

Vorkommen, Stimulierung und Monitoring des aerob-produktiven Trichlorethen-Abbaus

Zur Erlangung des akademischen Grades einer
DOKTORIN DER NATURWISSENSCHAFTEN (Dr. rer. nat.)
von der KIT Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

DISSERTATION

von
Anna Willmann, M.Sc. Geoökol.

Tag der mündlichen Prüfung: 22. November 2024

Referent: Prof. Dr. Stefan Norra
Korreferent: Prof. Dr. Andreas Tiehm

Karlsruhe (2025)

Zusammenfassung

Trichlorethen (TCE) ist einer der am häufigsten vorkommenden Schadstoffe bei Grundwasserschadensfällen. Der aerob-produktive Abbau von TCE wurde bislang nur an einem Standort auf natürliche Weise beobachtet und weist gegenüber der aerob co-metabolischen Umsetzung und der anaeroben Dechlorierung entscheidende Vorteile für die Sanierungspraxis auf. Zur Stimulierung werden keine Auxiliarsubstrate benötigt, es bestehen keine relevanten Nebenreaktionen und es entstehen keine toxischen Metabolite. Für Standorte, an denen die Mikroorganismen mit der Fähigkeit zum aerob-produktiven TCE-Abbau nicht vorhanden sind, kann die Animpfung mit einer abbauaktiven Kultur (Bioaugmentation) eine vielversprechende Lösung darstellen.

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Vorkommens des aerob-produktiven TCE-Abbaus sowie des Stimulierungspotentials mittels Bioaugmentation. Weiterhin sollten unterschiedliche Biomonitoringmethoden evaluiert und weiterentwickelt werden, um die am Abbau beteiligten Mikroorganismen nachzuweisen und ein Abbau-spezifisches Biomonitoring zu etablieren. Ein weiteres Ziel war die Bestimmung der kinetischen Abbauparameter, die als essentielle Eingangsdaten für die Grundwassermodellierung zur Verfügung gestellt werden sowie zur Charakterisierung und vergleichender Betrachtung mit anderen Abbauprozessen dienen sollten.

Anhand umfangreicher Mikrokosmenversuche mit Grundwasser von insgesamt sieben Standorten, die mit Chlorethenen verunreinigt sind, wurde sowohl das natürliche (intrinsische) Abbaupotential als auch das Stimulierungspotential mittels Bioaugmentation untersucht. Als Inokulum diente eine Anreicherungskultur, die TCE aerob-produktiv umsetzt. Die Grundwasserproben wurden mit flüssiger Kultur in Mineralmedium sowie mit Quarzsand, auf dem die Kultur immobilisiert gewachsen ist, angeimpft. Exemplarisch wurden Proben mit Grundwasser des Standortes, von dem die Kultur ursprünglich stammt, inkuliert.

Die Mikrokosmen ohne Inokulum deuten auf eine weite Verbreitung der Mikroorganismen hin, die TCE aerob-produktiv umsetzen. In Grundwasserproben von sechs der sieben untersuchten Standorte wurde der Abbau nur durch den Zutritt von Sauerstoff und teils zusätzlicher Nährstoffzugabe erfolgreich angeregt und nach einer Anpassungszeit von bis zu 92 d beobachtet. Die ermittelte Verdopplungszeit von 24 d deutete auf ein vergleichsweise langsames Wachstum der abbauaktiven Mikroorganismen hin. Die Bioaugmentation war in allen Mikrokosmen mit Chlorethen-Konzentrationen von weniger als 100 mg/L erfolgreich. Dabei erwiesen sich alle Animpfvarianten als zielführend und regten den TCE-Abbau an oder beschleunigten ihn. Die Zugabe von

Standortwasser, in dem auch der aerob-produktive cis-Dichlorethen (cDCE)-Abbau aktiv ist, bewirkte eine Stimulierung beider Abbauprozesse.

Nach den Laborversuchen kann der aerob-produktive TCE-Abbau über ein breites hydrogeologisches Spektrum vorkommen und angeregt werden und sollte bei der Grundwassersanierung von TCE-kontaminierten Standorten in Betracht gezogen werden. Außerdem wurde die Möglichkeit aufgezeigt, verschiedene Abbauprozesse durch Bioaugmentation zu stimulieren, was für die Altlastenpraxis von besonderem Interesse ist, da an Standorten, die mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) kontaminiert sind, meist mehrere Schadstoffe vorhanden sind.

Aus diesem Grund sind Kenntnisse über Wechselwirkungen verschiedener Schadstoffe ebenso bedeutsam. In den Abbauversuchen wurden bislang unbekannte wechselwirkende Effekte des aerob-produktiven TCE-Abbaus mit cDCE aufgedeckt. Zunächst wurde ein co-metabolischer cDCE-Abbau mit TCE als Wachstumssubstrat beobachtet, der in dieser Arbeit erstmals beschrieben wird, und Transformationsumsätze des neuen Abbauweges über ein breites Konzentrationsspektrum beider Substrate ermittelt. Weiterhin wurde eine Verlangsamung des aerob-produktiven TCE-Abbaus bei nennenswerten cDCE-Konzentrationen festgestellt. Dabei wurde ein linearer Zusammenhang sowohl der Transformationsumsätze des co-metabolischen cDCE-Abbaus als auch der hemmenden Effekte auf den produktiven TCE-Abbau mit dem Konzentrationsverhältnis der beiden Substrate aufgezeigt. Bei niedrigen cDCE/TCE-Verhältnissen kann der aerob-produktive TCE-Abbau eine vollständige co-metabolische cDCE-Umsetzung nach sich ziehen, während hohe cDCE/TCE-Verhältnisse zu einem unvollständigen TCE-Abbau führen können.

Bei den Biomonitoringmethoden, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit getestet und entwickelt wurden, handelt es sich zum einen um ein spezifisches MPN-Verfahren. Hierfür wurde eine geeignete Substratmenge und eine erforderliche Inkubationszeit von zehn Wochen ermittelt sowie verschiedene Auswertemethoden geprüft. Zum anderen stand ein schneller und spezifischer PCR-Nachweis zur Verfügung, der auf Grundlage einer Mikrobiomanalyse von verschiedenen abbauaktiven Proben entwickelt wurde. Demnach sind Bakterien der Familie *Rhodocyclaceae* wesentlich am aerob-produktiven TCE-Abbau beteiligt. Die Validierung der Methoden anhand von Labor- und Feldproben zeigte für den PCR-Nachweis vielversprechende Ergebnisse. Die MPN-Methode erwies sich durch ihre niedrige Bestimmungsgrenze als vorteilhaft, erbrachte jedoch keinen quantitativen Nachweis des Bakterienwachstums im Zuge des TCE-Abbaus.

Die vorliegende Arbeit liefert einen wertvollen Beitrag für die Altlastensanierungspraxis. Die zur Verfügung gestellten Informationen können insbesondere für eine vermehrte Aufdeckung und Nutzung des aerob-produktiven TCE-Abbaus zur Grundwassersanierung dienen.

Abstract

Trichloroethene (TCE) is one of the most prevalent contaminants in groundwater pollution worldwide. Aerobic-productive degradation of TCE has only recently been discovered at one field site and has significant advantages over aerobic co-metabolism and anaerobic dechlorination for remediation practice. No auxiliary substrates are required for stimulation, there are no competitive or side reactions and no toxic metabolites are formed. At sites where microorganisms capable of aerobic-productive TCE degradation are not present, inoculation with a degrading culture (bioaugmentation) can be a promising solution.

The objective of this doctoral thesis was to investigate the occurrence of aerobic-productive TCE degradation and the stimulation potential through bioaugmentation. Furthermore, different bio-monitoring methods should be evaluated and further developed to detect the microorganisms involved in the degradation and to establish a degradation-specific biomonitoring. A further objective was the determination of the kinetic degradation parameters, which should be provided as essential input data for groundwater modeling and used for characterization and comparison with other degradation processes.

Extensive microcosm studies were conducted with groundwater from a total of seven sites contaminated with chloroethenes to investigate the natural (intrinsic) degradation potential as well as the stimulation potential through bioaugmentation. An enrichment culture metabolizing TCE aerobically served as inoculum. The groundwater samples were inoculated with liquid culture in mineral salts medium as well as with immobilized culture on silica sand. Additionally, some samples were inoculated with groundwater from the site where the enrichment culture originated.

The microcosms without inoculum indicate a wide distribution of microorganisms metabolizing TCE aerobically. In groundwater samples from six of the seven investigated sites, degradation was successfully stimulated only by the addition of oxygen and, in some cases, additional nutrients. TCE degradation started in most cases after adaptation times of up to 92 d. The doubling time of 24 d indicated comparatively slow growth of the aerobic TCE degrading microorganisms. Bioaugmentation was successful in all microcosms with chloroethene concentrations below 100 mg/L. All inoculation strategies proved to be effective and triggered or accelerated TCE degradation. The addition of groundwater, in which aerobic-metabolic cis-Dichloroethene (cDCE) degradation is also active, stimulated both degradation processes.

The laboratory experiments showed that aerobic-metabolic TCE degradation can occur and be stimulated across a broad hydrogeologic spectrum and should be considered as a viable option

Abstract

for groundwater remediation at TCE-contaminated sites. In addition, the possibility of stimulating various degradation processes by bioaugmentation was demonstrated, which is of particular interest for remediation practice, as several pollutants are usually present at sites contaminated with chlorinated hydrocarbons (CHC).

Therefore, knowledge about interactions of different pollutants is just as important. The degradation experiments revealed previously unknown interacting effects of aerobic-metabolic TCE degradation with cDCE. Co-metabolic cDCE degradation with TCE as growth substrate was observed, which is described for the first time in this work and transformation yields were determined at a wide range of cDCE and TCE concentrations. Furthermore, a deceleration of aerobic-metabolic TCE degradation was observed in the presence of significant cDCE concentrations. A linear relationship of both the transformation yield of co-metabolic cDCE degradation and the inhibitory effects on productive TCE degradation with the concentration ratio of the two substrates was demonstrated. At low cDCE/TCE ratio, aerobic metabolic TCE degradation can result in complete cDCE removal due to co-metabolic degradation while high cDCE/TCE ratios can lead to incomplete TCE degradation.

The biomonitoring methods tested and developed within this study included a specific MPN method. Therefore, a suitable amount of substrate and a required incubation time of ten weeks were determined, as well as various evaluation methods tested. Also, a fast and specific PCR detection method was provided, which was developed based on a microbiome analysis of various degradative samples. Accordingly, bacteria of the *Rhodocyclaceae* family are considerably involved in aerobic-metabolic TCE degradation. Validation of the methods using laboratory and field samples showed promising results for PCR detection. The MPN method proved to be beneficial due to its low limit of determination but did not provide quantitative detection of bacterial growth during TCE degradation.

The present work makes a valuable contribution to the remediation of contaminated sites. In particular, the information provided can be used to detect and utilize aerobic-metabolic TCE degradation increasingly for groundwater remediation.

Danksagung

Die Arbeiten zu vorliegender Dissertation wurden am DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW) in Zusammenarbeit mit dem Projekt „Bioaugmentation and Monitoring Methods Development for Aerobic Chloroethene Biodegradation in Groundwater“ (BioChlor) durchgeführt und gefördert durch ein Promotionsstipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. An dieser Stelle möchte ich den Personen danken, die mich in meiner Zeit als Doktorandin unterstützt und begleitet haben.

Zunächst geht mein Dank an Prof. Dr. Andreas Tiehm für die spannende Aufgabenstellung, die Unterstützung beim Stipendienantrag sowie die fachliche Betreuung und Begutachtung meiner Dissertation.

In diesem Zuge möchte ich mich auch ganz herzlich bei Dr. Anna-Lena Trautmann bedanken, insbesondere für die Unterstützung auch nach ihrer Zeit am TZW und das Korrekturlesen meiner Dissertation.

Ermöglicht wurde die Promotion durch die Finanzierung der Deutsche Bundesstiftung Umwelt, bei der ich mich aufrichtig für die Förderung durch ein Promotionsstipendium bedanken möchte.

Zu verdanken habe ich die Möglichkeit zur Promotion außerdem meinem Doktorvater Prof. Dr. Stefan Norra, der sich für die wissenschaftliche Betreuung und Begutachtung einer externen Doktorarbeit bereiterklärt und diese auch nach seinem Wechsel an die Universität Potsdam fortgeführt hat.

Mein Dank gilt weiterhin den Studierenden Miriam Lempert, Kevin Maisch und Marie Schupfer für ihr tatkräftiges Mitwirken in Form ihrer Abschlussarbeiten.

Vielen Dank auch an alle Partner und Partnerinnen des Projekts BioChlor für die gute Zusammenarbeit, insbesondere an Dr. Johannes Ho für die Hilfe bei molekularbiologischen Fragestellungen.

Ganz besonders möchte ich mich bei allen Kollegen, Kolleginnen und Hiwis der Abteilung Wasser-mikrobiologie des TZW für das angenehme und herzliche Arbeitsklima sowie die Hilfsbereitschaft und Unterstützung bedanken, insbesondere bei Heico Schell als Ansprechpartner für alle chemischen, rechnerischen und auch sonstigen Belange, meiner Bürokollegin Silke Kraßnitzer für die Betreuung im Labor, Carolin Schweikart und Carmen Kraffert für die molekularbiologischen Laborarbeiten sowie Axel Müller für so manchen Feinschliff bei Anträgen, Berichten und Präsentationen.

Zuletzt danke ich meiner Familie, Freunden und Freundinnen für den Halt und die Unterstützung während der Promotionszeit und in allen Lebenslagen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abstract.....	III
Danksagung	V
Inhaltsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XII
Glossar.....	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	5
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Stoffeigenschaften und Umweltauswirkungen von Chlorethenen.....	7
2.2 Mikrobiologischer Abbau von Chlorethenen.....	10
2.2.1 Anaerobe reduktive Dechlorierung	10
2.2.2 Aerober co-metabolischer Abbau	11
2.2.3 Aerober metabolischer Abbau	13
2.3 Biologische Sanierung von Chlorethenen	14
2.3.1 Anaerobe Verfahren	14
2.3.2 Aerobe Verfahren	15
2.3.3 Sequentiell anaerob-aerobe Verfahren	17
2.4 Biologische Nachweismethoden	18
2.4.1 Most Probable Number (MPN).....	18
2.4.2 Polymerase Kettenreaktion (PCR).....	19

3 Material und Methoden.....	21
3.1 Anreicherungskultur und Medium.....	21
3.2 Analytische Methoden.....	23
3.2.1 Elektrodenmessungen.....	23
3.2.2 Ionenchromatographie.....	23
3.2.3 Gelöster organischer Kohlenstoff.....	24
3.2.4 Gaschromatographie	24
3.3 Mikrokosmen	25
3.3.1 Probenahmestandorte	25
3.3.2 Grundwasserproben.....	28
3.3.3 Versuchsreihen	29
3.4 Biomonitoringmethoden	32
3.4.1 Weiterentwicklung einer MPN-Methode.....	32
3.4.2 Entwicklung einer PCR-Methode	35
3.4.3 Validierung der Biomonitoringmethoden	37
4 Ergebnisse und Diskussion.....	40
4.1 Kultivierung der aerob-metabolischen TCE-Verwerter	40
4.1.1 Abbauaktivität.....	40
4.1.2 Flockenbildung	41
4.2 Mikrokosmenversuche	42
4.2.1 Intrinsisches Abbaupotential	42
4.2.2 Bioaugmentationspotential	48
4.2.3 Wechselwirkungen mit cDCE	52
4.3 Biomonitoringmethoden	60
4.3.1 Weiterentwicklung einer MPN-Methode.....	60
4.3.2 Entwicklung einer PCR-Methode	68
4.3.3 Validierung der Biomonitoringmethoden	72
4.3.4 Zusammenfassende Evaluierung der Biomonitoringmethoden	76

5 Schlussfolgerungen und Ausblick	79
5.1 Vorkommen des aerob-produktiven TCE-Abbaus	79
5.2 Stimulierung des aerob-produktiven TCE-Abbaus.....	80
5.3 Wechselwirkungen des aerob-produktiven TCE-Abbaus mit cDCE.....	82
5.4 Monitoring des aerob-produktiven TCE-Abbaus.....	83
5.5 Fazit.....	85
Literaturverzeichnis	87
Publikationen.....	97
Anhang.....	98
Anhang 1: Analytikergebnisse der Mikrokosmenversuche	98
Anhang 2: Diagramme der Mikrokosmenversuche.....	181

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Häufigkeit der Schadstoffgruppen und der Einzelsubstanzen bei Grundwasserschadensfällen	1
Abbildung 2:	Konzept der Biostimulierung: Der biologische Schadstoffabbau wird durch die Zugabe von limitierenden Substanzen wie Hilfsstoffen (Auxiliarsubstrate), Nährstoffen oder Sauerstoff (bei aeroben Prozessen) angeregt.....	3
Abbildung 3:	Konzept der Bioaugmentation: Der biologische Schadstoffabbau wird durch die Zugabe abbauaktiver Mikroorganismen angeregt	4
Abbildung 4:	Schema einer Grundwasserkontamination durch Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) mit Eintrag der Schwerphase (DNAPL) und Schadstofffahnenbildung	8
Abbildung 5:	Schadstofffahnenlängen für verschiedene Schadstoffgruppen	9
Abbildung 6:	Abbaumechanismus der reduktiven Dechlorierung.....	10
Abbildung 7:	Zonierung der Schadstofffahne bei vollständiger anaerober Dechlorierung	11
Abbildung 8:	Abbauschema des co-metabolischen TCE-Abbaus.....	12
Abbildung 9:	Nachteile der anaeroben Dechlorierung mit Injektion von Auxiliarsubstraten, Metabolitenbildung und Akkumulation der niederchlorierten Ethene cDCE und VC	15
Abbildung 10:	Aerob-produktiver Abbau und Schadstoffeliminierung ohne unerwünschte Nebenreaktionen und Metabolite.....	17
Abbildung 11:	Versuchsschema des Most-Probable-Number-Verfahrens	19
Abbildung 12:	Schema der Polymerase-Kettenreaktion (PCR)	20
Abbildung 13:	Anreicherungskultur flüssig in Mineralmedium und immobilisiert auf Quarzsand in Kleinsäulen.....	22
Abbildung 14:	Geographische Verteilung der untersuchten Standorte	26
Abbildung 15:	Mikrokosmen-Versuchsreihe einer Messstelle.....	32
Abbildung 16:	Übersichtskarte des Standortes zur Validierung der Biomonitoringmethoden.....	38
Abbildung 17:	Wiederholte TCE-Dosierung und Abbau in einer Kleinsäule kumulativ aufgetragen mit korrelierender Chloridbildung	40
Abbildung 18:	Flockenbildung am Boden einer 2 L-Batchflasche	41
Abbildung 19:	Intrinsischer TCE-Abbau in Mikrokosmen von Standort 5 (GWM2981) ohne Inokulum und ohne Inokulum mit anorganischer Nährstoffzugabe verglichen mit der Sterilkontrolle.....	43

Abbildung 20:	Stöchiometrische Chloridbildung in einem Mikrokosmos ohne Inokulum von Standort 5 (GWM2984) mit Ermittlung der Verdopplungszeit in der exponentiellen Phase und Korrelation der gemessenen und der aus dem TCE-Abbau berechneten Chloridbildung.	44
Abbildung 21:	Verdopplungszeiten und Energieumsatz im Zuge des aerob-metabolischen Abbaus verschiedener Schadstoffe	45
Abbildung 22:	Stimulierter TCE-Abbau durch anorganische Nährstoffzugabe in einem Mikrokosmos ohne Inokulum von Standort 4 (GWM12/17).	47
Abbildung 23:	Bioaugmentierter TCE-Abbau in Mikrokosmen von Standort 4 (GWM08/17) mit Flüssigkultur, immobilisierter Kultur und SF-Wasser verglichen mit dem Ansatz ohne Inokulum und der Sterilkontrolle.	49
Abbildung 24:	Stöchiometrische Chloridbildung in einem Mikrokosmos von Standort 4 (GWM08/17) mit Flüssigkultur, gemessen und aus dem TCE-Abbau berechnet	50
Abbildung 25:	Vollständiger cDCE-Abbau bis unter die Bestimmungsgrenze in einem Mikrokosmos mit SF-Wasser von Standort 4 (GWM12/17) durch Stimulierung des aerob-metabolischen TCE- und cDCE-Abbaus.	51
Abbildung 26:	Parallele Abbaumuster von TCE und cDCE in einem Mikrokosmos von Standort 4 (GWM08/17) auch nach TCE-Dosierung	52
Abbildung 27:	Vollständiger cDCE-Abbau bis unter die Bestimmungsgrenze an Tag 84 in einem Mikrokosmos von Standort 6 (B44M)	53
Abbildung 28:	Versetzer Abbau von TCE und cDCE in einem Mikrokosmos von Standort 4 mit SF-Wasser (GWM17/17)	55
Abbildung 29:	Linearer Zusammenhang zwischen dem molaren Transformationsumsatz Ty' (cDCE/TCE) und dem molaren cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnis zu Versuchsbeginn bzw. nach Aufdosierung in den Mikrokosmen	56
Abbildung 30:	cDCE- und TCE-Abbau prozentual zur Ausgangskonzentration sowie absolute Konzentrationsänderungen für drei verschiedene Konzentrationsverhältnisse mit den entsprechenden Ty'-Werten.....	57
Abbildung 31:	Linearer Zusammenhang zwischen TCE-Restkonzentrationen nach Stagnation des Abbaus und dem molaren cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnis in den Mikrokosmen zu Versuchsbeginn.....	58
Abbildung 32:	Verzögerung des co-metabolischen cDCE-Abbaus in einem Mikrokosmos mit cTCE >> ccDCE von Standort 5 (GWM2981) auch nach TCE-Dosierung.....	59
Abbildung 33:	Ergebnisse der MPN-Vorversuche zur Inkubationszeit mit Auswertung anhand der Trübung und anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® nach 24h Einwirkzeit bei 37°C	62
Abbildung 34:	Inkubationszeiten bei MPN-Methoden verschiedener stoffwechselphysiologischer Gruppen	63

Abbildung 35: MPN-Ansatz nach Zugabe und Inkubation des Farbstoffs PrestoBlue® mit deutlichem Farbumschlag nach pink und leichtem Farbumschlag nach lila	64
Abbildung 36: Ergebnisse der MPN-Versuche mit Laborproben und Auswertung anhand der Trübung sowie anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® nach 24h und nach 7d Einwirkzeit bei Raumtemperatur.....	66
Abbildung 37: Strukturformel des Farbstoffs Resazurin, der im Reagenz Presto-Blue® enthalten ist.....	67
Abbildung 38: PCR-Nachweis zu Versuchsmitte und -Ende in einem Mikrokosmos von Standort 5 (GWM2981) nach hohem TCE-Umsatz, fehlender Nachweis zu Versuchsmitte in einem Mikrokosmos von Standort 5 (GWM2984) trotz hohem TCE-Umsatz.....	70
Abbildung 39: Fehlender PCR-Nachweis in einem Mikrokosmos von Standort 7 (PZ13) mit geringen TCE-Umsatzmengen sowie in der Negativkontrolle von Standort 5 (GWM2983) ohne TCE-Abbau	71
Abbildung 40: Ergebnisse zur Validierung der Biomonitoringmethoden mit Feldproben innerhalb und außerhalb des Pilottestfelds, in dem der aerob-metabolische Chlorethen-Abbau mit Sauerstoff stimuliert wird	73
Abbildung 41: Ergebnisse zur Validierung der Biomonitoringmethoden PCR und MPN im Zuge des TCE-Abbaus der Flüssigkulturen SV1 bis SV6	74
Abbildung 42: Vorkommen des aerob-metabolischen TCE-Abbaus an den untersuchten Standorten und mögliche überregionale Aufdeckung und Nutzung	79
Abbildung 43: Stimulierung des aerob-produktiven TCE-Abbaus durch Bioaugmentation im Feld	81
Abbildung 44: Aerober co-metabolischer cDCE-Abbau mit TCE bei verschiedenen Konzentrationsverhältnissen	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Stoffeigenschaften der Chlorehthene.....	7
Tabelle 2:	Zusammensetzung des Mineralmediums.....	21
Tabelle 3:	Zusammensetzung der Spurenelementlösung.....	21
Tabelle 4:	Betriebsbedingungen und Kennzahlen der IC.....	23
Tabelle 5:	Komponenten und Analyseparameter des GC-Systems	25
Tabelle 6:	Startwerte der unbehandelten Grundwasserproben und Aquifereigenschaften	30
Tabelle 7:	Mikrokosmen-Ansätze der untersuchten Grundwassermessstellen	30
Tabelle 8:	Zusammensetzung der Nährstofflösung	31
Tabelle 9:	Parameter der Gradienten-PCR	37
Tabelle 10:	Zusammenfassende Ergebnisse der Mikrokosmenversuche zum intrinsischen Abbaupotential	42
Tabelle 11:	Zusammenfassende Ergebnisse der Mikrokosmenversuche zum Bioaugmentationspotential.....	48
Tabelle 12:	Transformationsumsätze Ty' des co-metabolischen cDCE-Abbaus aus der Literatur	54
Tabelle 13:	Ergebnisse der MPN-Vorversuche zur Substratmenge.....	60
Tabelle 14:	Zusammenfassende Bewertung der Biomonitoringmethoden	77

Glossar

1,1DCE	1,1-Dichlorethen
BG	Bestimmungsgrenze
BioChlor	Bioaugmentation and Monitoring Methods Development for Aerobic Chloroethene Biodegradation in Groundwater (Partnerprojekt)
BTEX	Stoffgruppe der Aromaten Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol
cDCE	cis-1,2-Dichlorethen
DNAPL	dense non-aqueous phase liquid (Schwerphase)
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
GZZ	Gesamtzellzahl
ISCO	In-situ chemische Oxidation
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MPN	Most probable number
NA	Natural Attenuation
OTU	operative taxonomic unit (operative taxonomische Einheit)
PCE	Tetrachlorethen (Perchlorethen)
PCR	Polymerase Chain Reaction (Polymerase-Kettenreaktion)
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
SF-Wasser	Grundwasser des Standortes, an dem der aerob-produktive Trichlorethen-Abbau erstmals beobachtet und nachgewiesen wurde
TCE	Trichlorethen
TZW	DVGW-Technologiezentrum Wasser
tDCE	trans-Dichlorethen
VC	Vinylchlorid

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Etwa ein Drittel der weltweiten Süßwasserressourcen sind im Grundwasser gespeichert, das in Europa 65 % des Trinkwassers und 25 % des Wassers zur Bewässerung in der Landwirtschaft deckt. Mit dem steigenden Wasserbedarf der wachsenden Bevölkerung in einem sich gleichzeitig verändernden Klima sind zunehmende Wasserentnahmen und Schadstoffeinträge aus der Landwirtschaft und Industrie verbunden. Kontaminationen der gefährdeten Grundwasserressourcen stellen eine ernsthafte Bedrohung dar (EEA 2022).

