2 H- und O-Isotope im meteorischen Wasserzyklus	12
2.2.3 C-Isotope im Kohlenstoffzyklus	17
2.2.3.1 Komponenten des C-Systems	18
2.2.3.2 Gelöster anorganischer Kohlenstoff (DIC)	20
3 Standort	25
3.1 Nutzungsgeschichte und Belastungssituation	25
3.1.1 Standort	25
3.1.2 Altlastenerhebung	27
3.2 Geologie und Hydrogeologie	29
3.2.1 Regionale Geologie	29
3.2.2 Großraum Stuttgart - Stratigraphie, Tektonik und Morphologie	30
3.2.3 Neckartal - Geologie und Hydrologie	34
3.2.4 Mineralwässer - Geologie, Hydrogeologie und Hydrochemie	36
3.2.5 Gaswerksgelände - Geologie, Hydrogeologie und Hydrochemie	41
4 Material und Probenahme	49
4.1 Wasserproben	49
4.1.1 Zeitlicher Verlauf der Probenahme	49
4.1.2 Probenahmestellen	49
4.1.3 Probenahmegeräte und -techniken	53
4.1.4 Probenmenge und Konservierung	55

4.2	Sedimentproben	55
4.3	Organische Substanzen	55
4.4	CO ₂	56
5	Methoden	57
5.1	Wasserproben	57
5.1.1	H-Isotopenverhältnisse	57
5.1.2	C-Isotopenverhältnisse	57
5.1.3	O-Isotopenverhältnisse	59
5.1.4	Massenspektrometer	59
5.2	Sedimentproben	60
5.2.1	Aufbereitung	60
5.2.2	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	61
5.2.3	Röntgendiffraktometrie	61
5.2.4	C- und O-Isotopie der Karbonate	62
5.3	C-Isotopie der organischen Substanzen	63
5.3.1	Aufbereitung der Bodensubstanzen	63
5.3.2	Aufbereitung der Teeröle	64
5.3.3	Elementaranalysator (EA)	64
5.4	C-Isotopie von CO ₂	65
6	Ergebnisse	67
6.1	Ergebnisse der Wasseranalysen	67
6.1.1	Physikalisch-chemische Daten	67
6.1.1.1	Niederschläge	67
6.1.1.2	Oberflächenwässer	67
6.1.1.3	Hangquellen	68
6.1.1.4	Grundwässer	69
6.1.1.5	Mineralwässer	71
6.1.2	Isotopische Zusammensetzung der einzelnen Wassergruppen	71
6.1.2.1	Niederschläge	71
6.1.2.2	Oberflächenwässer	73
6.1.2.3	Hangquellen	74
6.1.2.4	Grundwässer	75
6.1.2.5	Mineralwässer	79
6.2	Ergebnisse der Sedimentanalysen	80
6.2.1	Haupt- und Spurenelemente	80
6.2.2	Mineralogische Zusammensetzung	82

6.2.3	C- und O-Isotopie der Karbonate	84
6.3	Organische Substanzen	86
6.3.1	C-Isotopie der natürlichen Bodensubstanzen	86
6.3.2	C-Isotopie der Teeröle	87
6.4	C- und O-Isotopie des CO ₂	87
7	Diskussion	89
7.1	Das hydrogeologische System	89
7.1.1	Charakterisierung der Wassergruppen und Mischprozesse	89
7.1.1.1	Wassergruppen und Einzugsgebiete	89
7.1.1.1.1	Niederschläge und die "Meteorische Wasserlinie"	89
7.1.1.1.2	Oberflächenwässer	92
7.1.1.1.3	Quellen	94
7.1.1.1.4	Mineralwässer	95
7.1.1.1.5	Kiesgrundwässer	98
7.1.1.1.6	Gipskeuperwässer	103
7.1.1.2	Mischprozesse	104
7.1.1.3	Mischungsreihen	112
7.1.1.3.1	Mischungsreihen und Massenbilanzen	112
7.1.1.3.2	Saisonale Variation der Mischungsanteile	117
7.1.1.3.3	Zusammenfassung und Fehlerdiskussion	121
7.1.1.4	Vergleich erstes/zweites Jahr	122
7.1.1.4.1	Wassergruppen und Mischprozesse des zweiten Meßzyklus.....	122
7.1.1.4.2	Unterschiede zwischen den beiden Jahresmeßreihen	124
7.1.2	Saisonale Effekte	130
7.1.2.1	Saisonale Schwankungen der O-Isotopie in den verschiedenen Wässern	130
7.1.2.2	Unterschiede bei den saisonalen Schwankungen (H, O)	137
7.1.2.2.1	Niederschläge und Oberflächenwässer	137
7.1.2.2.2	Kiesgrundwässer	139
7.1.2.2.3	Hangquellen, Gipskeuper- und Mineralwässer	145
7.1.2.3	Vergleich erstes/zweites Jahr	146
7.1.2.4	Zusammenfassung	150
7.1.2.4.1	Diskrepanzen zwischen der H- und O-Isotopie	150
7.1.2.4.2	Kiesgrundwässer - Grundwasserneubildung und Fließwege	151