Altlasten sind ein erhebliches Umweltproblem und eine Gefahr für Ökosysteme und Grundwasser. Allein in Deutschland sind über 19.000 Altlasten bekannt. Über 350.000 Flächen sind altlastenverdächtig (UBA 2022). Mehr als die Hälfte der Grundwasserschadensfälle wird durch Kontaminationen mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) verursacht (Abbildung 1, links). Dabei kommt die Stoffgruppe der Chlorethene mit Tetrachlorethen (auch Perchlorethen genannt – PCE), Trichlorethen (TCE), cis- und trans-Dichlorethen (cDCE, tDCE) sowie Vinylchlorid (VC) am häufigsten vor (Abbildung 1, rechts).

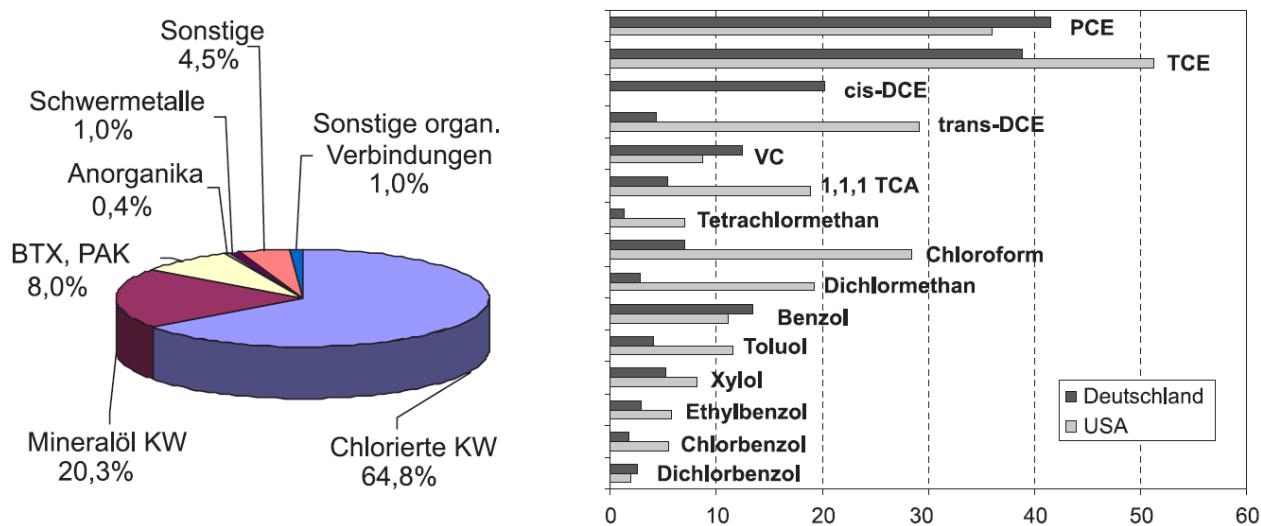


Abbildung 1: Häufigkeit der Schadstoffgruppen (links) und der Einzelsubstanzen (rechts) bei Grundwasserschadensfällen (Grandel und Dahmke 2008)

Physikalische und chemische Sanierungsmethoden wie Bodenaushub, chemische Oxidation, reaktive Wände oder Pump-and-Treat sind oft kostspielig oder ineffizient (Löffler et al. 2013). Pump-

and-Treat gilt als Standardverfahren für Verunreinigungen mit flüchtigen organischen Verbindungen. Dabei wird das kontaminierte Grundwasser gefördert und gereinigt. Der wartungsintensive Betrieb erstreckt sich meist über Jahrzehnte und die Schadstoffe werden lediglich aus dem Wasser in die Atmosphäre oder auf ein festes Medium übertragen. Die Abluft oder das Aufnahmematerial müssen dann weiter entsorgt werden (Duba et al. 1996). Die Sanierungspraxis zeigt außerdem, dass der ursprüngliche Zustand mit diesen herkömmlichen Methoden meist nicht wieder vollständig hergestellt werden kann und nach anfänglichen Erfolgen ein sogenannter Tailing-Effekt eintritt. Dabei stellt sich zwischen den in der Bodenmatrix fixierten und den im Grundwasser gelösten Schadstoffen ein Gleichgewicht ein und die Schadstoffkonzentration nimmt mit fortschreitender Sanierung nur noch sehr langsam oder gar nicht mehr ab. Die Folge nach mehrjährigem Betrieb ist ein weiterhin bestehendes Gefährdungspotential, dem gegenüber hohe laufende Kosten unverhältnismäßig erscheinen (Stupp et al. 2007).

Als ergänzende oder alternative Maßnahme kommt der natürlichen Schadstoffminderung (Natural Attenuation – NA) eine zunehmende Bedeutung zu. Darunter werden “biologische, chemische und physikalische Prozesse, die ohne menschliches Eingreifen zu einer Verringerung der Masse, der Fracht, der Toxizität, der Mobilität, des Volumens oder der Konzentration eines Stoffes im Boden oder Grundwasser führen” (LABO 2015), verstanden. Dabei spielt der mikrobiologische Abbau eine wesentliche Rolle, da er den maßgebenden Vorgang für eine Umwandlung der Schadstoffe und so für eine nachhaltige Reduzierung bildet (Grandel & Dahmke 2008).

Die natürlich ablaufenden mikrobiologischen Abbauprozesse an einem Standort sind jedoch oft nicht ausreichend für Sanierungszwecke. Die Zugabe von limitierenden Substanzen wie Hilfsstoffe (Auxiliarsubstrate) oder Nährstoffe und bei aeroben Prozessen auch Sauerstoff können die biologische Aktivität anregen (Olaniran et al. 2006). Dieses Konzept wird als **Biostimulierung** bezeichnet und ist in Abbildung 2 dargestellt. Für Standorte, an denen keine Organismen mit der Fähigkeit zum Schadstoffabbau vorhanden sind, kann die Stimulierung durch Zugabe einer abbauaktiven Kultur (Inokulum) eine vielversprechende Lösung zur Schadstoffeliminierung darstellen (Li et al. 2021b; Lyon und Vogel 2013). Dieses Verfahren wird als **Bioaugmentation** bezeichnet und ist in Abbildung 3 veranschaulicht.

Ein wichtiges Werkzeug zur Bewertung des Abbaupotentials an einem Standort in der Entscheidungsphase sowie in der späteren Überwachung einer Biosanierung ist die mikrobielle Bestandsaufnahme zum Nachweis der abbauaktiven Mikroorganismen. Zur Erfassung der Gesamtkeimzahl oder stoffwechselphysiologischer Gruppen stehen Kulturverfahren wie Most probable number (MPN) und zur Detektion bestimmter Bakterien oder Enzyme molekularbiologische Methoden

wie die Polymerase Kettenreaktion (PCR) zur Verfügung (Giddings et al. 2010a; Tiehm und Schmidt 2007). Im Genehmigungsprozess für NA-Verfahren spielt außerdem die Prognose der Schadstofffahne eine entscheidende Rolle. Hierfür werden numerische Modelle angewendet und kinetische Abbauparameter dienen als wichtige Eingangsgrößen, um die Abbauleistung zu simulieren (Michels et al. 2008).

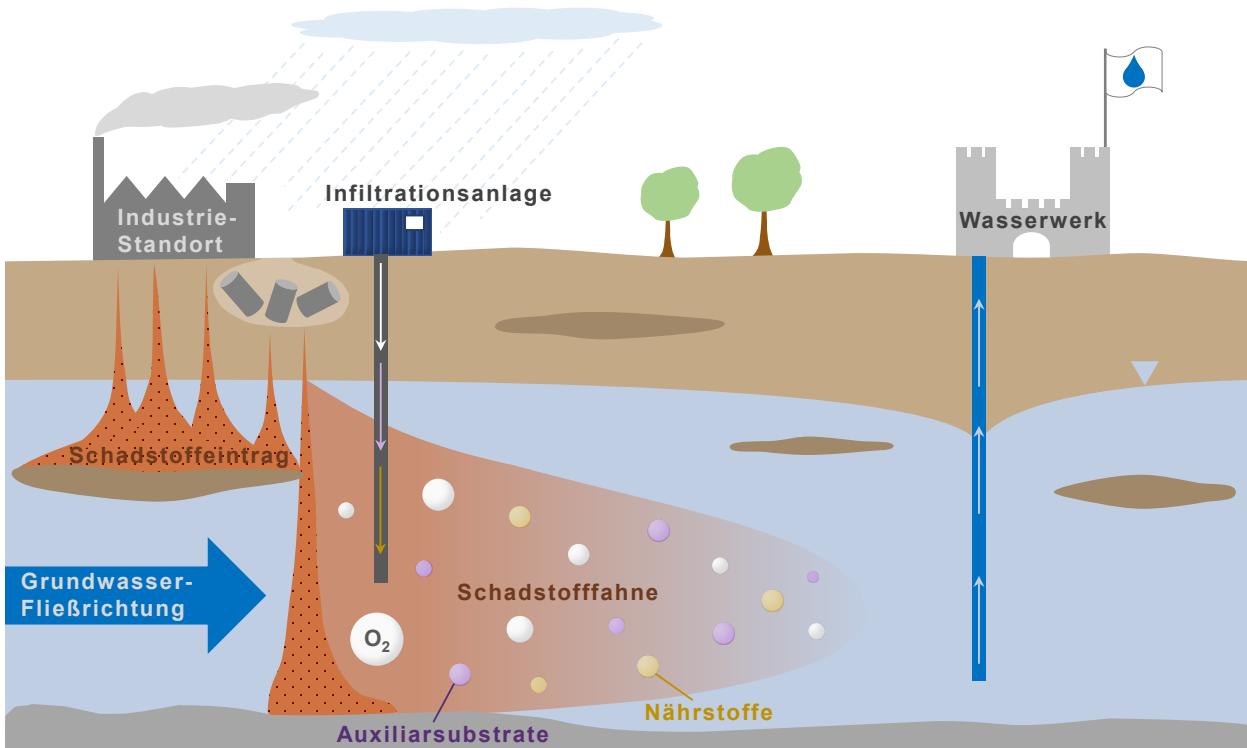


Abbildung 2: Konzept der Biostimulierung: Der biologische Schadstoffabbau wird durch die Zugabe von limitierenden Substanzen wie Hilfsstoffen (Auxiliarsubstrate), Nährstoffen oder Sauerstoff (bei aeroben Prozessen) angeregt (eigene Darstellung)

Chlorethene können im Grundwasser mikrobiologisch über verschiedene Mechanismen abgebaut werden. Darunter zeigt der aerob-metabolische (produktive) Abbauweg entscheidende Vorteile für die Altlastensanierungspraxis und wurde für TCE, den Hauptschadstoff vieler belasteter Standorte, erstmals nachgewiesen (Schmidt et al. 2014) und orientierend untersucht (Gaza et al. 2019).

Aufgrund der Vorteile und vielversprechenden ersten Untersuchungen beschäftigt sich das Partnerprojekt „Bioaugmentation and Monitoring Methods Development for Aerobic Chloroethene Biodegradation in Groundwater“ (BioChlor) mit der Entwicklung neuer Sanierungsstrategien und Monitoringmethoden für den aerob-produktiven Chlorethen-Abbau. Eine Zielsetzung des Projekts ist

die molekularbiologische Identifizierung der beteiligten Mikroorganismen. Außerdem sollen Nachweismethoden entwickelt und etabliert werden, um die Mikroorganismen erfassen und die Abbauprozesse überwachen zu können.

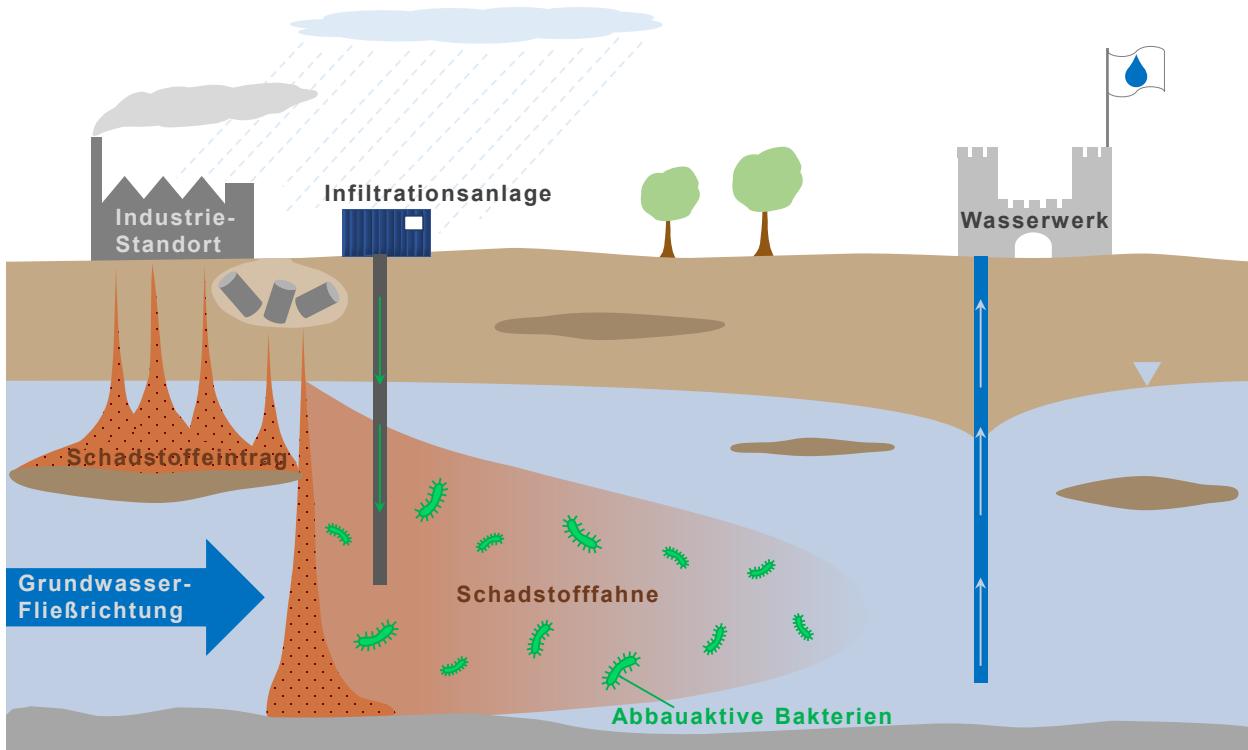


Abbildung 3: Konzept der Bioaugmentation: Der biologische Schadstoffabbau wird durch die Zugabe abbauaktiver Mikroorganismen angeregt (eigene Darstellung)

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Die natürlichen und stimulierten Schadstoffminderungsprozesse an einem Standort müssen zur Nutzung für Sanierungszwecke zunächst detailliert charakterisiert, quantifiziert und ihre Effizienz bewertet werden. In Hinblick auf die Untersuchung des aerob-produktiven TCE-Abbaus bei Grundwasserkontaminationen und die erfolgreiche Anwendung in der Altlastenpraxis ist ein umfassendes Verständnis des vergleichsweise neuen Abbauweges notwendig.

Bisher wurde der Prozess auf natürliche Weise nur für einen Standort im Südwesten Deutschlands beschrieben und weist aufgrund seiner Vorteile gegenüber den anderen Abbauwegen in der Anwendung sowie der weiten Verbreitung von TCE-Kontaminationen eine hohe Praxisrelevanz auf. Kenntnisse über die Verbreitung der abbauaktiven Mikroorganismen, die zu der Aufdeckung und Nutzung des Abbaus an weiteren Standorten beitragen könnten, liegen jedoch nicht vor.

Durch die Animpfung mit einer abbauaktiven Kultur (Bioaugmentation) könnte der TCE-Abbau auch an Standorten ohne intrinsisches Abbaupotential realisiert werden. In bisherigen Untersuchungen wurde zwar eine Kultur, die TCE aerob-produktiv umsetzt, angereichert und das Bioaugmentationspotential exemplarisch aufgezeigt, jedoch ist der Anwendungsbereich noch nicht untersucht worden.

Bei der Bewertung der mikrobiologischen Abbauprozesse an einem Standort sowie bei der Überwachung ihrer Wirksamkeit in der späteren Umsetzung spielen Biomonitoringdaten eine wichtige Rolle. Für den aeroben-produktiven TCE-Abbau fehlen bislang Erfahrungen in Hinblick auf die Spezifität und Sensitivität von Biomonitoringmethoden im Grundwasser. Die am Abbau beteiligten Mikroorganismen konnten bislang noch nicht identifiziert und geeignete Nachweisverfahren etabliert werden.

Im Genehmigungsprozess zur Umsetzung von NA-Maßnahmen ist die Prognose der Schadstofffahnenentwicklung ein wichtiges Akzeptanzkriterium. Essentielle Eingangsgrößen der numerischen Modelle als Prognoseinstrumente sind kinetische Abbauparameter, mit denen die mikrobiologischen Abbauprozesse charakterisiert, verglichen und modelliert werden können. Für den aeroben-produktiven TCE-Abbau wurden diese Größen bislang nicht ermittelt.

Um die beschriebenen Wissenslücken zu schließen, beinhaltet die vorliegende Arbeit folgende **Fragestellungen und Zielsetzungen**:

1. Wie ist die Verbreitung der Mikroorganismen, die TCE aerob-produktiv umsetzen?
→ Untersuchungen zum Vorkommen des aerob-produktiven TCE-Abbaus:
Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des intrinsischen Abbaupotentials von Standorten in unterschiedlichen Regionen, um Erkenntnisse über das natürliche Vorkommen der am Abbau beteiligten Mikroorganismen zu erhalten.
2. Kann der aerob-produktive TCE-Abbau an unterschiedlichen Standorten, an denen keine abbaufähigen Mikroorganismen vorhanden sind, durch Bioaugmentation angeregt werden?
→ Untersuchungen zum Anwendungsbereich der Bioaugmentation:
Eine weitere zentrale Zielsetzung war die Ermittlung des Stimulierungspotentials von verschiedenen Grundwässern mittels Bioaugmentation, um Aussagen über den Anwendungsbereich treffen zu können.
3. Welche Biomonitoringmethoden eignen sich für den Nachweis und die Überwachung des aerob-produktiven TCE-Abbaus?
→ Evaluierung und Weiterentwicklung von unterschiedlichen Biomonitoringmethoden:
Zur Etablierung eines Abbau-spezifischen wie auch ausreichend sensitiven Biomonitorings sollten im Zuge der Abbauversuche unterschiedliche Biomonitoringmethoden evaluiert und weiterentwickelt werden.
4. Welche Abbauraten sind für den aerob-produktiven TCE-Abbau zu erwarten?
→ Bestimmung kinetischer Abbauparameter:
Eine geeignete Biomonitoringmethode zur Detektion der abbauaktiven Mikroorganismen sollte zur Aufnahme von Wachstumskurven dienen, um daraus auf die Kinetik des aerob-produktiven TCE-Abbaus zu schließen.

Mit den Ergebnissen sollen wichtige Informationen für die Untersuchung des aerob-produktiven TCE-Abbaus an CKW-kontaminierten Standorten sowie für die Anwendung von Bioaugmentation zur Stimulierung zur Verfügung gestellt werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Stoffeigenschaften und Umweltauswirkungen von Chlorethenen

Die Summen- und Strukturformeln der Chlorethene sind mit den wichtigsten Stoffeigenschaften, die in Zusammenhang mit ihrem Verhalten in der Umwelt stehen, und den entsprechenden Grenzwerten der Trinkwasserverordnung in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Stoffeigenschaften der Chlorethene (Chen et al. 2012; DGUV 2023; TrinkwV 2023)

Verbindung (CAS-Nummer)	Summenformel	Strukturformel	Molare Masse [g/mol]	Dichte [g/cm ³]	Aggregatzustand	Wasser-Löslichkeit [g/L]	Log K_{OW} [-]	Henry-Konstante H^* (24°C) [-]	Grenzwert TrinkwV [µg/L]
Tetrachlorethen (127-18-4)	C ₂ Cl ₄		165,83	1,62 ^a	flüssig	0,16 ^a	3,4	0,676	
Trichlorethen (79-01-6)	C ₂ HCl ₃		131,39	1,46 ^a	flüssig	1 ^a	2,42	0,411	10 (Σ PCE + TCE)
cis-Dichlorethen (156-59-2)	C ₂ H ₂ Cl ₂		96,94	1,28 ^a	flüssig	3,5 ^c	1,86	0,162	-
trans-Dichlorethen (156-60-5)	C ₂ H ₂ Cl ₂		96,94	1,26 ^a	flüssig	6,3 ^a	2,09	-	-
1,1-Dichlorethen (75-35-4)	C ₂ H ₂ Cl ₂		96,94	1,25 ^a	flüssig	3,4 ^c	2,13	-	-
Vinylchlorid (106-42-3)	C ₂ ClH ₃		62,50	0,00267 ^b	gasförmig	1,1 ^a	1,52	1,049	0,50

^a: bei 20°C, ^b: bei 15°C, ^c: bei 25°C, * definiert als Konzentration in der Gasphase zu Konzentration in der Wasserphase (c_{Gas}/c_{Wasser})

Die flüssigen Chlorethene sind farblos, bei Raumtemperatur leicht flüchtig, in Wasser begrenzt löslich und haben eine geringere Viskosität und höhere Dichte als Wasser. Aufgrund ihrer geringen Kosten, leichten Verfügbarkeit, guten Lösemittelleigenschaften, chemischen Stabilität und Brandsicherheit wurden sie in großen Mengen hergestellt und vielfältig eingesetzt. PCE und TCE sind weit verbreitete Lösemittel, die in der Industrie, in der Landwirtschaft, beim Militär und im Haushalt Anwendung fanden und vor allem in der chemischen Reinigung und in der Metallverarbeitung verwendet wurden. Sie stellen die häufigsten CKW-Grundwasserkontaminationen dar und treten in den höchsten Konzentrationen auf (Bradley 2003; Löffler et al. 2013; Xiao et al. 2020).

Mikrobiologisch können sie weiter zu cDCE, VC und letztendlich Ethen abgebaut werden. Oft stagniert der Abbau bei den niederchlorierten Verbindungen, so dass Verunreinigungen mit cDCE und VC meist auf den unvollständigen Abbau von PCE- und TCE-Kontaminationen zurückzuführen sind. Daneben stellt die industrielle Polyvinylchlorid (PVC)-Produktion einen direkten Eintragspfad für VC dar (Dolinová et al. 2017).

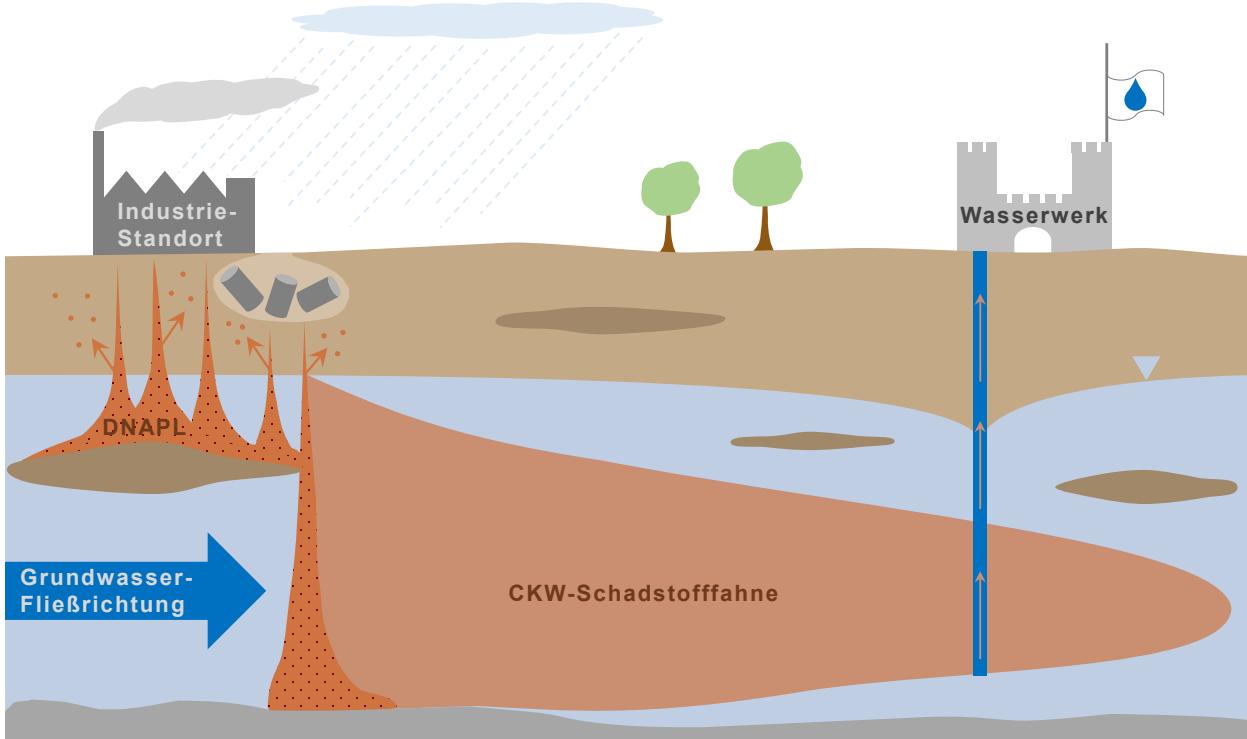


Abbildung 4: Schema einer Grundwasserverunreinigung durch chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) mit Eintrag der Schwerphase (DNAPL) und Schadstofffahnenbildung (eigene Darstellung)

Abbildung 4 zeigt schematisch eine Grundwasserverunreinigung durch chlorierte Kohlenwasserstoffe. Der unsachgemäße Umgang, die Unkenntnis über die gesundheitlichen Auswirkungen und der Umweltgefahren sowie das Fehlen von Vorschriften während der jahrzehntelangen extensiven Verwendung führten zu einer weitreichenden Verschmutzung des Grundwassers (Koziollek et al. 1999; Löffler et al. 2013). Aufgrund ihrer geringen Viskosität können Einträge auch durch gering poröse Feststoffe (z.B. Beton), die für Wasser oder Öl undurchlässig sind, erfolgen. Im Vergleich zu anderen Schadstoffgruppen weisen Chlorethene eine sehr hohe Wasserlöslichkeit und weniger hydrophobe Eigenschaften auf, so dass sich große Mengen ins Grundwasser lösen können, die durch Sorptionsprozesse kaum zurückgehalten werden. Als Folge können sich Schadstofffahnen von mehreren Kilometern Länge bilden (Abbildung 5), die das Grundwasser über lange Zeit verunreinigen (Wisotzky 2011). Mit einer Dichte größer als die von Wasser können Chlorethene als

Schwerphase (dense non-aqueous phase liquid – DNAPL) auch in tiefe Grundwasserstockwerke gelangen. Gleichzeitig sind sie leichtflüchtig und können in die ungesättigte Bodenzone und die Atmosphäre entweichen (Dolinová et al. 2017; Stupp et al. 2007).

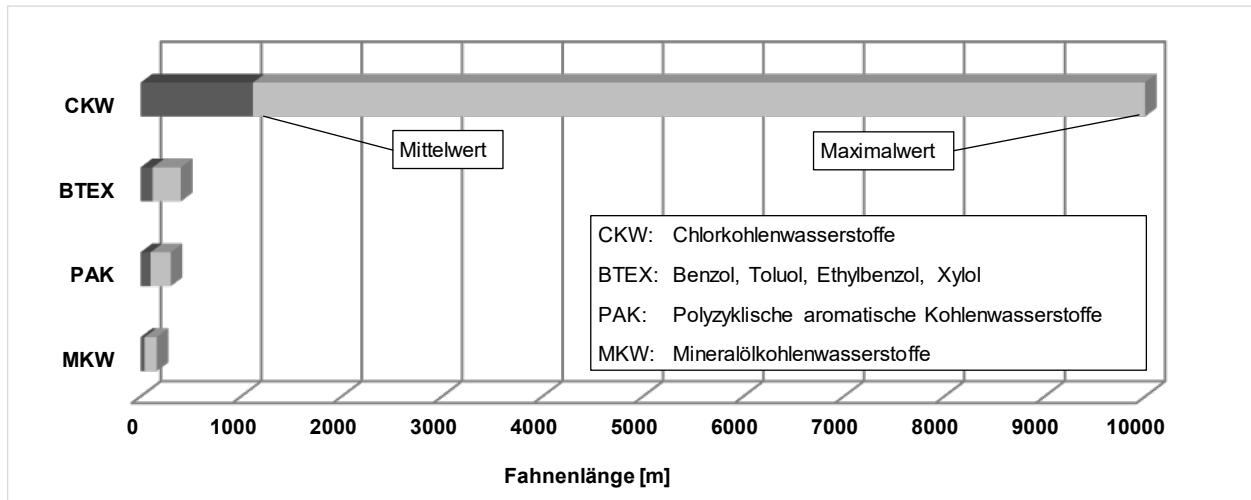


Abbildung 5: Schadstofffahnenlängen für verschiedene Schadstoffgruppen (Stupp et al. 2007)

Nach Feststellung erster CKW-Grundwasserschadensfälle in den 1960er Jahren und zunehmenden Erkenntnissen über ihre Umweltauswirkungen wurde die Produktion, Einfuhr und Verwendung der Stoffgruppe ab den 1980er Jahren reglementiert und Grenzwerte für das Trinkwasser eingeführt (Grandel und Dahmke 2008). Während Chlorethene für die industrielle Nutzung viele Vorteile aufweisen, zeigen sie aufgrund ihrer Persistenz und Ökotoxizität nicht nur ein Gefährdungspotential für die Umwelt auf, sondern wirken sich auch auf die menschliche Gesundheit aus. VC wirkt erwiesenermaßen kanzerogen, woraus auch der vergleichsweise geringe Trinkwassergrenzwert resultiert. Die anderen Chlorethene stehen im Verdacht, kanzerogen zu wirken (Mattes et al. 2010). TCE wird unter anderem mit einem erhöhten Brustkrebsrisiko (Coyle et al. 2005), Autoimmunerkrankungen (Cooper et al. 2009) und Parkinson (Gash et al. 2008) in Verbindung gebracht.

2.2 Mikrobiologischer Abbau von Chlorethenen

2.2.1 Anaerobe reduktive Dechlorierung

Chlorethene galten bis in die 1980er Jahre als nicht biologisch abbaubar. Dann wurde die reduktive Dechlorierung (auch Halorespiration oder Chloratmung genannt) als Hauptabbauweg für Chlorethene aufgedeckt (Bradley 2003). Bei der reduktiven Dechlorierung werden die Chlorethene als Elektronenakzeptoren genutzt und unter anaeroben Bedingungen reduziert, während einfache Substrate wie Wasserstoff und Acetate als Elektronendonator dienen (Auxiliarsubstrate der anaeroben Dechlorierung). Der Abbaumechanismus ist in Abbildung 6 dargestellt. Bei einem vollständigen Abbau wird ausgehend vom hochchlorierten PCE über TCE, cis- und in vergleichsweise geringem Anteil auch trans- und 1,1-Dichlorethen (tDCE, 1,1DCE) bis hin zu VC und schließlich Ethen schrittweise ein Chloratom entfernt und durch ein Wasserstoffatom ersetzt (Löffler et al. 2013). Die für die Halorespiration verantwortlichen Enzyme sind verschiedene reduktive Dehalogenasen, die je nach Abbauschritt die Spaltung der Kohlenstoff-Chlor-Verbindung des entsprechenden Moleküls katalysieren (Futagami et al. 2008).

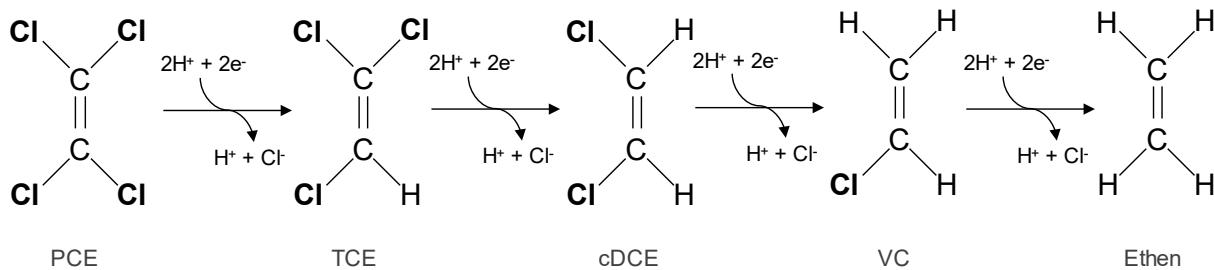


Abbildung 6: Abbaumechanismus der reduktiven Dechlorierung (Löffler et al. 2013)

Bei mikrobiologischer Aktivität spiegelt sich der Abbaumechanismus der anaeroben Dechlorierung an kontaminierten Standorten in einer entsprechenden Zonierung der Schadstofffahne wider (Abbildung 7). Ausgehend vom Schadensherd verschiebt sich die Schadstoffverteilung vom hochchlorierten PCE als Hauptkontaminante stromabwärts zu den Zwischenprodukten TCE, cDCE, VC und bei vollständiger Dechlorierung bis zu Ethen (Tiehm und Schmidt 2007; Wiedemeier et al. 1999). Je größer die Anzahl an Chloratomen der Verbindung ist, desto stärker liegt diese oxidiert vor und desto größer ist ihre Tendenz reduziert zu werden. Mit sinkender Chloratomzahl wird die fortschreitende Dechlorierung erschwert und läuft im Gegensatz zur schnellen Umsetzung von PCE zu TCE und cDCE deutlich langsamer ab. Als Folge wird an vielen Standorten eine Anreicherung des niederchlorierten cDCE und VC beobachtet (Dolinová et al. 2017). Ursache hierfür

ist auch, dass nicht alle Mikroorganismen zur vollständigen Dechlorierung befähigt sind. Viele anaerobe dechlorierende Bakterien wie *Dehalobacter restrictus*, *Dehalospirillum multivorans* und *Geobacter lovleyi* können PCE über TCE zu cDCE reduzieren. Die einzigen bekannten Bakterien, die den Abbau über cDCE hinaus zu VC und Ethen vollziehen können, sind Vertreter der Gattung *Dehalococcoides* (Mattes et al. 2010).

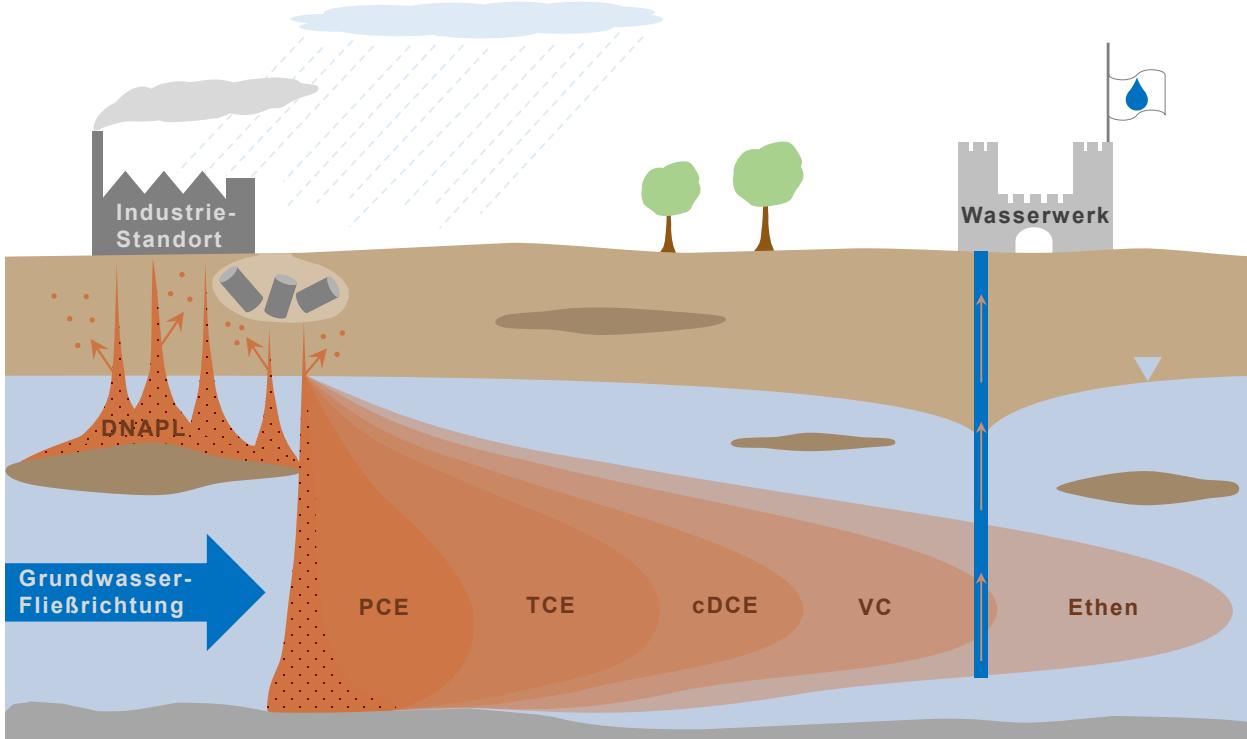


Abbildung 7: Zonierung der Schadstofffahne bei vollständiger anaerober Dechlorierung (eigene Darstellung)

2.2.2 Aerober co-metabolischer Abbau

Beim aerob co-metabolischen Abbau werden die Schadstoffe mit Sauerstoff als Elektronenakzeptor ohne Kohlenstoff- oder Energiegewinn für die beteiligten Mikroorganismen umgesetzt. Verantwortlich dafür sind Substrat-unspezifische Enzyme, die eigentlich für den Stoffwechsel von anderen Verbindungen gebildet wurden (Arp et al. 2001). Bisher wurde der aerobe co-metabolische Abbau für VC, cDCE, tDCE, 1,1DCE und TCE beobachtet. Als Wachstumssubstrate (Auxiliarsubstrate des co-metabolischen Abbaus) können 2,4-Diphenoxycärsäure, Ammonium, Cumol, Ethan, Ethen, Isopren, Phenol, Propen, Propan, Butan, n- Pentan, n-Hexan, Methan, Toluol oder

auch andere Chlorkohlenwasserstoffe wie VC und Chlorbenzol dienen (Doughty et al. 2005; Frascari et al. 2008; Frascari et al. 2006; Kim et al. 2010).

Bei den Enzymen handelt es sich im Wesentlichen um Mono- und Dioxygenasen mit einem breiten Substrat-Spektrum. Diese reduzieren Sauerstoff und katalysieren durch den Einbau von einem (Monooxygenasen) oder zwei Sauerstoffatomen (Dioxygenasen) die Öffnung der Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung der Chlorethene (Abbildung 8). Bei der Katalyse durch Dioxygenasen entsteht ein Zwischenprodukt, bei der eine Eisenbrücke zwischen den beiden Sauerstoffatomen angenommen wird und das sich weiter in Ameisensäure und Glyoxylsäure aufspaltet (Field und Sierra-Alvarez 2004). Monooxygenasen bilden als Zwischenprodukte hauptsächlich reaktive Epoxide. Diese bilden schädliche Abbauprodukte, die mit Makromolekülen in Zellen reagieren oder spontan in Dichloressigsäure, Glyoxylsäure, Ameisensäure oder Kohlenmonoxid zerfallen (Arp 1995). Diese wiederum können sich in der wässrigen Phase anreichern oder weiter zu Kohlenstoffdioxid abgebaut werden, so dass beim co-metabolischen Abbau oft eine unvollständige Mineralisierung beobachtet wird (Little et al. 1988; Pant und Pant 2010).

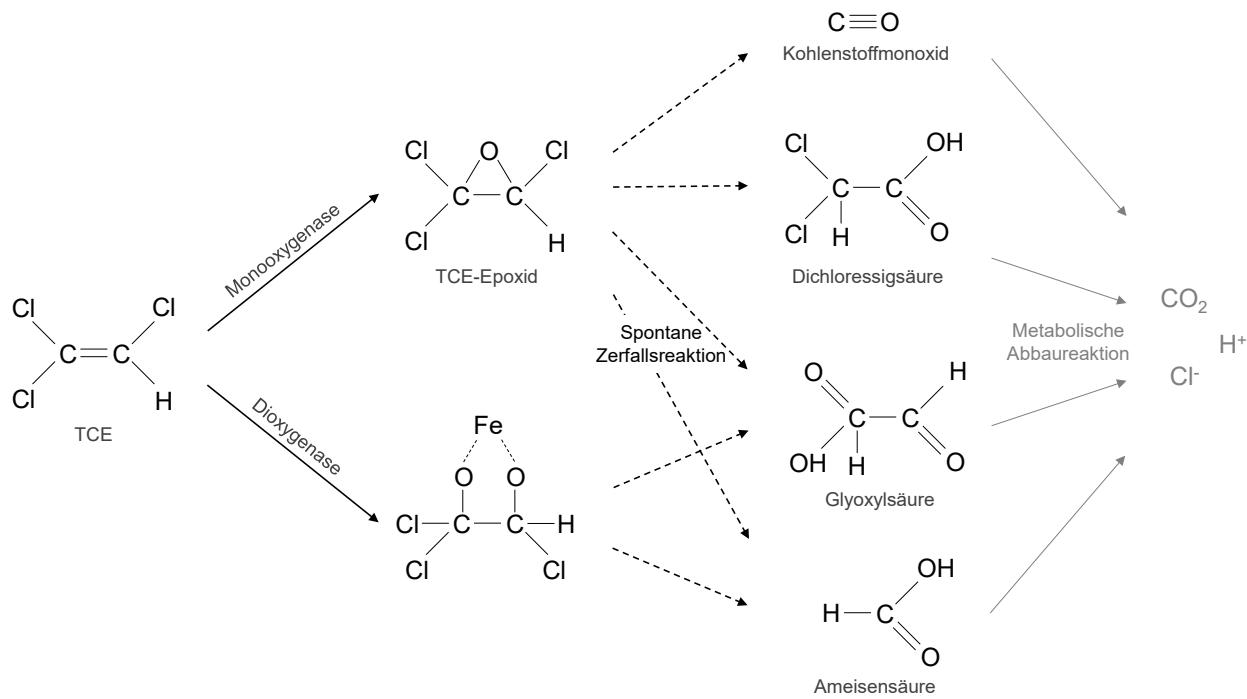


Abbildung 8: Abbauschema des co-metabolischen TCE-Abbaus, graue Linien deuten unvollständige Reaktion an, in Anlehnung an Little et al. (1988) und Field und Sierra-Alvarez (2004)

Auch wenn verschiedene toxische und instabile Metabolite durch co-metabolische Prozesse entstehen können, ist die Bildung von toxischen Endprodukten im Vergleich zur reduktiven Dechlo-

rierung in der Regel geringer. Außerdem ist die weite Verbreitung vieler Oxygenase-exprimierender Bakterien vorteilhaft für die Nutzung als Sanierungsverfahren. Um das Zellwachstum und die Oxygenase-Aktivität aufrecht zu erhalten, ist jedoch die Anwesenheit von Wachstumssubstraten in ausreichender Konzentration erforderlich (Frascari et al. 2015; Mattes et al. 2010). Weiterhin konkurrieren Wachstumssubstrate und Schadstoffe um die Oxidationskapazität der Oxygenasen, so dass neben der Hemmung durch die Toxizität von Zwischenprodukten auch gegenseitige competitive Hemmungen des Abbaus auftreten können und der Prozess wesentlich langsamer abläuft als die direkte metabolische Umsetzung (Alvarez-Cohen und Speitel 2001; Chang und Alvarez-Cohen 1995).