7.2	$\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Kohlenstoffsystem	152
7.2.1	Komponenten des Kohlenstoffsystems	152
7.2.1.1	CO_2	152
7.2.1.1.1	Atmosphärisches CO_2	152
7.2.1.1.2	Boden- CO_2	152
7.2.1.1.3	CO_2 der Mineralwässer und Mantel- CO_2	156
7.2.1.2	Sedimente	158
7.2.1.3	Organik	162
7.2.1.3.1	Organische Bodensubstanzen	162
7.2.1.3.2	Teer und Teeröle	162
7.2.1.4	Überblick	164
7.2.2	Zusammensetzung und C-Isotopie des DIC in den verschiedenen Wässern	165
7.2.2.1	Niederschläge	165
7.2.2.2	Oberflächenwässer	166
7.2.2.3	Hangquellen	169
7.2.2.4	Gipskeuperwässer	169
7.2.2.5	Mineralwässer	170
7.2.3	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ -Werte der Kiesgrundwässer	171
7.2.3.1	Zusammensetzung und C-Isotopie des DIC im Kiesgrundwasser	171
7.2.3.2	Mischprozesse	173
7.2.3.3	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ -Werte als Tracer für die Schadstoffbelastung?	174
7.2.4	Saisonale Effekte	184
8	Zusammenfassung	191
8.1	Ergebnisse zur Hydrogeologie des Standortes mittels der stabilen Isotope von H, C_{DIC} und O	191
8.2	C-Isotopie und Konzentration des DIC - Eignung als natürlicher Tracer für die Belastungssituation des Kiesgrundwasserleiters	194
	Literatur	197
	Anhang	

Abkürzungen und Symbole

α	Fraktionierungsfaktor
AKW	Aromatische Kohlenwasserstoffe
BTEX	Sammelbegriff für Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
CO _{2(aq)}	Gelöstes Kohlendioxid
CO _{2(g)}	Gasförmiges Kohlendioxid
C3-Pflanzen	Pflanzen mit dem Photosynthesezyklus "Calvin- oder C3-Zyklus"
$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$	Kohlenstoffisotopenverhältnis im Kohlendioxid relativ zum Standard
$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	Kohlenstoffisotopenverhältnis im gelösten anorganischen Kohlenstoff relativ zum Standard
δD	Wasserstoffisotopenverhältnis relativ zum Standard
$\delta^{18}\text{O}$	Sauerstoffisotopenverhältnis relativ zum Standard
DIC	Gelöster anorganischer Kohlenstoff
ε	Anreicherungsfaktor
GMWL	Globale Meteorische Wasserlinie
GOK	Geländeoberkante
IAEA	International Atomic Energy Agency
KW	Kohlenwasserstoffe
LMWL	Lokale Meteorische Wasserlinie
LMWL _{IAEA_{gew}}	Gewichtete Lokale Meteorische Wasserlinie, basierend auf Daten der IAEA
μ	Arithmetisches Mittel
MWL	Meteorische Wasserlinie
n	Grundgesamtheit aller Daten
NN	Normal Null
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PCE	Polychloriertes Ethylen
PDB	Belemnite der Pee Dee Formation
R	Spannweite (Range)
σ	Standardabweichung
SMOW	Standard Mean Ocean Water
T	Temperatur (in Grad Celsius oder Kelvin)
VPDB	"Belemnite der Pee Dee Formation", in Wien (Vienna) definiert
VSMOW	"Standard Mean Ocean Water", in Wien (Vienna) definiert