2.2.3 Aerober metabolischer Abbau

Beim aeroben metabolischen (produktiven) Abbau werden die Chlorehene als alleiniges Wachstumssubstrat zur Kohlenstoff- und Energiegewinnung der beteiligten Mikroorganismen genutzt und als Elektronendonatoren mit Sauerstoff umgesetzt. Vor allem Monooxygenase-Enzyme spielen dabei eine entscheidende Rolle und katalysieren als ersten Schritt die Epoxidbildung (Dolinová et al. 2017). Auch wenn die weiteren Abbaumechanismen nicht genau bekannt sind, wurde beim produktiven Abbau eine vollständige Mineralisierung in die anorganischen Endprodukte Kohlenstoffdioxid, Chlorid und Wasserstoff bzw. Wasser beobachtet (Bradley und Chapelle 2000; Bradley et al. 1998; Schmidt et al. 2014). Ohne die notwendige Zugabe von Auxiliarsubstraten und die Bildung toxischer Zwischenprodukte spielt der Abbauweg für die Sanierungspraxis eine herausragende Rolle (Tiehm et al. 2008).

Im Gegensatz zur anaeroben Dechlorierung nimmt die Tendenz zur aerob-metabolischen Umsetzung aufgrund des zunehmend reduzierten Charakters der Verbindungen mit abnehmender Chloratomzahl zu (Bradley 2003). So ist der aerob-produktive Abbau der niedherchlorierten Verbindungen VC und cDCE weitgehend bekannt (Coleman et al. 2002a, 2002b; Schmidt et al. 2010). Für TCE wurde der Abbauweg bisher an einem Standort beobachtet (Schmidt et al. 2014) und anschließend für verschiedene Umweltbedingungen untersucht (Gaza et al. 2019). Außerdem wurden Versuche unternommen, die abbauaktiven Mikroorganismen zu identifizieren. Aus dem Standortgrundwasser wurde eine abbauaktive Mischkultur angereichert und daraus Reinkulturen isoliert. Diese zeigten jedoch keine Abbaufähigkeit, so dass darauf geschlossen wurde, dass der aerob-metabolische TCE-Abbau durch verschiedene Bakterien der Mischkultur vollzogen wird (Gaza 2015).

2.3 Biologische Sanierung von Chlorethenen

2.3.1 Anaerobe Verfahren

Unter den verschiedenen Abbaumechanismen von Chlorethenen ist die anaerobe Dechlorierung am längsten bekannt und stellt außerdem den einzigen Prozess dar, durch den alle Verbindungen der Stoffgruppe, insbesondere auch das hochchlorierte PCE, mikrobiologisch umgesetzt werden können. Dementsprechend finden sich hier auch die häufigsten Anwendungsbeispiele und Methoden zur Biostimulierung sowie zur Bioaugmentation sind bereits etabliert (Frascari et al. 2015; Lyon und Vogel 2013; McCarty 1993).

Die Stimulierung des anaeroben Chlorethenabbaus erfolgt durch die Zugabe von Auxiliarsubstraten als Elektronendonatoren in den Untergrund. Dabei handelt es sich um organische Verbindungen wie Laktat, Methanol, Ethanol, Propionat oder Butyrat. Fermentierende Bakterien setzen die Substrate in die primären Elektronendonatoren Acetat oder Wasserstoff um, die dann von den dechlorierenden Mikroorganismen für den Abbau genutzt werden (Frascari et al. 2015; Xiao et al. 2020). Zur Bioaugmentation liegen zahlreiche Anwendungsbeispiele mit Anreicherungs- und im Handel erwerblichen Kulturen vor, die sowohl in Laborversuchen als auch in Feldstudien erfolgreich eingesetzt wurden (Kane et al. 2005; Li et al. 2021a; Schaefer et al. 2017; Schaefer et al. 2010; Schaefer et al. 2007). Das Inokulum liegt dabei meist in flüssiger Form vor und wird direkt in den Untergrund injiziert (Lyon und Vogel 2013). Durch Bioaugmentation kann die vollständige Dechlorierung angeregt (Ellis et al. 2000; Major et al. 2002) oder der Abbau beschleunigt werden (Hood et al. 2008).

In der Praxis birgt die Stimulierung des anaeroben Chlorethenabbaus jedoch auch erhebliche Nachteile (Abbildung 9). Eine vollständige Dechlorierung erfolgt nur bei Anwesenheit von Bakterien der Gattung *Dehalococcoides*, die sehr sauerstoffempfindlich sind, so dass der Abbau nur im strikt anaeroben Milieu erfolgt (Frascari et al. 2015). Hier treten Konkurrenzreaktionen wie die Sulfatreduktion und Methanogenese auf, die zur Bildung toxischer Metabolite führen und das Grundwasser belasten. Die Zugabe großer Mengen organischer Substanzen als Auxiliarsubstrate zur Stimulierung sowie ihre Fermentationsprodukte beeinträchtigen die Grundwasserqualität zusätzlich (Aulenta et al. 2006; Aulenta et al. 2007). Oft stagniert der Abbau bei den toxischen Zwischenprodukten cDCE und VC. Auch Ethen steht im Verdacht kanzerogen zu wirken, so dass selbst bei einer vollständigen Dechlorierung nicht nur unbedenkliche Endprodukte entstehen (Tiehm und Schmidt 2011).

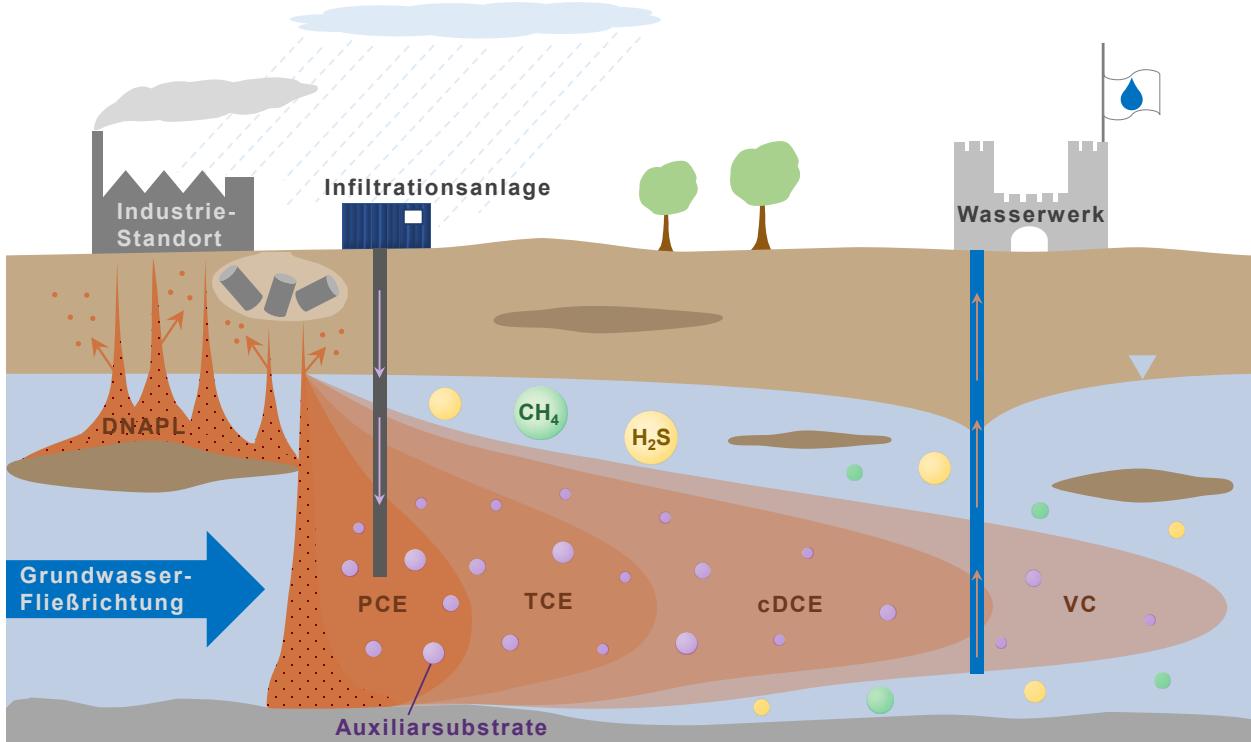


Abbildung 9: Nachteile der anaeroben Dechlorierung mit Injektion von Auxiliarsubstraten, Metabolitenbildung und Akkumulation der niederchlorierten Ethene cDCE und VC (eigene Darstellung)

2.3.2 Aerobe Verfahren

Aerobe Sanierungsverfahren setzen die Versorgung mit ausreichend Sauerstoff als Elektronenakzeptor für den Abbau voraus. Dieser ist in Wasser nur begrenzt löslich und in kontaminierten Grundwasserleitern meist gezehrt, so dass anoxische Verhältnisse herrschen (Jørgensen 2007). Die Anreicherung kann durch Injektion von Sauerstoff oder Sauerstoff-freisetzenden Verbindungen wie Wasserstoff- oder Magnesiumperoxid erfolgen (Farhadian et al. 2008).

Zur Nutzung des aerob co-metabolischen Abbaus ist außerdem die Anwesenheit von ausreichenden Konzentrationen eines Wachstumssubstrats notwendig, mit dem die Schadstoffe umgesetzt werden. Im günstigsten Fall liegen diese auf natürliche Weise vor, z.B. wenn das in der anaeroben Zone eines CKW-Schadens gebildete Methan am aeroben Fahnenrand stromabwärts als Primärsubstrat für den co-metabolischen Abbau der Zwischenprodukte cDCE und VC genutzt werden kann (Verce et al. 2000). Meist ist jedoch die Zugabe von Auxiliarsubstraten als Wachs-

tumssubstrate notwendig, um den Abbau anzuregen. Zahlreiche Anwendungen zeigen eine erfolgreiche Umsetzung der Stimulierung im Feld (Frascari et al. 2015; Semprini 1997). Zur Bioaugmentation liegen wesentlich weniger Studien aus dem Labor (Balba et al. 2008; Duba et al. 1996; Li et al. 2021b) und im Pilotfeldmaßstab vor (Duba et al. 1996; Steffan et al. 1999).

Die Zugabe organischer Substanzen und die Bildung toxischer Metabolite belastet jedoch auch bei diesem Verfahren das Grundwasser zusätzlich. Außerdem können die Oxidationsprodukte den weiteren Abbau durch Enzymaktivierung hemmen. Hinzu kommt die Konkurrenz zwischen den Schadstoffen und den Wachstumssubstraten sowohl um die für den Abbau verantwortlichen Enzyme als auch um den begrenzt löslichen Sauerstoff. Bei der Aerobisierung von anaeroben Aquiferen ist eine weitere Sauerstoffzehrung durch andere reduziert vorliegende Spezies wie Eisen- und Manganverbindungen oder Sulfiden zu berücksichtigen. Diese werden zunächst aufoxidiert und je nach Konzentration im Grundwasser können die Oxidationsprodukte vor allem im Bereich der Injektionsbrunnen zu Verblockungen führen (Dolinová et al. 2017; Tiehm und Schmidt 2011). Dazu kann auch ein übermäßiges Biomassewachstum beitragen, das zwar allgemein für aerobe Verfahren besteht, aber bei co-metabolischen Prozessen durch die hohe Verfügbarkeit von organischer Substanz wesentlich höher ist. Für die Schadstoffeliminierung muss je nach Wachstumssubstrat etwa das Zehn- bis Hundertfache der Schadstoffmenge zugegeben werden, was ein entsprechendes Biomassewachstum nach sich zieht (Frascari et al. 2015).

Dagegen besteht beim aerob-produktiven Chlorethenabbau ohne die notwendige Zugabe von Auxiliarsubstraten keine Konkurrenz um den verfügbaren Sauerstoff und die abbauaktiven Enzyme. Es werden keine Metabolite gebildet und das Grundwasser wird deutlich geringer beeinflusst (Abbildung 10) (Tiehm und Schmidt 2011). Während die Stimulierung des produktiven Abbaus mit Sauerstoff für andere Schadstoffe wie aerob gut abbaubare Mineralölkohlenwasserstoffe häufig angewendet wird (Farhadian et al. 2008; Wilson 2003), liegt für Chlorethene bisher nur eine Feldstudie zum Abbau von VC vor (Davis et al. 2009). Zur Bioaugmentation wurden vereinzelte Laboruntersuchungen zum Abbau von VC (Fathepure et al. 2005) sowie cDCE und tDCE veröffentlicht (Olaniran et al. 2006). Für TCE haben orientierende Untersuchungen mit einer Anreicherungskultur des Standortes, an dem der Abbauweg erstmals beobachtet wurde, das Bioaugmentationspotential anhand von zwei kontaminierten Grundwasserproben ohne intrinsisches Abbaupotential exemplarisch aufgezeigt (Gaza et al. 2019).

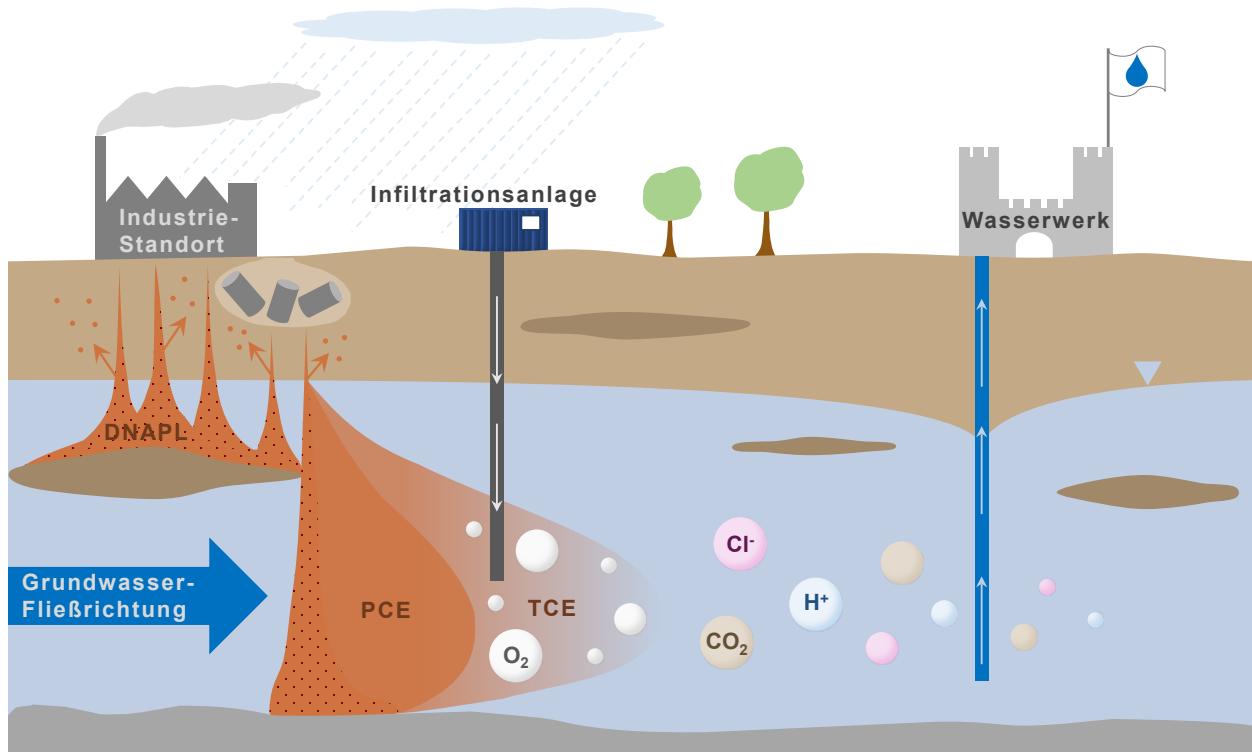


Abbildung 10: Aerob-produktiver Abbau und Schadstoffeliminierung ohne unerwünschte Nebenreaktionen und Metabolite (eigene Darstellung)

2.3.3 Sequentiell anaerob-aerobe Verfahren

Die Nachteile von anaeroben Verfahren wie die Sauerstoffempfindlichkeit der zur vollständigen Dechlorierung befähigten Bakterien und die Bildung von toxischen Zwischen- und Endprodukten führten zum Ansatz des sequentiell anaerob-aeroben Abbaus. Dabei werden die hochchlorierten Ethene zunächst unter anaeroben Bedingungen bis cDCE reduziert. Hierfür ist das Vorhandensein der deutlich robusteren und weiter verbreiteten Bakterien, die PCE bis cDCE umsetzen können, ausreichend. Anschließend werden die niederchlorierten Ethene in einer aeroben Stufe mineralisiert (Schmidt & Tiehm 2011).

Der sequentiell anaerob-aerobe Abbau wurde bisher an einem Standort auf natürliche Weise beobachtet. Dort werden PCE und TCE unter anaeroben Bedingungen reduktiv hauptsächlich zu cDCE abgebaut. Die weitere Dechlorierung bis zu VC beschränkt sich auf eine stark anaerobe Zone der Schadstofffahne während in den flachen Teilen aerobe Bedingungen herrschen und die

Zwischenprodukte auch mit niedrigen Sauerstoffkonzentrationen mineralisiert werden (Schmidt und Tiehm 2008).

Die Stimulierung des sequentiellen anaerob-aeroben Abbaus durch die Zugabe von Elektronendonatoren in der anaeroben Stufe und Sauerstoff bzw. Wasserstoffperoxid in der aeroben Stufe sowie teils auch einer abbaufähigen Kultur wurde in verschiedenen Laborversuchen erfolgreich umgesetzt (Chang et al. 2017; Li et al. 2021a; Lohner et al. 2011). Feldstudien zeigen, dass die Anwendung nicht nur für Kontaminationen mit PCE vorteilhaft ist, welches nur im ersten Schritt der anaeroben Dechlorierung mikrobiologisch umgesetzt werden kann. Die Anregung des sequentiellen Abbaus stellt sich auch als geeignete Lösung für Standorte dar, die mit Schadstoffgemischen verunreinigt sind und neben PCE auch Komponenten beinhalten, die besser aerob umsetzbar sind, wie z.B. Monoaromaten (Beeman und Bleckmann 2002; Devlin et al. 2004).

2.4 Biologische Nachweismethoden

2.4.1 Most Probable Number (MPN)

Anhand einer mikrobiellen Bestandsaufnahme können die biologische Aktivität und die ablaufenden Abbauprozesse im Grundwasser erfasst und bewertet werden. Eine Methode zum Nachweis und zur Quantifizierung von Mikroorganismen mittels Keimzahlbestimmung stellt das Most Probable Number-Verfahren (MPN) dar (Clarke und Owens 1983). Die Methode weist niedrige Nachweisgrenzen auf, ist jedoch vergleichsweise zeitaufwändig mit Inkubationszeiten von mehreren Wochen.

Das Untersuchungsprinzip ist zusammenfassend in Abbildung 11 dargestellt. Dabei wird eine dezimale Verdünnungsreihe der Proben auf Mikrotiterplatten angelegt und die Stufe ermittelt, in der noch keimfähige Mikroorganismen vorhanden sind. Je nach Verfahren mit Verwendung eines speziellen Nährmediums zur Inkubation ist die Bestimmung der Gesamtkeimzahl oder spezifischer stoffwechselphysiologischer Gruppen möglich. Für den Nachweis bestimmter Schadstoffverwerter sind optimale Wachstumsbedingungen für die entsprechenden Organismen und die Verfügbarkeit des betreffenden Substrats als alleinige Energie- und Kohlenstoffquelle erforderlich. So wird sichergestellt, dass sich nur die Schadstoffverwerter vermehren während Bakterien ohne die Fähigkeit zum Schadstoffabbau und geeignetes Wachstumssubstrat ihren Stoffwechsel einstellen (Johnsen 2017).

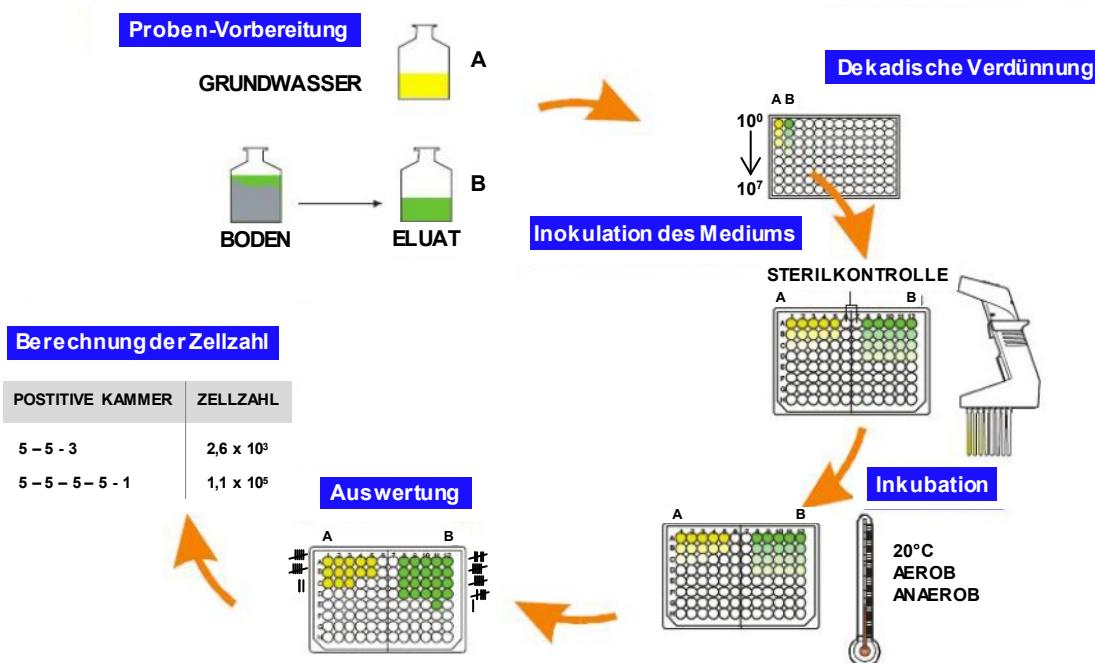


Abbildung 11: Versuchsschema des Most-Probable-Number-Verfahrens (Michels et al. 2008)

Für jede der acht Verdünnungsstufen werden fünf Proben und eine Sterilkontrolle angesetzt. Nach einer spezifischen Inkubationszeit werden die Röhrchen gezählt, in der sich Mikroorganismen entwickelt haben. Von der Auszählung der keimfähigen Proben in jeder Verdünnungsstufe wird mittels eines statistischen EDV-Programms basierend auf einer Poisson-Verteilung auf die Keimzahl in der unverdünnten Probe geschlossen (Michels et al. 2008). Bei langsam wachsenden Bakterien ist das Wachstum in der Probe anhand der Trübung schwer zu erkennen. Für einen deutlicheren Nachweis können Farbstoffe wie z.B. Resazurin, was auch in dem in dieser Arbeit verwendeten Reagenz PrestoBlue® enthalten ist, zugegeben werden. Dieser wird von lebenden Zellen reduziert und verursacht so einen Farbumschlag von blau nach pink, so dass die Röhrchen mit Bakterienwachstum eindeutig erkennbar sind (Guerin et al. 2001).

2.4.2 Polymerase Kettenreaktion (PCR)

Im Vergleich zu Kulturverfahren stellt die molekularbiologische PCR-Methode (Polymerase Chain Reaction) einen schnellen und spezifischen Nachweis der am Abbau beteiligten Mikroorganismen und Enzymen dar. Das Messprinzip ist in Abbildung 12 dargestellt und besteht in der Amplifizierung einer spezifischen DNA-Sequenz in mehreren Zyklen. In einem ersten Schritt werden die DNA-Strände erhitzt und dabei in zwei Einzelstrände aufgebrochen (Denaturierung). In einem

zweiten Schritt lagern sich komplementäre Oligonukleotid-Sequenzen (Primer) jeweils an den Anfang und das Ende der zu vervielfältigenden Sequenz an (Annealing). Von diesen Primern ausgehend füllt das Enzym Polymerase den Einzelstrang mit Nukleotiden, die im Überschuss zugegeben werden, wieder auf und synthetisiert somit zwei neue DNA-Doppelstränge (Extension), die den Ausgangspunkt des nächsten Zyklus bilden. Dies führt zu einer exponentiellen Anhäufung der Zielsequenz (White et al. 1989).

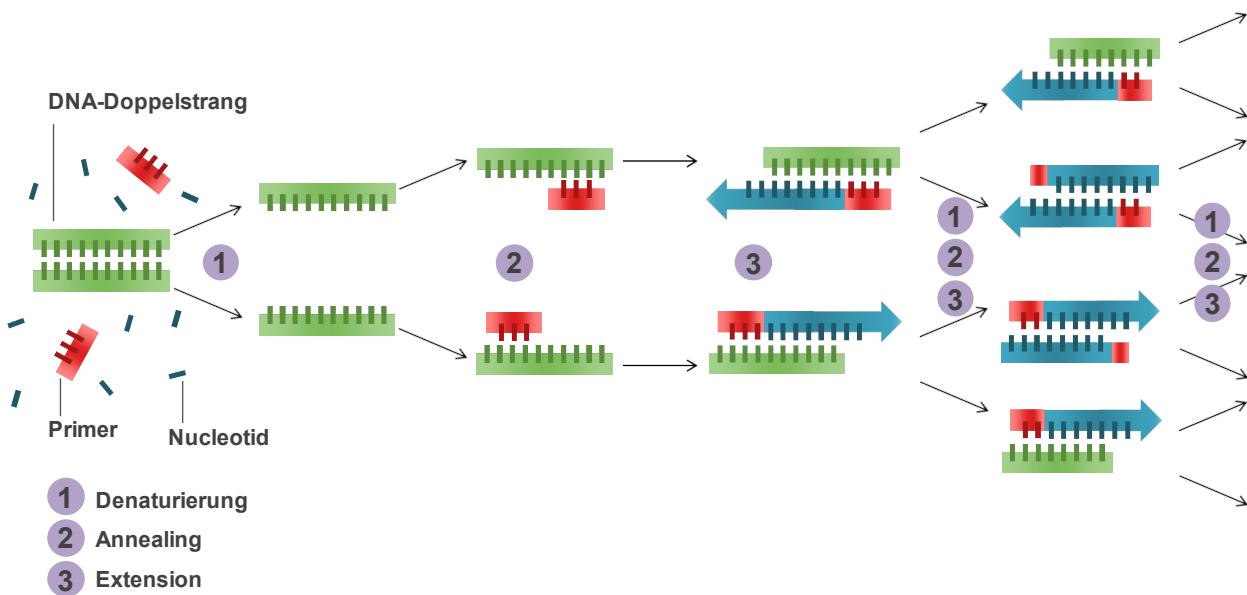


Abbildung 12: Schema der Polymerase-Kettenreaktion (PCR), in Anlehnung an Bell (1989)

Die quantitative Anwendung des Verfahrens erfolgt über die Zugabe eines Fluoreszenz-Farbstoffs, der in die neu gebildete DNA interkaliert, und die Messung der Amplifikation anhand des Fluoreszenzsignals in Echtzeit (quantitative oder real time PCR – qPCR). Die erforderlichen Zyklen bis zu einem bestimmten Schwellenwert des Signals (cycle threshold – C_t -Wert) werden mit Standards bekannter Konzentration verglichen und über eine Kalibriergerade die Konzentration in der gemessenen Probe ermittelt (Kubista et al. 2006).

Die Spezifität des Verfahrens hängt von den verwendeten Primern sowie der Temperatur und der Zeit von Annealing und Extension ab, wobei jedes Primerpaar seine eigenen optimalen Bedingungen bzw. spezifischen Temperaturen aufweist (Bell 1989). Eine Zusammenstellung der in der Literatur beschriebenen Primer zum Nachweis von Genen, die mit dem mikrobiologischen Chloräthen-Abbau verbunden werden, befindet sich bei Dolinová et al. (2017).

3 Material und Methoden

Die Laborarbeiten wurden, sofern nicht anders vermerkt, in der Abteilung Wassermikrobiologie des DVGW-Technologiezentrums Wasser (TZW) durchgeführt. Die PCR-Versuche (Methodenentwicklung und Messungen) wurden im Rahmen des Partnerprojekts BioChlor (siehe Kapitel 1.1) durchgeführt und die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zur Verfügung gestellt. Die verwendeten Chemikalien in „zur Analyse“-Qualität stammen von Merck. Verwendete Geräte und weitere Materialien werden im Text spezifiziert.

3.1 Anreicherungskultur und Medium

Bei der verwendeten Kultur handelt es sich um die von Gaza et al. (2019) beschriebene Mischkultur, die TCE aerob-metabolisch umsetzt. Diese wurde aus Grundwasserproben des Standortes, an dem der Abbauweg erstmals auf natürliche Weise beobachtet und nachgewiesen wurde, in Mineralmedium angereichert wie von Schmidt et al. (2014) beschrieben.

Tabelle 2: Zusammensetzung des Mineralmediums

Substanz:	Einwaage
H ₂ O demin.	1 L
K ₂ HPO ₄ x 3 H ₂ O	1,05 g
KH ₂ PO ₄	0,2 g
NaNO ₃	0,17 g
MgSO ₄ x 7 H ₂ O	0,04 g
CaSO ₄ x 2 H ₂ O	0,023 g
Spurenelementlösung	2 mL
Das Medium wurde mit H ₃ PO ₄ bzw. NaOH auf einen pH-Wert von 7,2 ± 0,2 eingestellt und 20 min bei 121 °C autoklaviert.	

Tabelle 3: Zusammensetzung der Spurenelementlösung

Substanz:	Einwaage
H ₂ O demin.	1 L
ZnSO ₄ x 7 H ₂ O	10 mg
FeSO ₄ x 7 H ₂ O	200 mg
MnCl ₂ x 4 H ₂ O	3 mg
H ₃ BO ₄	30 mg
CoCl ₂ x 6 H ₂ O	20 mg
CuSO ₄ x 2 H ₂ O	10 mg
NiCl ₂ x 6 H ₂ O	6 mg
Na ₂ MoO ₄ x 2 H ₂ O	3 mg
H ₃ PO ₄ konzentriert	2 mL
Die Spurenelementlösung wurde 20 min bei 121°C autoklaviert.	

Die Zusammensetzung des Mediums ist in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgelistet und frei von allen bekannten Auxiliarsubstraten, um einen co-metabolischen Abbau ausschließen zu können. Insbesondere wird Stickstoff als Nitratverbindung und nicht als Ammonium zur Verfügung gestellt.

Als Kohlenstoffquelle wurde ausschließlich TCE zudosiert. Außerdem sind keine Chlorsalze enthalten, so dass die Bilanzierung und der Nachweis einer produktiven Umsetzung anhand der beim Abbau stöchiometrischen Chloridbildung möglich ist.

Die Mischkultur wurde zum einen als Flüssigkultur in Batchflaschen (SV1 bis SV6) gepflegt (Abbildung 13, links) und zum anderen in Kreislaufsaulen auf Quarzsand immobilisiert (Abbildung 13, rechts) wie von Gaza et al. (2019) beschrieben. Die Abbaufähigkeit wurde anhand des TCE-Rückgangs und der damit verbundenen stöchiometrischen Chloridbildung überwacht. Bei jeder Probenahme wurde das entnommene Volumen durch den Zutritt von Umgebungsluft ausgetauscht, wodurch Sauerstoff in das System getragen wurde und für den Abbau in ausreichender Menge zur Verfügung stand. Nach Bedarf wurde TCE dosiert und die Batchflaschen bzw. Vorratsflaschen der Säulen mit frischem Medium aufgefüllt, wodurch ebenfalls Luftsauerstoff eingetragen wurde.



Abbildung 13: Anreicherungskultur flüssig in Mineralmedium (links) und immobilisiert auf Quarzsand in Kleinsäulen (rechts)

Für die Mikrokosmenversuche wurden sowohl die Flüssigkultur als auch der bewachsene Quarzsand als Inokulum verwendet (siehe Kapitel 3.3.3). Außerdem wurden im Zuge der Kultivierung Proben zur Entwicklung der Biomonitoringmethoden entnommen. Für die Weiterentwicklung der MPN-Methode (siehe Kapitel 3.4.1.3) wurden die Flüssigkulturen SV1, SV2, SV3 und SV4 beprobt. Für die Entwicklung der PCR-Methode (siehe Kapitel 3.4.2.1) und Validierung der Biomonitoringmethoden (siehe Kapitel 3.4.3.2) wurden außerdem die Flüssigkulturen SV5 und SV6 herangezogen. Zur Identifizierung der am aerob-produktiven TCE-Abbau beteiligten Mikroorganismen wurden dem Partnerprojekt BioChlor (siehe Kapitel 1.1) weiterhin Quarzsandproben sowie Proben aus dem Zulauf der Kleinsäulen zur Verfügung gestellt. Zu diesem Zweck wurden auch die Flocken beprobt, die sich während der Kultivierung gebildet haben und am Boden der Batch- und Säulenvorratsflaschen mit dem Auge erkennbar waren (siehe Kapitel 4.1.2).

3.2 Analytische Methoden

3.2.1 Elektrodenmessungen

Die Messung von pH-Wert, Temperatur und Sauerstoffgehalt diente zur Erfassung der Milieubedingungen sowie der Sicherstellung von aeroben Verhältnissen mit ausreichenden Sauerstoffkonzentrationen für den Abbau.

Der pH-Wert und die Temperatur wurden mit dem Messgerät Multi pH320 und der Elektrode SenTix 41 der Firma WTW erfasst. Die Sauerstoffmessung erfolgte mit dem Messgerät Multi 350i und der Elektrode CellOx 325, ebenfalls von der Firma WTW.

3.2.2 Ionenchromatographie

Die Anionen Chlorid, Nitrat, Nitrit und Sulfat wurden mittels Ionenchromatographie (IC) bestimmt. Die Messung diente vorrangig zur Erfassung der Chloridkonzentration, um den Abbau mit der verbundenen Chloridbildung bilanzieren und eine vollständige Mineralisierung nachweisen zu können.

Die Proben wurden vorbereitend durch einen Membranfilter mit 0,2 µm Porenweite genommen und mit Reinstwasser 1:2 verdünnt. Für die Messung diente das Gerät 761 Compact IC mit Leitfähigkeitsdetektor und der Autosampler 813 Compact von Metrohm. Tabelle 4 beinhaltet die entsprechenden Kenndaten und Betriebsbedingungen. Die Bestimmungsgrenzen lagen bei 2 mg/L.

Tabelle 4: Betriebsbedingungen und Kennzahlen der IC

Ionenchromatograph	Metrohm 761 Compact IC
Trennsäule	Metrosep A Supp 5 (150mm Länge, 4 mm Durchmesser)
Injektionsvolumen	20 µL
Durchfluss	0,7 mL/min
Eluent	4 mmol/L Na ₂ CO ₃ / 1.25 mmol/L NaHCO ₃ , 2 % Aceton
Suppressor	Metrohm Suppressor Modul (MSM)
Regenerant	H ₂ SO ₄ (0,1 %-ig)

3.2.3 Gelöster organischer Kohlenstoff

In Hinblick auf weitere mögliche Kohlenstoffquellen und die Bildung von Zwischenprodukten wurde als Summenparameter für alle in der Wasserprobe gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen der gelöste organische Kohlenstoff (dissolved organic carbon – DOC) herangezogen.

Für die Messung mit dem Analysegerät Vario TOC Tube von Elementar Analysesysteme GmbH wurde bei der Probenahme zunächst der partikuläre organische Kohlenstoff durch einen Membranfilter mit 0,45 µm Porenweite abgetrennt. Durch das Ansäuern der Probe mit zwei Tropfen halbverdünnter Salzsäure wird diese zum einen stabilisiert und der mikrobiologische Abbau unterdrückt. Zum anderen wird das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht zum Kohlenstoffdioxid verschoben, welches zusammen mit leichtflüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen im Luftstrom ausgast, die in dieser Methode nicht vollständig miterfasst werden. Die Bestimmungsgrenze lag bei 0,2 mg/L.

3.2.4 Gaschromatographie

Zur Quantifizierung der Schadstoffminderung wurden die Chlorethene und Ethen mittels Head-space-Gaschromatographie (GC) gekoppelt mit einem Flammenionisations- (FID) und Elektroneneinfangdetektor (ECD) gemessen. Hierfür wurde das GC-System 7890A mit dem Autosampler G1888 von Agilent Technologies verwendet. Die Komponenten und Betriebskennzahlen finden sich in Tabelle 5.

Es wurden jeweils Doppelbestimmungen durchgeführt und hierfür zwei Gläschchen mit 5 mL Probe abgefüllt. Zuvor wurden zwei Tropfen konzentrierte Phosphorsäure zur Stabilisierung und Abstopfung der biologischen Aktivität vorgelegt. Bei der Messung wurden Kontrollstandards mitgeführt. Die Auswertung erfolgte je nach Konzentrationsbereich mit der Bestimmung des FID oder ECD über eine Mehrpunktikalibrierung mit externen Standards. Für das Messergebnis wurde der Mittelwert der Doppelbestimmung gebildet und bei einer Standardabweichung von über 20 % der höhere Wert angenommen. Die Bestimmungsgrenzen betrugen 0,06 mg/L für Ethen, 0,12 mg/L für VC, 0,02 mg/L für cDCE und 0,0002 mg/L für TCE und PCE.

Tabelle 5: Komponenten und Analyseparameter des GC-Systems

Gaschromatograph	7890A GC-System, Agilent Technologies
Autosampler	1888 Network Headspace-Sampler, Agilent Technologies
Probenahmgefäß	Headspace vial 10 mL, flatbottom, Agilent Technologies
Deckel	Verschlüsse (Alu), Butylgummi/PTFE Pharmafix 3x10 mm, A-Z Analytik-Zubehör GmbH
Injectiōn	Split 1:15, 24 mL/min, Vorheizen: 70°C, 60 min
Injectiōnvolumen	1 mL
Injectiōndruck/-temperatur	287 kPa/180°C
Trägergas	Helium
Säulenfluss/-druck	1,6 mL/min, 186,99 kPa
Säule	Kapillarsäule Pona, Hewlett Packard, 50 m Länge, 200 µm Durchmesser, 0,5 µm Filmdicke
Ofentemperaturprogramm	<ul style="list-style-type: none"> • 30°C (7 min) • 1,5°C/min auf 60°C (12 s) • 15°C/min auf 200°C (7 min)
FID-Temperatur	250°C
ECD-Temperatur	300°C

3.3 Mikrokosmen

Labor-Mikrokosmenversuche dienen zur Identifizierung mikrobiologischer Abbauprozesse in repräsentativen Proben eines Grundwasserleiters, um ein Verständnis für die Verhältnisse und das Abbaupotential am Standort zu gewinnen und auf den Grundwasserleiter als Ganzes zu schließen. Zur Untersuchung des intrinsischen Abbaupotentials sowie des Stimulierungspotentials mittels Bioaugmentation wurden in vorliegender Arbeit Mikrokosmenversuche mit Grundwasser in Batchflaschen durchgeführt.

3.3.1 Probenahmestandorte

Die Grundwasserproben für die Untersuchung des aerob-produktiven TCE-Abbaus in Mikrokosmen stammen von insgesamt sieben Standorten, die mit Chlorethenen belastet sind (Abbildung 14). Die genauen Standorte dürfen aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht veröffentlicht oder näher beschrieben werden, so dass nachfolgend nur auf die jeweilige Grundwasserkontamination und bisherigen Sanierungsstrategien eingegangen wird.

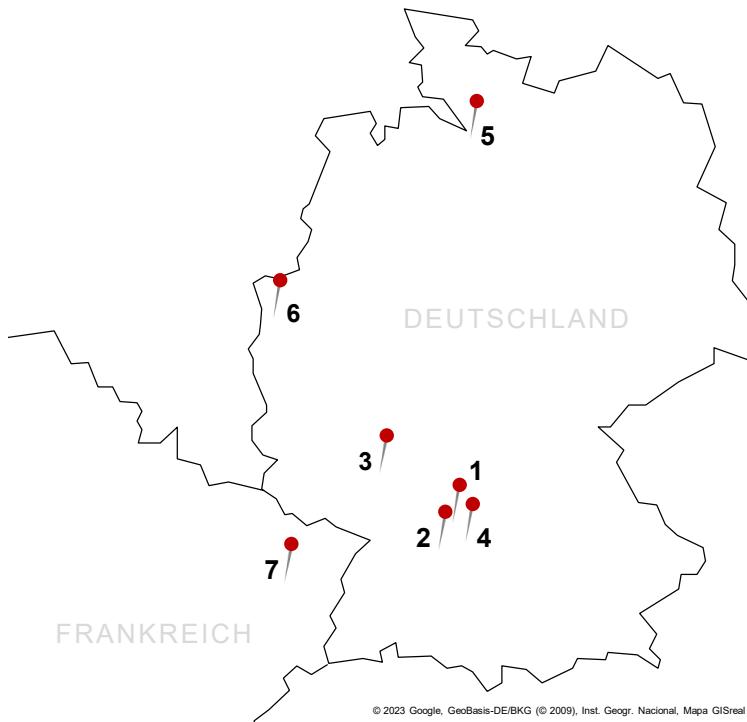


Abbildung 14:
Geographische Verteilung der untersuchten Standorte

3.3.1.1 Standort 1

Standort 1 befindet sich im Südwesten von Deutschland im Raum Stuttgart. Die Verunreinigung des Grundwassers mit hauptsächlich TCE geht auf eine Produktionsstätte für Bodenbeläge zurück und ist seit den frühen 1980er Jahren bekannt. Die Schadstofffahne erstreckt sich über die geologische Formation des Lettenkeupers und wurde bereits durch eine in-situ chemische Oxidation (ISCO), bei der die Schadstoffe durch Zugabe eines starken Oxidationsmittels chemisch auf-oxidiert werden, sowie einer Pump-and-Treat-Maßnahme behandelt. Seitdem wird der natürliche Schadstoffrückgang der Restkontamination überwacht. Für die vorliegende Arbeit wurde die Messstelle B23 im Abstrom des Schadensherdbereichs beprobt.

3.3.1.2 Standort 2

Standort 2 liegt ebenfalls im Raum Stuttgart, wo der Grundwasserschaden durch einen Chemikaliengroßhandel sowie ein Aluminiumschmelzwerk verursacht wurde. Der Untergrund ist hier nicht nur mit chlorierten, sondern auch mit Braunkohleteer-stämmigen polzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) verunreinigt. Die Kontamination befindet sich hauptsächlich in der Gipsschicht des Unteren Gipskeupers, erreicht aber auch den Lettenkeuper. Am Standort wurde eine hydraulische (Pump-and-Treat) sowie eine biologische Sanierung durchgeführt, bei der der anaerobe Abbau durch Melassezugabe stimuliert werden sollte, jedoch zu einer erhöhten Mobilität

der Schadstoffe geführt hat. Für die Mikrokosmen-Versuche wurden die Messstellen B17 in der Nähe des Schadensherdes mit einer Tiefe in den Gipskeuper sowie die Messstelle GWM9 im Abstrom, die bis in den Lettenkeuper abteuft, beprobt.

3.3.1.3 Standort 3

Standort 3 umfasst eine seit den 1990er Jahren bekannte großflächige CKW-Grundwasserverunreinigung im Raum Mannheim, die von verschiedenen metallverarbeitenden Betrieben und chemischen Reinigungen stammt und mehrere Schadensherdbereiche aufweist. Niederterassensedimente bilden den oberen Grundwasserleiter, der vom unteren Quartär durch eine grundwasserstauende Zwischenschicht getrennt ist. Am Standort wurde ein Pump-and-Treat-Verfahren durchgeführt und das mikrobiologische Abbaupotential der reduktiven Dechlorierung sowie des aeroben metabolischen cDCE- und VC-Abbaus nachgewiesen (Schmidt und Tiehm 2008). Zur Untersuchung des aerob-metabolischen TCE-Abbaus wurde die Messstelle BP35 beprobt.

3.3.1.4 Standort 4

Standort 4 befindet sich im Stadtgebiet Stuttgart auf dem Gelände eines ehemaligen Lager- und Umschlagplatzes für Chemikalien und Mineralölprodukte. Der Untergrund ist überwiegend mit CKW und untergeordnet mit Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW), der leichtflüchtigen monoaromatischen Schadstoffgruppe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) verunreinigt. Die grundwasserführenden Schichten werden am Standort unter einer mächtigen Deckschicht vom Gipskeuper und Oberen Muschelkalk gebildet. Seit 1986 wurden mehrere Sanierungsmaßnahmen durchgeführt, darunter Bodenluftabsaugung, hydraulische Sanierung, Bodenaushub und –austausch, jedoch verbleiben nach wie vor CKW-Restbelastungen. Zur Untersuchung des biologischen Abbaupotentials wurden vier Messstellen im Abstrom (GWM08/17, GWM11/17, GWM12/17 und GWM17/17) mit unterschiedlichen CKW-Gesamtkonzentrationen und –Verhältnissen beprobt.

3.3.1.5 Standort 5

Standort 5 liegt im Norden Deutschlands im Stadtgebiet Hamburg, wo seit den 1930er Jahren Pflege-, Reinigungs- und Bautenschutzmittel hergestellt wurden und der Untergrund mit CKW und BTEX-Verbindungen verunreinigt ist. Der kontaminierte Grundwasserleiter wird durch mittel bis gut durchlässige Sande gebildet, die in den Geschiebemergel eingelagert sind. Am Standort wurde bislang keine Sanierungsmaßnahme durchgeführt, bei der Fahnenerkundung und Sanierungsuntersuchung jedoch ein Rückgang der Schadstoffbelastung festgestellt, der auf eine biolo-

gische Abbauaktivität zurückgeführt werden kann. Um das Abbaupotential am Standort zu untersuchen, wurden drei Messstellen (GWM2981, GWM2983, GWM2984) mit unterschiedlichen Entfernungen zum Schadensherdbereich und entsprechenden Schadstoffkonzentrationen beprobt.

3.3.1.6 Standort 6

Standort 6 befindet sich im äußersten Westen Deutschlands am Niederrhein. Auf dem Gelände einer ehemaligen chemischen Reinigung ist es durch Handhabungsverluste und Leckagen zu einer CKW-Verunreinigung des Untergrunds mit PCE als Hauptkontaminante gekommen. Der Grundwasserleiter besteht aus quartären Mittel- und Grobsanden, in die Lagen von Kies und Feinsand eingeschaltet sind. Bisherige Sanierungsverfahren umfassen einen Bodenaustausch sowie eine ISCO-Maßnahme, mit der die Eintragsquelle beseitigt und der Schadstoffeintrag minimiert werden sollten. Für die Mikrokosmen-Versuche wurde die Messstelle B44M im weiteren Abstrom beprobt.

3.3.1.7 Standort 7

Standort 7 ist in Frankreich in der Nähe von Straßburg im Elsass verortet. Die Altlast geht auf einen metallverarbeitenden Betrieb zurück, der eine CKW-Verunreinigung des Untergrunds verursacht hat. Den Grundwasserleiter bilden quartäre Sande und Kiese auf Mergel. Als Sanierungsmaßnahmen wurden bereits eine Bodenluftabsaugung durchgeführt und das Grundwasser seitdem durch eine Pump-And-Treat-Anlage abgereinigt. Zur Untersuchung des mikrobiologischen Abbaupotentials wurde die Messstelle PZ13 im Abstrom beprobt.

3.3.2 Grundwasserproben

Die Grundwasserproben der insgesamt dreizehn Messstellen weisen unterschiedliche Schadstoffkonzentrationen und Chlorethen-Verhältnisse auf und decken damit einen breiten Konzentrationsbereich ab. Aufgrund der geographischen Verteilung der untersuchten Standorte unterscheiden sie sich auch in ihren Aquifereigenschaften, die mit den Startwerten der unbehandelten Proben in Tabelle 6 zusammengefasst sind.

Für die Mikrokosmenversuchsreihen wurden überwiegend Messstellen mit TCE als Hauptkontaminante ausgewählt. Ausnahmen bilden die Messstellen B17 von Standort 2, bei der der cDCE-Gehalt wesentlich höher liegt, sowie die Messstellen BP35 von Standort 3 und GWM12/17 von Standort 4, die geringfügig höhere cDCE-Konzentrationen aufweisen.

Die teils an den Standorten vorhandenen Begleitschadstoffe spielen eine untergeordnete Rolle mit zuletzt gemessenen Konzentrationen im Mikrogrammbereich, die im Vergleich zu den CKW-Konzentrationen geringfügig sind.

Die Grundwasserproben wurden von den jeweiligen Projektpartnern genommen und zur Verfügung gestellt. Die Probenahmen fanden zwischen November 2019 und November 2020 statt und erfolgten direkt in die gasdichten 2,3 L-Flaschen (an Standort 6 in 1,2 L-Flaschen) mit auf der Innenseite Polytetrafluoroethen-beschichteten Schraubverschlüssen und Probenahmeport, in denen anschließend die Mikrokosmen angesetzt wurden.

3.3.3 Versuchsreihen

Kurz nach der Grundwasserprobenahme wurden die Mikrokosmen mit einem Volumen von 2 L bzw. 1 L (Standort 6) angesetzt und die Proben bis dahin bei 4°C aufbewahrt. Die 300 mL bzw. 200 mL Gasraum enthielten Umgebungsluft, so dass jederzeit ausreichend Sauerstoff für den aeroben Abbau zur Verfügung stand. Je Messstelle wurden folgende Mikrokosmen angesetzt, die zur Übersicht in Tabelle 7 mit den nachfolgend in Klammern aufgeführten Bezeichnungen aufgelistet sind.

Eine Probe wurde unverändert belassen, um das intrinsische Abbaupotenzial zu untersuchen (GW). Jeweils eine Probe wurde mit Flüssigkultur (FK) und auf Quarzsand immobilisierten Kultur (QS) beimpft, um das Bioaugmentationspotenzial zu bewerten. Je nach verfügbarem Kulturvolumen zum Zeitpunkt des Ansatzes wurden den Mikrokosmen 150 bis 300 mL Flüssigkultur und 50 bis 300 g Quarzsand zugesetzt. Außerdem wurde als Sterilkontrolle in jeweils einen Ansatz 2 g/L Kupfersulfat gegeben um die Biozönose zu inaktivieren und abiotische Prozesse wie Verflüchtigung zu erfassen (St).

Bei den Proben von Standort 4 wurde außerdem ein Ansatz mit 1000 mL Grundwasser des Standortes, von dem die Anreicherungskultur stammt (SF-Wasser), angeimpft (SF). Alle bioaugmentierten Mikrokosmen von Standort 4 wurden doppelt angesetzt, wobei in den Doppelansatz direkt zu Versuchsstart anorganische Nährstoffe dosiert wurden (-ns). Auch die unbehandelten Ansätze der Standorte 5, 6 und 7 wurden doppelt mit einer Nährstoffzugabe bei Versuchsstart im zweiten Mikrokosmos angesetzt (NS). Für die Messstelle GWM2983 stand kein Doppelansatz zur Verfügung, daher wurde in den unbehandelten Mikrokosmos nach 84 d und erneut nach 210 d Nährstoffe zugegeben, um Nährstofflimitierung auszuschließen.

Tabelle 6: Startwerte der unbehandelten Grundwasserproben und Aquifereigenschaften

Standort	Startwerte der unbehandelten Grundwasserproben und Aquifereigenschaften																			
Messstelle	Einheit	BG	B23	GWM9	B17	BP35	GWM 08/17	GWM 11/17	GWM 12/17	GWM 17/17	GWM 2981	GWM 2983	GWM 2984	B44M	6	5	5	5	6	7
pH	-	-	7,1	7,1	6,7	7,2	6,8	7,0	6,9	6,9	6,7	6,9	6,4	6,6	6,4	6,6	6,6	6,4	6,4	
O ₂	mg/L	-	6,0	0,05	0,020	0,37	0,11	0,087	0,081	0,010	0,40	0,60	0,40	0,12	0,12	1,0	1,0	1,0	1,0	
PCE	mg/L	0,0002	0,095	0,34	11	0,040	0,32	0,42	0,077	0,70	0,93	< BG	1,3	0,042	< BG					
TCE	mg/L	0,0002	0,037	0,61	58	0,28	14	13	2,1	22	29	0,036	41	0,32	1,0					
cDCE	mg/L	0,02	< BG	0,02	81	0,38	8,2	11	2,4	11	0,34	0,068	3,5	0,062	0,045					
VC	mg/L	0,12	< BG	12	< BG	0,41	0,73	0,13	0,32	0,15	< BG	0,66	< BG							
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	1,3	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG		
DOC	mg/L	0,2	0,63	0,48	16	3,3	5,2	6,5	3,6	4,6	9,3	4,6	11	1,5	1,5	1,3				
Cl ⁻	mg/L	2,0	112	214	1290	130	59	76	55	65	125	97	31	51	51	84				
NO ₂ ⁻	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG		
NO ₃ ⁻	mg/L	2,0	51	< BG	37	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	2,6	< BG	< BG	< BG	< BG	27	14			
SO ₄ ²⁻	mg/L	2,0	91	374	195	187	76	146	67	136	57	98	49	154	130					
Begleit-schadstoffe	µg/L				PAK 0,015	PAK 879						BTEX 52	BTEX 1,9	BTEX 21						
Grundwasserleiter			Kluft ^a	Kluft ^b	Poren ^d	Kluft ^{b,c}	Kluft ^{b,c}	Kluft ^{b,c}	Kluft ^{b,c}	Poren ^e	Poren ^d	Poren ^d	Poren ^d	Poren ^d						
BG		Bestimmungsgrenze																		

a, b, c, d, e (Geologie)
a: Lettenkeuper, b: Gipskeuper, c: Muschelkalk, d: Quartär, e: Sandrinne im Geschiebemergel

Tabelle 7: Mikrokosmen-Ansätze der untersuchten Grundwassermessstellen

Mikrokosmen	B23	GWM9	B17	BP35	GWM 08/17	GWM 11/17	GWM 12/17	GW	GW	GW, NS	GW	GWM 2981	GWM 2983	GWM 2984	B44M	B44M	B44M	PZ13
Intrins. Abbau	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW, NS	GW	GW	GW	GW, NS	GW	GW, NS	GW, NS	
Bioaugmentation																		
- mit Flüssigkultur	FK	FK	FK	FK	FK, FKns	FK, FKns	FK, FKns	FK										
- mit immobilisierter Kultur	QS	QS	QS	QS	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	QS, QSns	
- mit SF-Wasser	-	-	-	-	SF, SFns	SF, SFns	SF, SFns	SF, SFns	SF, SFns	SF, SFns	SF, SFns	-	-	-	-	-	-	
Sterilkontrolle	St	St	St	St	St	St	St	St	St	St	St	St	St	St	St	St	St	

Die Nährstoffzugabe diente zur Bedarfsdeckung von Stickstoff und Phosphor sowie von Spurenelementen für den aeroben Abbau. Die N- und P-Lösung, für die erneut Nitrat als Stickstoffquelle verwendet wurde (Tabelle 8), wurde steril filtriert und je nach CKW-Gehalt in die oben aufgelisteten Ansätze 5 bis 20 mL/L gegeben sowie 1 mL/L der Spurenelementlösung, die auch für das Medium verwendet wurde (Tabelle 3).

Tabelle 8: Zusammensetzung der Nährstofflösung

Substanz:	Einwaage
H ₂ O demin.	1 L
K ₂ HPO ₄ x 3 H ₂ O	0,07 g
NaNO ₃	0,26 g

Die Nährstofflösung wurde 20 min bei 121°C autoklaviert.

Für den Ansatz der Mikrokosmen wurde die entsprechende Probenmenge aus den Flaschen ausgeschüttet um nach Zugabe des Inokulums ein Volumen von 2 L bzw. 1 L (Standort 6) zu erhalten. Daraufhin wurden Nährstoffe steril filtriert und das Inokulum zugegeben. Die Aufbewahrung und Probenahme der Mikrokosmen wurde durchgeführt wie von Schmidt et al. (2014) beschrieben. Um einen fälschlicherweise beobachteten Abbau durch eine Verschleppung der abbauaktiven Kultur beim Ansatz oder während der Probenahme auszuschließen, wurde stets auf die folgende Reihenfolge geachtet: Von jeder Messstelle wurde zuerst der Ansatz ohne Inokulum behandelt, danach die beimpften Mikrokosmen und zuletzt die Sterilkontrolle (Abbildung 15). Vor der Beprobung der nächsten Messstelle wurde die verwendete Spritze gereinigt und zudem mit jeder Probe vorgespült. Die Verschleppung einer abbauaktiven Kultur aus den Ansätzen zuvor ist somit ausgeschlossen.

Das durchstochene Septum wurde nach der Probenahme zügig ausgetauscht, wobei das entnommene Volumen durch Umgebungsluft ersetzt und eine ausreichende Sauerstoffzufuhr für den aeroben Abbau gewährleistet wurde. Um einen möglichen Abbau schneller beobachten zu können, wurden die Mikrokosmen bei Raumtemperatur zwischen 18 und 25°C gelagert und einmal pro Woche sowie unmittelbar vor der Probenahme von Hand geschüttelt. Für aussagekräftigere Ergebnisse wurden die geringen TCE-Mengen in den Mikrokosmen der Messstellen B23 und GWM2983 auf 1 mg/L erhöht. Ebenso wurden die niedrigen cDCE-Konzentrationen in den Ansätzen der Messstellen B23 und GWM9 in die Größenordnung 0,3 mg/L aufdosiert. Um die Reproduzierbarkeit des biologischen Abbaus zu testen, wurde in alle Mikrokosmen mit einer beobachteten Konzentrationsabnahme TCE nachdosiert.

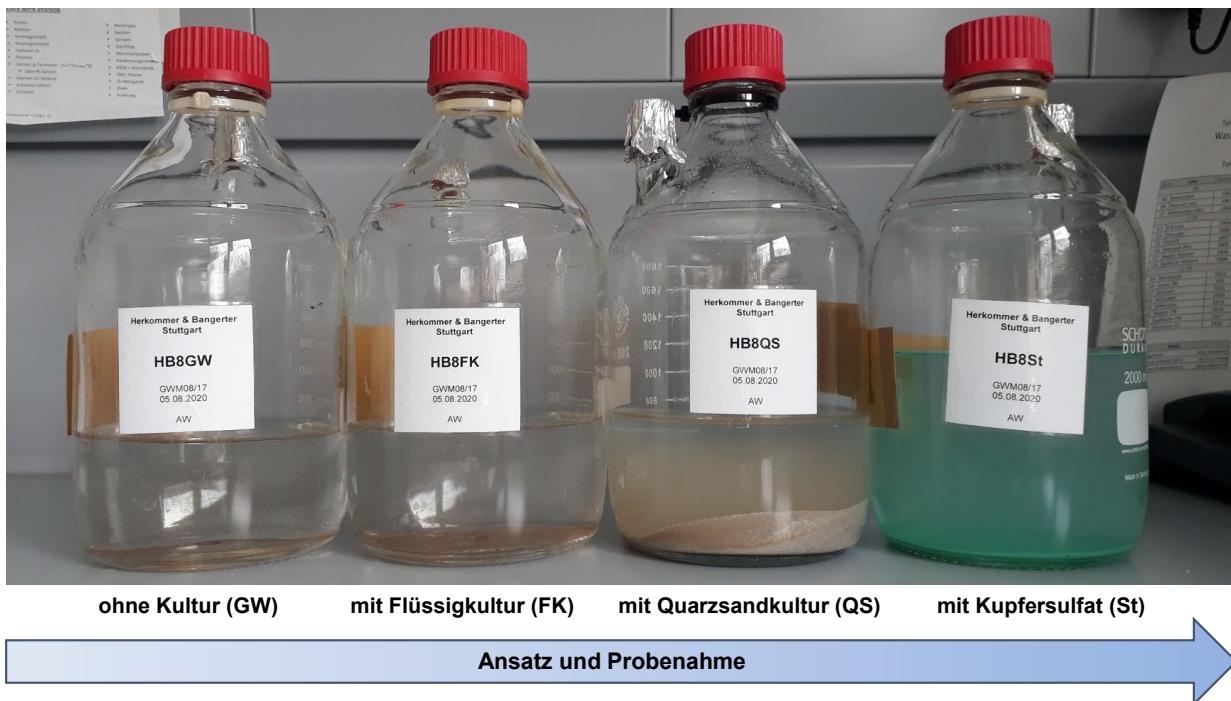


Abbildung 15: Mikrokosmen-Versuchsreihe einer Messstelle

Bei jeder Probenahme wurde zu Beginn der Sauerstoffgehalt, der pH-Wert und die Temperatur erfasst und anschließend die chemisch analytischen Parameter mit den in Kapitel 3.2 beschriebenen Methoden gemessen. Weiterhin wurden im Zuge der Mikrokosmenversuche Proben zur Entwicklung der Biomonitoringmethoden entnommen. Diese umfassten zum einen Proben aus abbauaktiven Mikrokosmen, die zur Weiterentwicklung der MPN-Methode (siehe Kapitel 3.4.1.3) verwendet wurden. Zum anderen wurden dem Partnerprojekt BioChlor (siehe Kapitel 1.1) Proben zur Entwicklung und Validierung einer PCR-basierten Nachweismethode für die TCE verwertenden Bakterien (siehe Kapitel 3.4.2 und 3.4.3) zur Verfügung gestellt.

3.4 Biomonitoringmethoden

3.4.1 Weiterentwicklung einer MPN-Methode

Mit einer spezifischen MPN-Methode können durch die Verwendung selektiver Nährmedien stoffwechselphysiologische Gruppen nachgewiesen und quantifiziert werden. In vorliegender Arbeit wurden die nachfolgend beschriebenen Versuche zur Entwicklung einer Methode durchgeführt, mit der die aerob TCE verwertenden Bakterien anhand des Kulturverfahrens und einer messtechnischen Auswertung nachgewiesen werden können.

Um nur das Wachstum von Mikroorganismen zu ermöglichen, die TCE aerob-produktiv umsetzen, erfolgte die Inkubation unter Sauerstoffatmosphäre und mit TCE als alleinige Kohlenstoffquelle. Aufgrund der Leichtflüchtigkeit von TCE wurden die Mikrotiterplatten im Exsikkator inkubiert. Zur Gewährleistung von optimalen Wachstumsbedingungen für die TCE-verwertenden Bakterien wurde sowohl für die Inkubation als auch für die Verdünnung das gleiche Mineralmedium verwendet, das auch zur Anreicherung der Kultur diente (siehe Kapitel 3.1).

3.4.1.1 Vorversuche zur Substratmenge

Die Zugabe von TCE gelöst im Medium ist für die Methode nicht zielführend, da das leichtflüchtige Substrat während des MPN-Ansatzes ausgast. Daher wurde TCE als Reinsubstanz in einem separaten Gläschen (GC-Gläschen, Tabelle 5) mit den Mikrotiterplatten in den Exsikkator gegeben. Nach Verflüchtigung löst sich die Verbindung in die flüssige Phase der Platten bis sich ein Konzentrationsgleichgewicht mit der Gasphase einstellt. Dieses ist von den Volumina der beiden Phasen abhängig und kann theoretisch mit Hilfe der Henry-Konstanten (Tabelle 1) errechnet werden:

$$H = \frac{c_{Gas}}{c_{Wasser}} \leftrightarrow c_{Gas} = c_{Wasser} \cdot H \quad (1)$$

$$m_{ges} = m_{Wasser} + m_{Gas} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &= V_{Wasser} \cdot c_{Wasser} + V_{Gas} \cdot c_{Gas} \\ &= V_{Wasser} \cdot c_{Wasser} + V_{Gas} \cdot c_{Wasser} \cdot H \quad (1) \text{ in (2)} \\ &= c_{Wasser} (V_{Wasser} + V_{Gas} \cdot H) \leftrightarrow \end{aligned}$$

$$c_{Wasser} = \frac{m_{ges}}{V_{Wasser} + V_{Gas} \cdot H} \quad (3)$$

H	Henry-Konstante	[\cdot]
c_{Wasser}, c_{Gas}	Konzentration in der Wasser- bzw. Gasphase	[mg/L]
V_{Wasser}, V_{Gas}	Volumen der Wasser- bzw. Gasphase	[L]
m_{ges}	Gesamtmasse	[mg]
m_{Wasser}, m_{Gas}	Masse in der Wasser- bzw. Gasphase	[mg]

Die Vorversuche dienten zur Ermittlung der genauen Menge, die sich in das Medium löst und den Mikroorganismen zur Verfügung steht.

Am TZW wird die Methode für cDCE mit einer Substratmenge von 250 µL angewendet, die zunächst auch für TCE verwendet wurde. Bei rechnerischer Prüfung resultierten hieraus sehr hohe Konzentrationen. Nachdem auch die analytischen Werte bei Zugabe von 250 µL TCE sehr hoch waren, wurde die Menge auf 1/5 reduziert und 50 µL Substratmenge getestet.

Hierfür wurden 96-Well-Mikrotiterplatten mit 300 µL Mineralmedium pro Röhrchen gefüllt, was dem Flüssigvolumen des MPN-Ansatzes entspricht. Zum Schutz vor Austrocknung der Platten wurden weitere 5 mL Medium in einem GC-Gläschen mit in den Exsikkator gegeben. Außerdem wurden zwei Exsikkator-Größen von 2,5 L und 5 L berücksichtigt. Je Größe wurden drei Exsikkatoren mit jeweils drei Platten (a, b, c) angesetzt, die nach einem Tag sowie ein, drei und sechs Wochen geöffnet wurden. Die Flüssigkeit in den Mikrotiterplatten wurde zügig entnommen und der TCE-Gehalt nach der in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Methode dreifach gemessen.

3.4.1.2 Vorversuche zur Inkubationszeit und Detektionsmethode

Nach den Vorversuchen zur Substratmenge wurden verschiedene Inkubationszeiten und in diesem Zuge auch unterschiedliche Auswertemethoden getestet.

Hierfür wurden MPN-Versuche mit vier abbauaktiven Flüssigkulturen (SV1-SV4) jeweils fünffach angesetzt und zwei, vier, sechs, acht und zehn Wochen inkubiert. In jedes Röhrchen wurden 270 µL Medium vorgelegt und 30 µL der jeweiligen Verdünnungsstufe zugegeben. In eine Reihe wurde als Blindwert keine Probe gegeben. Zur Inkubation wurden 50 µL TCE als Reinsubstanz und zum Schutz vor Austrocknung der Platten weitere 5 mL Medium jeweils in einem GC-Gläschen in den Exsikkator gegeben.

Das Bakterienwachstum wurde zum einen anhand der Trübung in den Röhrchen ausgewertet, die jedoch vor allem bei langsam wachsenden Bakterien schwach und schwer erkennbar ist. Für ein deutliches Wachstumsmerkmal anhand eines Farbumschlags wurde daher zum anderen das Reagenz PrestoBlue® verwendet, das bei aktiver Biomasse von blau nach pink umschlägt. Nach der Auswertung der Trübung wurde in jedes Röhrchen nach Herstellerangaben ein Tropfen (ca. 30 µL) PrestoBlue® gegeben und die Platten erneut inkubiert. Der Hersteller gibt eine Inkubationstemperatur von 37°C vor und empfiehlt für geringe Zellzahlen eine Einwirkzeit von bis zu 24 h (Life Technologies Corporation 2010b), die bei den Versuchen eingehalten wurden.

Da die Auswertung mit dem Auge der Subjektivität der auswertenden Person unterliegt und eine schwache Trübung schwer zu erkennen ist, wurde zur messtechnischen Erfassung das Mikrofilterplatten-Photometer Multiskan FC der Firma Thermo Fisher Scientific (Waltham, Massachusetts) verwendet. Die Auswertung anhand der Trübung erfolgte durch die Messung bei 595 nm wie von Harinen et al. (2011) beschrieben. Der Farbumschlag von PrestoBlue® wurde gemäß Herstellerangaben bei 570 nm mit der Referenzmessung 600 nm (595 nm) gemessen (Life Technologies Corporation 2010b).

3.4.1.3 Versuche mit Laborproben

In den Vorversuchen zur Inkubationszeit wurden die höchsten Keimzahlen nach der längsten getesteten Zeit beobachtet. Daran anschließend wurde nun geprüft, ob bei einer weiteren Verlängerung der Inkubationszeit das Wachstum noch höher liegt und ob eine kürzere Inkubationszeit auch ausreichend ist. Hierfür wurden jeweils drei MPN-Versuche erneut mit den vier abbauaktiven Kulturen (SV1-SV4) sowie mit vier abbauaktiven Grundwassermikroskopen (GWM08/17-FK, GWM11/17-FK, GWM12/17-FK und GWM17/17-FK) wie in Kapitel 3.4.1.2 beschrieben angesetzt. Zur Prüfung der verfügbaren TCE-Konzentration bei Zugabe von abbauaktiven Proben wurde außerdem eine Platte nur mit Medium wie in Kapitel 3.4.1.1 beschrieben mit inkubiert. Die Auswertung erfolgte jeweils nach acht, zehn und zwölf Wochen.

Vorherige Erfahrungen mit dem Farbstoff PrestoBlue® am TZW haben gezeigt, dass die Herstellerempfehlung von 24 h Einwirkzeit nicht ausreichend für die langsam wachsenden TCE-Verwerter sind und die MPN-Ansätze wurden eine Woche inkubiert. Zur Prüfung wurden die Versuche nun anhand der Trübung sowie nach einem Tag und nach einer Woche Inkubation mit PrestoBlue® ausgewertet. Außerdem wurde getestet, ob die Inkubation mit PrestoBlue® bei Raumtemperatur ebenfalls möglich ist. In Untersuchungen zum Temperaturbereich konnte über 27°C kein aerob-metabolischer Abbau mehr beobachtet werden (Gaza et al. 2019), so dass sich die Inkubation nach Herstellerangaben bei 37°C womöglich schädlich auf die Mikroorganismen auswirkt und niedrigere Keimzahlen erzielt werden.

3.4.2 Entwicklung einer PCR-Methode

3.4.2.1 Mikrobiomanalyse und Primerentwicklung

Zur Identifizierung der abbauaktiven Mikroorganismen sowie zur Entwicklung einer schnellen und spezifischen PCR-basierten Nachweismethode wurde im Rahmen des Partnerprojekts BioChlor (siehe Kapitel 1.1) eine Mikrobiomanalyse zum aerob-metabolischen TCE-Abbau durchgeführt und anschließend ein spezifisches Primerpaar entwickelt.

Hierfür wurde Genmaterial von insgesamt 82 Proben aus den abbauaktiven Kulturen (siehe Kapitel 3.1) und Grundwassermikrokosmen (siehe Kapitel 3.3) sequenziert. Vorbereitend wurden 50 mL der Wasserprobe über einen sterilen Membranfilter mit 0,2 µm Porenweiter der Firma PALL filtriert. Der Filter wurde halbiert und beide Hälften in jeweils einem Reaktionsgefäß bei -20°C gelagert, wobei eine Hälfte im Anschluss extrahiert wurde und die andere als Rückstellprobe diente. Für die DNA-Extraktion wurde das Gerät FastPrep-24™ classic und das FastDNA™ Spin Kit for Soil von MP Biomedicals genutzt. Die isolierte DNA wurde zur 16S-rRNA-Amplikons-Sequenzierung an die Technische Universität München geschickt. Anschließend wurden die Sequenzierungsdaten anhand ihrer Ähnlichkeit zueinander in sogenannte operative taxonomische Einheiten (operative taxonomic unit – OTU) eingeteilt und hierfür die Plattform IMNGS (Integrated Microbial Next Generation Sequencing) genutzt. Soweit möglich wurde mit Hilfe der rRNA-Datenbank SILVA eine taxonomische Zuordnung der OTUs vorgenommen.

Für die Primerentwicklung wurden OTUs ausgewählt, die auf eine wesentliche Beteiligung am TCE-Abbau hindeuten indem sie innerhalb der Proben sowie über alle Proben verteilt häufig vorkommen und bei unterschiedlichen Probenahmezeitpunkten einen konstanten oder wachsenden Anteil aufweisen. Für das Primerdesign wurde die Website Primer-BLAST verwendet und ausgewählte Primerpaare bei Eurofins Genomics Germany GmbH bestellt.

Zur Prüfung der Primerpaare wurde eine Gradienten-PCR mit den Parametern in Tabelle 9 durchgeführt. Hierfür wurden Rückstellproben herangezogen, die bereits für die Mikrobiomanalyse verwendet wurden und deren OTU-Gehalt bekannt ist, so dass Proben mit unterschiedlichen Anteilen der Zielsequenz sowie eine Kontrollprobe ohne Zielsequenz ausgewählt werden konnten. Die Primer wurden gemäß Herstellerangaben gelöst und eine 1:10 Verdünnung sowie der Mastermix SensiMix SYBR NO-ROX von Bioline, der den Fluoreszenzfarbstoff SYBR Green enthält, eingesetzt. Die PCR wurde mit dem CFX96 Touch Real-Time PCR Detection System von Bioline durchgeführt und der PCR-Zyklus 40 Mal wiederholt. Anhand der Ct-Werte der verschiedenen Proben wurde die Spezifität der Primer geprüft und die spezifische Temperatur des getesteten Primerpaars angegeben. Für das Primerpaar mit der größten Spezifität wurde anschließend ein Standard mit bekannter Menge eines linearisierten Plasmids erstellt, das die Zielsequenz enthält. Die Kalibrierung zum quantitativen Nachweis mittels qPCR erfolgte anhand einer seriellen Verdünnung des Standards.

Tabelle 9: Parameter der Gradienten-PCR

Aufheizen	95°C, 10 Minuten
Denaturierung	95°C, 20 Sekunden
Annealing	Temperaturgradient, 20 Sekunden (57°C, 57,7°C, 59°C, 61°C, 63,4°C, 65,3°C, 66,5°C, 67°C)
Elongation	72°C, 20 Sekunden
Schmelzkurve	60-95°C (in 0,5-Schritten), 0,5 Sekunden
Halten	4°C

3.4.2.2 Versuche mit Laborproben

Die entwickelte PCR-Methode wurde zunächst mit Rückstellproben aus den Grundwassermikrokosmenversuchen der Standorte 5 und 7 getestet, die nicht sequenziert und für die Methodenentwicklung genutzt wurden. Aus den Ansätzen standen Proben zu Versuchsstart, Mitte und Versuchsende zur Verfügung. Bei der Probenahme wurden jeweils 50 mL wie in Kapitel 3.4.2.1 beschrieben filtriert und extrahiert. Die Filter und Extrakte wurden bis zur Messung bei -20°C gelagert.

Die qPCR wurde mit dem Gerät Rotor-Gene 6000 der Firma Corbett Life Science und entsprechender Software durchgeführt. Als Mastermix diente wieder der SensiMix SYBR NO-ROX von Bioline und als Primer wurde das entwickelte Primerpaar mit der größten Spezifität (F: GGACGAAACGGTCAGCTCA, R: GGTAAAGCCGGGGATTCA, Länge: 180 bp, siehe auch Kapitel 4.3.2.1) verwendet. Die spezifisches Annealing-Temperatur des Primers betrug 63,4°C. Das Temperaturprogramm der übrigen Schritte entsprach dem der Gradienten-PCR in Tabelle 9.

3.4.3 Validierung der Biomonitoringmethoden

3.4.3.1 Validierung mit Feldproben

Zur Validierung der Biomonitoringmethoden wurden Feldproben des Standortes verwendet, an dem der aerob-produktive TCE-Abbau nachgewiesen wurde und in einem Pilottestfeld mit Sauerstoff stimuliert wird. Abbildung 16 zeigt eine Übersichtskarte des Standortes im Bereich des Pilottestfelds mit der Schadstoffverteilung, der natürlichen Grundwasserfließrichtung und der Lage der beprobten Grundwassermessstellen. Dabei wurden Messstellen innerhalb des Pilottestfelds (ZB1, ZB2, B826, S2 tief, S2 flach, B805 und B808) sowie eine Messstelle außerhalb des Testfelds (B809A) als Referenz ausgewählt und MPN-Versuche sowie PCR-Messungen durchgeführt.

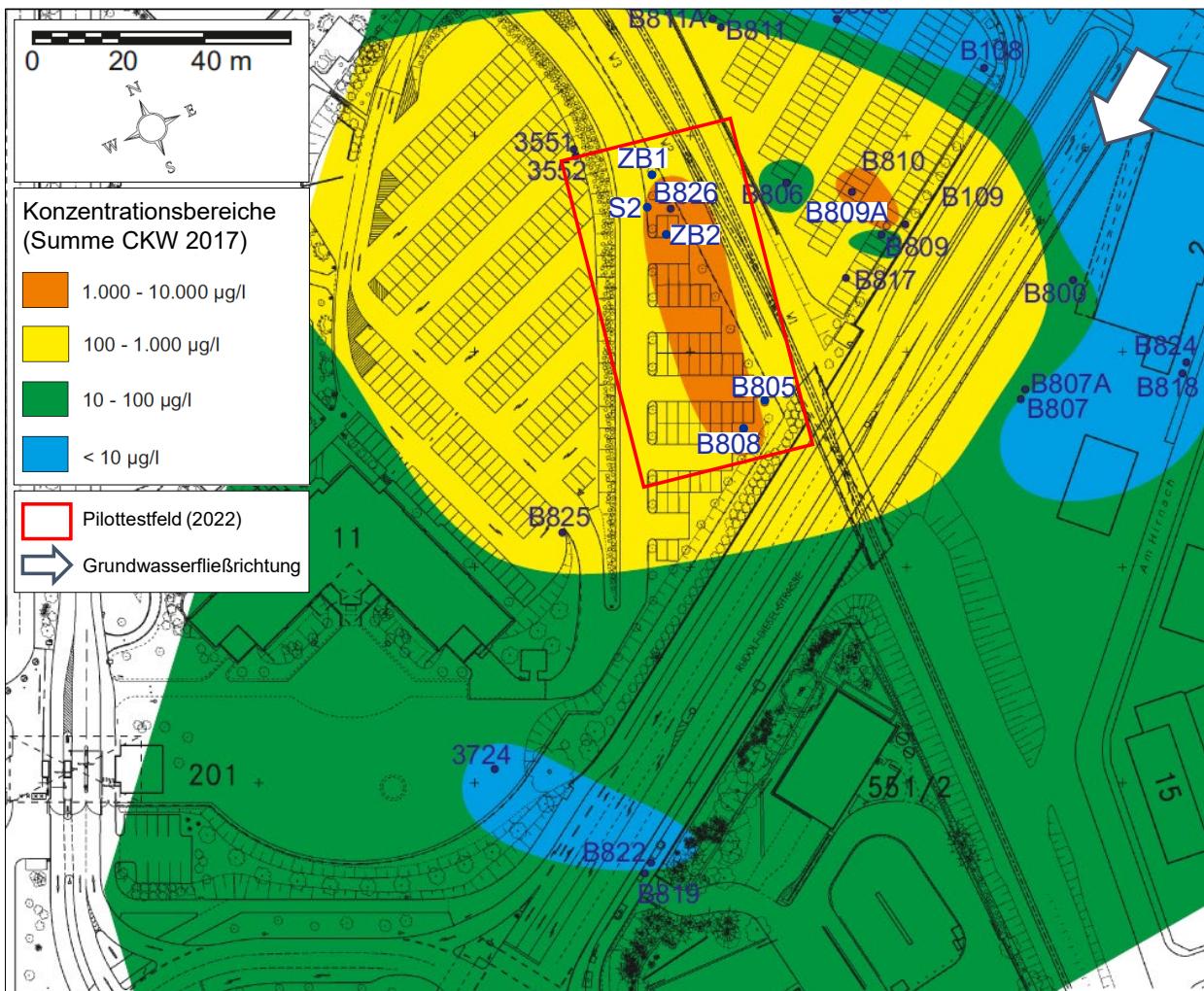


Abbildung 16: Übersichtskarte des Standortes zur Validierung der Biomonitoringmethoden (verändert nach BGU 2020)

Die MPN-Versuche wurden wie in Kapitel 3.4.1.3 beschrieben angesetzt und zehn Wochen inkubiert. Nach Auswertung anhand der Trübung wurden die Mikrotiterplatten nochmals sieben Tage mit PrestoBlue® bei Raumtemperatur inkubiert und erneut anhand des Farbumschlags ausgewertet.

Für die PCR-Messung wurde ein größeres Volumen von 1000 mL untersucht, nachdem im Zuge der Methodenentwicklung, bei der 50 mL Wasserprobe filtriert wurden, eine vergleichsweise geringe DNA-Konzentration festgestellt wurde. Da es sich bei den sequenzierten Proben um abbauaktive Kulturen und Mikrokosmen gehandelt hat, war bei Grundwasserproben eine noch geringere Konzentration anzunehmen, so dass das Probenvolumen erhöht wurde. Die Probenvorbereitung und qPCR-Messung erfolgte wie in Kapitel 3.4.2.1 beschrieben.

3.4.3.2 Validierung mit Kulturproben

Neben den Feldproben dienten auch Kulturproben zur Validierung der Biomonitoringmethoden. Hierfür wurden die Flüssigkulturen SV1 bis SV6 zu zwei Zeitpunkten – bei TCE-Dosierung und nach einem substantiellen Abbau – beprobt. Dabei sollte vor allem Aufschluss über den quantitativen Nachweis des Bakterienwachstums im Zuge des TCE-Abbaus mit den verschiedenen Methoden gewonnen werden.

Nach den vorherigen Versuchen wurde für ein deutlicheres PCR-Ergebnis ein größeres Probenvolumen von jeweils 200 mL filtriert. Die MPN-Versuche und PCR-Messungen wurden wie für die Feldproben durchgeführt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Kultivierung der aerob-metabolischen TCE-Verwerter

4.1.1 Abbauaktivität

Die Überwachung der Abbaufähigkeit belegte eine langzeitstabile Aktivität der Anreicherungskulturen mit stöchiometrischer Chloridbildung wie bereits von Schmidt et al. (2014) und Gaza et al. (2019) beschrieben.

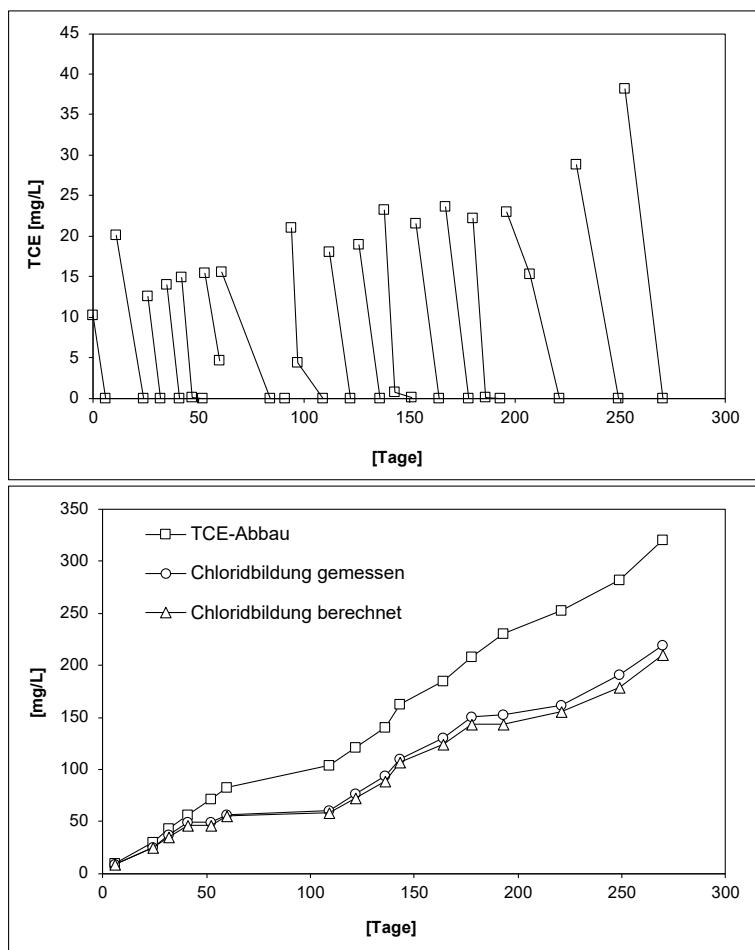


Abbildung 17:

Wiederholte TCE-Dosierung und Abbau in einer Kleinsäule (oben) kumulativ aufgetragen mit korrelierender Chloridbildung (unten)

Abbildung 17 zeigt beispielhaft den wiederholten Abbau der zugegebenen TCE-Menge als alleinige Kohlenstoffquelle (oben) mit der zugehörigen Chloridbildung in einer Kleinsäule kumulativ aufgetragen (unten). Dabei zog auch eine sukzessive Erhöhung der TCE-Zugabe von 10 auf knapp 40 mg/L eine stabile Abbauleistung nach sich. Die Chloridbildung im Chlorid-freien Medium

verhält sich mit sehr hoher Genauigkeit stöchiometrisch zur TCE-Abnahme und belegt die vollständige Mineralisierung durch den aerob-produktiven Abbau. Die gemessene und die stöchiometrisch berechnete Chloridbildung korrelieren hier mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9995 (nicht dargestellt).

Die Ergebnisse belegen eine erfolgreiche Fortführung der von Schmidt et al. (2014) und Gaza et al. (2019) etablierten Kultivierung der Mikroorganismen, die TCE aerob-produktiv umsetzen. Hierdurch ist die Verwendung einer abbauaktiven und langzeitstabilen Kultur als Inokulum für die Mikroskopversuche (siehe Kapitel 4.2) sowie als Proben für die Entwicklung der Biomonitoring-methoden (siehe Kapitel 4.3) sichergestellt.

4.1.2 Flockenbildung

Während der Kultivierung konnte am Boden der Batch- und Säulenvorratsflaschen eine Flockenbildung beobachtet werden (Abbildung 18), die auch schon von Gaza et al. (2019) festgestellt wurde. Eine Probenahme der Flocken und Betrachtung unter dem Mikroskop bestätigte, dass es sich hierbei um stäbchenförmige und meist aneinanderhängende Bakterien in kürzeren und längeren, teils verzweigten Ketten in einer organischen Masse handelt. Da ausschließlich TCE als Kohlenstoffquelle zur Verfügung stand, kann das Wachstum dieser Bakterien auf den aerob-metabolischen TCE Abbau zurückgeführt werden. Folglich wurde eine hohe Konzentration der abbauaktiven Mikroorganismen in den Flocken erwartet, die zur Entwicklung eines spezifischen PCR-Nachweises ebenfalls beprobt und sequenziert wurden.



Abbildung 18:
Flockenbildung am Boden einer 2 L-Batchflasche

Die Flockenbildung kann neben dem sehr langsamen Wachstum der TCE-Verwerter (siehe Kapitel 4.2.1) auch ein Grund dafür sein, dass die anfänglichen Versuche im Rahmen dieser Arbeit,

das Bakterienwachstum mit optischen Verfahren zu erfassen, nicht zielführend waren. Die Flowzytometrie und das Sensitivkinetiksystem sollten zur Aufnahme von Wachstumskurven in Hinblick auf die Ermittlung kinetischer Parameter dienen. Bei der Flowzytometrie werden die Zellen einer Probe einzeln anhand ihrer Lichtstreuung oder Fluoreszenz detektiert. Im Sensitivkinetiksystem wird das Bakterienwachstum in geschlossenen Küvetten kontinuierlich anhand der Trübung erfasst. Zusammenhängende Bakterien können vom Flowzytometer als eine Zelle erfasst werden und verhindern ebenso einen kontinuierlichen Trübungsanstieg im Sensitivkinetiksystem, so dass mit diesen Methoden kein Bakterienwachstum aufgezeichnet werden konnte. Gaza (2015) diskutierte nach ihren Beobachtungen bereits die nachteilhaften Auswirkungen der Flockenbildung für die Erfassung der Biomasse und Aufnahme der Abbaukinetik. Optische Verfahren wie die Flowzytometrie oder die photometrische Messung der DNA lieferten auch hier keine verwertbaren Daten.

4.2 Mikrokosmenversuche

4.2.1 Intrinsisches Abbaupotential

In den Mikrokosmen ohne Bioaugmentation herrschten über die gesamte Versuchszeit aerobe Bedingungen bei einem Sauerstoffgehalt von durchschnittlich 6,7 mg/L. Somit stand den Mikroorganismen ausreichend Sauerstoff für den aeroben Abbau zur Verfügung. Insgesamt zeigten sieben der 13 beprobten Messstellen, die sich an sechs der sieben untersuchten Standorte befinden, einen TCE-Abbau und sind zur Übersicht in Tabelle 10 entsprechend gekennzeichnet. Die Rohdaten aller Mikrokosmen befinden sich in Anhang 1.

Tabelle 10: Zusammenfassende Ergebnisse der Mikrokosmenversuche zum intrinsischen Abbaupotential

Standort	1	2	3	4				5			6	7	
Messstelle	B23	GWM9	B17	BP35	GWM 08/17	GWM 11/17	GWM 12/17	GWM 17/17	GWM 2981	GWM 2983	GWM 2984	B44M	PZ13
Intrinsisches Abbaupotential	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓

✓: TCE-Abbau, ✗: kein TCE-Abbau

Abbildung 19 zeigt beispielhaft den TCE-Konzentrationsverlauf der Mikrokosmen einer Messstelle von Standort 5 mit vergleichsweise hohen TCE-Konzentrationen von ca. 30 mg/L (GWM2981). In den nicht beimpften Ansätzen ist sowohl ohne als auch mit zusätzlicher Nährstoffzugabe nach etwa 70 Tagen nach Versuchsbeginn ein deutlicher TCE-Rückgang im Vergleich zur Sterilkontrolle zu beobachten, der nach erneuter TCE-Zugabe an Tag 133 wiederholt einsetzte.

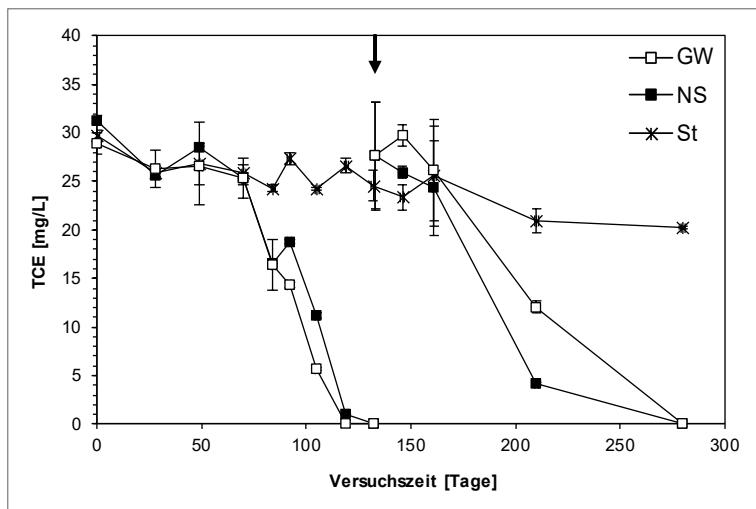


Abbildung 19:

Intrinsischer TCE-Abbau in Mikrokosmen von Standort 5 (GWM2981) ohne Inokulum (GW) und ohne Inokulum mit anorganischer Nährstoffzugabe (NS) verglichen mit der Sterilkontrolle (St). TCE wurde an Tag 133 erneut dosiert (↓). Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung der Doppelmesung.

Die Anpassungszeit der anderen Ansätze ohne Inokulum lag bis auf wenige Ausnahmen zwischen 43 und 92 d. Nur zwei Mikrokosmen zeigten bereits bei der ersten Probenahme nach Versuchsbeginn einen TCE-Rückgang (B23 von Standort 1 und GWM9 von Standort 2). Der aerob-metabolische VC- und cDCE-Abbau wurde in der Literatur oft ohne Lag-Phase beobachtet (Davis und Carpenter 1990; Tiehm et al. 2008), wobei auch Anpassungszeiten von bis zu 110 bzw. 30 d zu finden sind (Coleman et al. 2002b; Davis und Carpenter 1990; Findlay et al. 2016; Schmidt et al. 2010; Tiehm et al. 2008). Für andere Schadstoffgruppen werden meist kürzere Lag-Phasen angegeben, z.B. 4 d für BTEX-Verbindungen (Kelly et al. 1996), 9 d für Methan und 17 d für Ethan (Findlay et al. 2016). Beim Abbau von Phenolen (Broholm und Arvin 2000) und PAK-Verbindungen (Durant et al. 1995) wurde keine Lag-Phase beobachtet.

Der aerob-metabolische Chlorethenabbau ist mit einer stöchiometrischen Bildung des Abbauprodukts Chlorid verbunden. Im Chlorid-freien Medium konnte die Chloridbildung im Zuge des aeroben TCE-Abbaus in dieser (siehe Kapitel 4.1.1) sowie in vorangegangenen Arbeiten (Gaza et al. 2019; Schmidt et al. 2014) mit hoher Genauigkeit beobachtet werden. Dagegen ist eine Bilanzierung in Grundwasserproben aufgrund der Chlorid-Hintergrundkonzentrationen meist nicht möglich. Dennoch war in zwei Mikrokosmenreihen von Standort 5 (GWM2981 und GWM2984) der TCE-Umsatz groß genug bzw. die Chlorid-Hintergrundkonzentration niedrig genug, um eine deutliche und nahezu stöchiometrische Chloridbildung über die Messungenauigkeit hinaus zu beobachten (Abbildung 20, oben), die den aeroben TCE-Abbau belegt. Die gemessene und die stöchiometrisch berechnete Chloridbildung korrelieren hier mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9825 (Abbildung 20, unten).

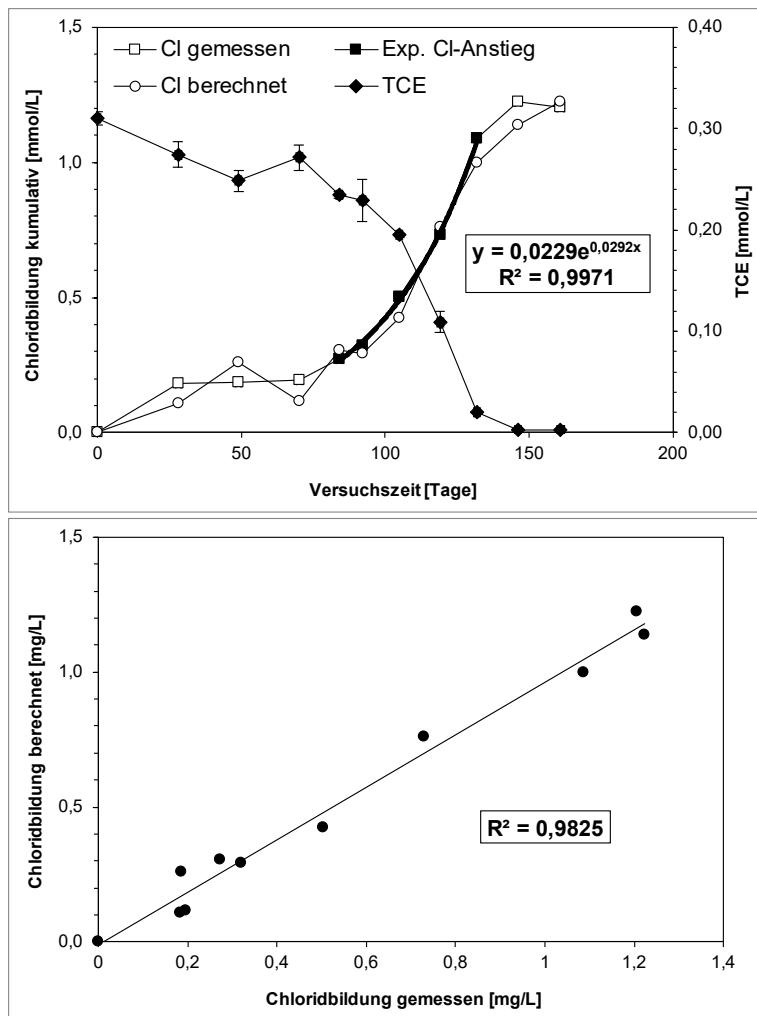


Abbildung 20:

Stöchiometrische Chloridbildung in einem Mikrokosmos ohne Inokulum von Standort 5 (GWM2984) mit Ermittlung der Verdopplungszeit in der exponentiellen Phase (oben) und Korrelation der gemessenen und der aus dem TCE-Abbau berechneten Chloridbildung (unten). Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung der Doppelmessung.

Aus dem exponentiellen Anstieg der Chloridbildung konnte außerdem auf eine Verdopplungszeit der abbauaktiven Mikroorganismen von $\ln(2) / 0,0292 = 24$ d geschlossen werden, die auch im Doppelansatz bestimmt wurde. Die Wachstumsrate der TCE-verwertenden Bakterien ist damit bedeutend langsamer im Vergleich zum aerob-metabolischen Abbau anderer Schadstoffe, die zur Veranschaulichung in Abbildung 21 aufgetragen sind. Die angegebenen Verdopplungszeiten liegen für die Chlorehene VC und cDCE zwischen 0,72 und 4,1 d bzw. 2,2 und 3,1 d und für Ethen zwischen 0,76 bis 1,8 d (Coleman et al. 2002b; Schmidt et al. 2010; Tiehm et al. 2008). Die Wachstumsrate von PAK-Verwertern ist noch größer mit entsprechend kürzeren Verdopplungszeiten von 0,72 d für Fluoranthen, 0,52 d für Pyren und 0,42 d für Phenanthren (Boldrin et al. 1993). Beim aerob-metabolischen Abbau von Monoaromaten wird ein noch schnelleres Wachstum angegeben mit Verdopplungszeiten von 0,57 d für Phenol, 0,040 bis 0,23 d (0,09 - 5,5 h) für Benzol und lediglich 0,034 bis 0,054 d (0,82 - 1,3 h) für Toluol (Abuhamed et al. 2004; Chang et al. 1993; Paje et al. 1997; Reardon et al. 2000).

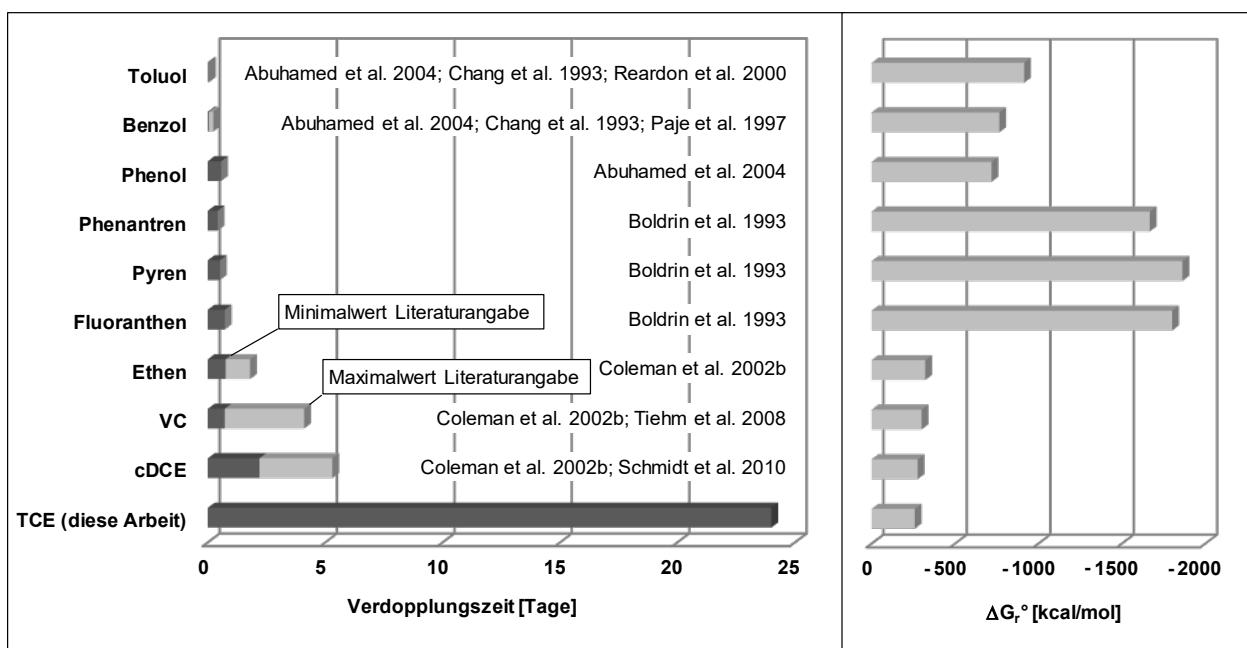


Abbildung 21: Verdopplungszeiten (links) und Energieumsatz (rechts, Daten und Rechnung nach Dolfig und Novak 2015, McFarland und Sims 1991, Viamajala et al. 2007 und Wiedemeier et al. 1999) im Zuge des aerob-metabolischen Abbaus verschiedener Schadstoffe

Als Ursache für das langsame Wachstum der TCE-verwertenden Bakterien wurde zunächst die geringe Energieausbeute vermutet, die aus dem aerob-produktiven TCE-Abbau für die Organismen resultiert. Wie schon in Kapitel 2.2.3 beschrieben, liegen die Chlorethene mit wachsender Chloratomzahl zunehmend oxidiert vor, so dass bei der Oxidation im Zuge des aeroben Abbaus nur geringfügig Energie freigesetzt wird. Für TCE beträgt der Energiegewinn 258 kcal/mol und nimmt mit abnehmender Chloratomzahl und zunehmend reduziertem Charakter der Verbindungen über cDCE mit 276 kcal/mol bis VC mit 299 kcal/mol immer weiter zu (berechnet nach Wiedemeier et al. 1999). Werden den Verdopplungszeiten in Abbildung 21 die entsprechenden Reaktionsenthalpien der Substrate gegenübergestellt, ist bei den Chlorethenen und Monoaromaten Phenol, Benzol und Toluol eine Tendenz von steigendem Energiegewinn mit kürzeren Verdopplungszeiten erkennbar. Die Verdopplungszeit für den TCE-Abbau beträgt jedoch ein Vielfaches der Werte für die anderen Chlorethene und steht in keinem Verhältnis zu der vergleichsweise geringfügig kleineren Energieausbeute. Bei den PAK-Verbindungen Phenanthren, Pyren und Fluoranthren ist kein Zusammenhang erkennbar. Folglich ist der Einfluss des Energiegewinns auf das Bakterienwachstum geringer als vermutet.

Ein weiterer Verdacht für das bedeutend langsamere Wachstum lag in der Annahme, dass der TCE-Abbau durch eine Mischkultur vollzogen wird (siehe Kapitel 2.2.3) und der Abbau durch verschiedene Bakterien womöglich langsamer abläuft als durch eine Reinkultur. Die angegebenen

Verdopplungszeiten für den Abbau der anderen Schadstoffe stammen meist von Isolaten. Die Literaturangaben für cDCE und VC gehen jedoch sowohl auf Mischkulturen als auch Isolate zurück. Ein Vergleich zeigt, dass die Werte für Mischkulturen von 2,2 d für cDCE (Schmidt et al. 2010) bzw. 1,4 bis 2,4 d für VC (Tiehm et al. 2008) in der gleichen Größenordnung liegen wie die Verdopplungszeiten der Isolate, die jeweils 3,1 d (Coleman et al. 2002a) und 1 bis 4,1 d (Coleman et al. 2002b) betragen. Folglich kann nicht auf ein langsameres Wachstum der TCE-Verwerter aufgrund des Abbaus durch eine Mischkultur geschlossen werden. Um den deutlichen Unterschied der Wachstumsgeschwindigkeit zu erklären, ist ein tieferes Prozessverständnis des aerob-metabolischen Chlorethen-Abbaus notwendig, dessen genauer Mechanismus bislang nicht bekannt ist.

Weiterhin wurde in den Mikrokosmenversuchen nach einer substantiellen TCE-Abnahme um durchschnittlich 96 % eine Stagnation des Abbaus bei Restkonzentrationen zwischen 0,0050 und 0,34 mg/L beobachtet. Um eine Nährstofflimitierung auszuschließen, wurde in die abbauaktiven Mikrokosmen der Standorte 1 bis 3 an Tag 275 anorganische Nährstoffe dosiert. Nachdem der TCE-Abbau weiterhin stagnierte, wurde als Ursache eine zu geringe Substrataffinität der abbauaktiven Mikroorganismen vermutet, um TCE in diesem Konzentrationsbereich weiter abzubauen, und nach über 200 d Inaktivität erneut TCE dosiert. Nur der Mikrokosmos von Standort 1 zeigte einen wiederholten Abbau (Diagramme siehe Anhang 2). Nachdem bereits Gaza et al. (2019) nach längeren Hungerperioden keinen TCE-Abbau mehr beobachten konnte, war der Zeitraum vor der Aufdosierung womöglich zu lang. Außerdem konnte ein Zusammenhang der TCE-Restkonzentrationen mit dem cDCE-Gehalt in den Mikrokosmen festgestellt und auf eine Hemmung des TCE-Abbaus durch cDCE geschlossen werden, worauf in Kapitel 4.2.3 gesondert eingegangen wird.

Die Mikrokosmen der Standorte 4 bis 7 wurden zu einem späteren Zeitpunkt angesetzt und ohne Hungerphasen aufdosiert. In den Ansätzen mit TCE-Abbau (siehe Tabelle 10) setzte dieser anschließend erneut ein und zog eine substantielle Abnahme von mind. 98 % mit geringeren Restkonzentrationen von 0,012 bis 0,018 mg/L nach sich. Die nach Versuchsbeginn beobachteten Anpassungszeiten verkürzten sich an Standort 5 von 70 auf 28 d und im Mikrokosmos von Standort 7 von 92 auf 13 d (Diagramme siehe Anhang 2). Die geringeren Restkonzentrationen und kürzeren Lag-Phasen nach erneuter Dosierung deuten auf ein Wachstum im Zuge des vorangegangenen Abbaus und eine zunehmende Anpassung der beteiligten Mikroorganismen hin.

In zwei Mikrokosmen konnte der Abbau durch die Zugabe anorganischer Nährstoffe angeregt oder reproduziert werden (GWM12/17 von Standort 4 und Doppelansatz mit Nährstoffen PZ13

von Standort 7), so dass hier eine Stickstoff-, Phosphor- oder Spurenelementlimitierung zu herrschen schien. Abbildung 22 zeigt die Chlorethen-Konzentrationen des GWM12/17-Mikrokosmos ohne Inokulum, in dem eine TCE-Abnahme erst nach Nährstoffzugabe an Tag 210 zu beobachten ist. Die Chlorethen-Werte sind wie für die Diagramme in Anhang 2 im Verhältnis zur Sterilkontrolle (C/C_{steril}) aufgetragen, so dass abiotische Verluste bereits berücksichtigt sind und verschiedene Konzentrationsbereiche auf einer Skala dargestellt werden können. Da die Sterilkontrollen der Standorte 1 bis 3 nicht an den gleichen Tagen beprobt wurden wie die aktiven Ansätze, ist hier das Verhältnis zum Startwert (C/C_{Start}) aufgetragen. Auch die Diagramme der Sterilkontrollen beziehen sich auf den Startwert.

Im Mikrokosmos der Messstelle GWM12/17 in Abbildung 22 fiel der geringe VC-Gehalt bei der ersten Probenahme nach Versuchsstart unter die Bestimmungsgrenze (< BG). VC spielt auch in den anderen Mikrokosmen eine untergeordnete Rolle und war nach spätestens 117 d nicht mehr nachweisbar. Wie in allen Mikrokosmen, die PCE enthielten, blieb die Konzentration wie im GWM12/17-Ansatz über die Versuchszeit weitestgehend konstant, was gegen einen abiotischen Schadstoffrückgang durch Verflüchtigung spricht. Dies bestätigen auch die Chlorethen-Konzentrationen in den Sterilkontrollen, die nur geringe Verluste während der Probenahme und in die zunehmende Gasphase aufweisen. Lediglich die geringen VC-Konzentrationen waren aus einigen Sterilkontrollen bis zu Versuchsende verflüchtigt. Der cDCE-Gehalt zeigte in Abbildung 22 keine wesentliche Abnahme, jedoch wurde in den anderen Ansätzen mit dem TCE-Abbau auch ein cDCE-Rückgang beobachtet, was in einem eigenen Kapitel (4.2.3) beschrieben wird.

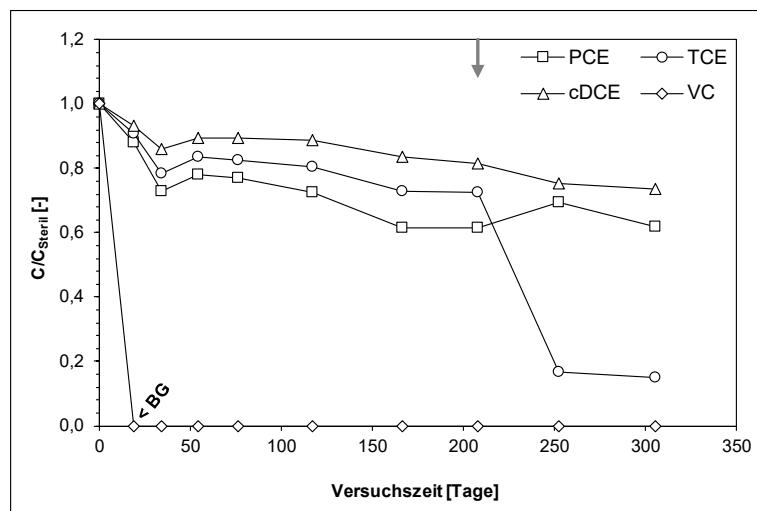


Abbildung 22:
Stimulierter TCE-Abbau durch anorganische Nährstoffzugabe (↓) in einem Mikrokosmos ohne Inokulum von Standort 4 (GWM12/17).

Die DOC-Werte nahmen in den Mikrokosmen über die Versuchszeit nur geringfügig ab. Unter Berücksichtigung der berichteten Transformationsumsätze sind weder die DOC-Abnahmen noch

die Rückgänge der anderen Chlorehene ausreichend, um die TCE-Umsätze auf einen co-metabolischen Abbau mit einem organischen Begleitstoff zurückzuführen (Semprini 1997). Weiterhin konnte keine wesentliche Veränderung der Nitratkonzentrationen festgestellt werden, die auf eine co-metabolische Umwandlung mit Ammonium hinweisen könnte. Zuletzt spricht der erneute TCE-Abbau nach Aufdosierung für eine produktive Umsetzung, da für einen wiederholten co-metabolischen Abbau das Wachstumssubstrat in erheblich größeren Mengen vorhanden sein oder ebenfalls nachdosiert werden müsste.

Folglich deuten die vorliegenden Daten stark auf einen aerob-produktiven TCE-Abbau im Grundwasser von sechs der sieben untersuchten Standorte hin. Der Abbau konnte durch die Zugabe von Sauerstoff und in einigen Fällen auch anorganischer Nährstoffe angeregt werden. Dabei war kein Zusammenhang zwischen dem Vorkommen der Bakterien, die TCE aerob-produktiv umsetzen, und den chemischen bzw. hydrogeologischen Bedingungen der Grundwässer oder der geographischen Lage der Standorte zu erkennen (siehe Kapitel 3.3.1 und 3.3.2). Der Abbau trat in Proben sowohl aus Poren- als auch Kluftgrundwasserleitern verschiedener geologischer Formationen und entsprechendem Chemismus auf (siehe Tabelle 6). Nach der ersten und bislang einzigen Beobachtung des aerob-metabolischen TCE-Abbaus durch Schmidt et al. (2014) konnte das intrinsische Abbaupotential somit für unterschiedliche hydrochemische Bedingungen und Aquifereigenschaften aufgezeigt werden.

4.2.2 Bioaugmentationspotential

In allen Mikrokosmen mit Inokulum und einer TCE-Konzentration von bis zu 41 mg/L wurde unter durchweg aeroben Bedingungen mit Sauerstoffwerten von durchschnittlich 6,7 mg/L ein TCE-Abbau beobachtet. Zur Übersicht sind die Grundwasserproben mit erfolgreicher Bioaugmentation in Tabelle 11 entsprechend gekennzeichnet. Die Rohdaten aller Mikrokosmen befinden sich in Anhang 1.

Tabelle 11: Zusammenfassende Ergebnisse der Mikrokosmenversuche zum Bioaugmentationspotential

Standort	1	2	3	4				5			6	7	
Messstelle	B23	GWM9	B17	BP35	GWM 08/17	GWM 11/17	GWM 12/17	GWM 17/17	GWM 2981	GWM 2983	GWM 2984	B44M	PZ13
Bioaugmentation mit													
· Flüssigkultur	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
· Immobilisierter Kultur	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
· SF-Wasser	—	—	—	—	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	—

✓: TCE-Abbau, ✗: kein TCE-Abbau, —: nicht angewendet

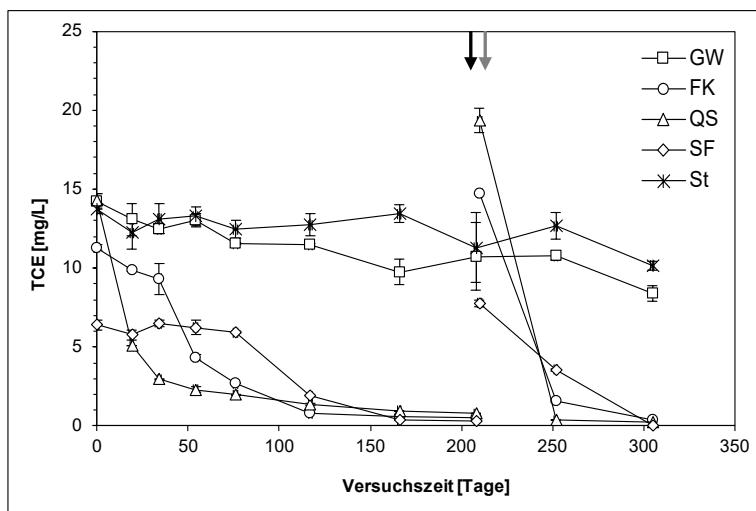


Abbildung 23:

Bioaugmentierter TCE-Abbau in Mikrokosmen von Standort 4 (GWM08/17) mit Flüssigkultur (FK), immobilisierter Kultur (QS) und SF-Wasser (SF) verglichen mit dem Ansatz ohne Inokulum (GW) und der Sterilkontrolle (St). Nährstoffe (↓) wurden mit TCE (↓) an Tag 210 zugegeben. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung der Doppelmessung.

Abbildung 23 zeigt beispielhaft die TCE-Konzentration einer Mikrokosmenreihe ohne intrinsisches Abbaupotential von Standort 4 (GWM08/17). Während der TCE-Gehalt in der Sterilkontrolle und im Ansatz ohne Inokulum über die Versuchszeit vergleichsweise konstant blieb, zeigten alle angesetzten Mikrokosmen eine deutliche TCE-Abnahme, die nach erneuter TCE-Dosierung an Tag 210 reproduziert werden konnte und auch in den Doppelansätzen beobachtet wurde. Wie im gezeigten Beispiel setzte der Abbau mit immobilisierter Kultur in 63 % der Fälle ohne Verzögerung ein, mit Flüssigkultur in 25 %. In allen anderen Fällen und mit SF-Wasser waren Lag-Phasen von bis zu 76 d zu beobachten. In Grundwasserproben mit intrinsischem Abbaupotenzial führte die Bioaugmentation zu einem beschleunigten Abbau. Die zusätzliche Nährstoffzugabe zu Versuchsbeginn in den Doppelansätzen von Standort 4 zeigte mit Anreicherungskulturen keinen Mehrwert, da das Medium der Flüssigkultur und das Porenvolumen des Quarzsandes bereits ausreichend Nährstoffe enthielten. Auch mit SF-Wasser ist kein deutlicher Unterschied zu erkennen (Diagramme siehe Anhang 2).

Nach einer substantiellen Abnahme von durchschnittlich 94 % stagnierte der TCE-Abbau bei Restkonzentrationen zwischen 0,00093 und 1,7 mg/L. Wie in den nicht beimpften Mikrokosmen beobachtet, setzte der TCE-Abbau nicht in jedem Mikrokosmos der Standorte 1 bis 3 nach langer Stagnationszeit erneut ein. Entsprechend wurden die Mikrokosmen der Standort 4 bis 7 zu einem früheren Zeitpunkt aufdosiert, worauf der Abbau in allen Ansätzen erneut einsetzte. Dabei gingen die Restkonzentrationen auf 0,00045 bis 0,79 mg/L zurück und die TCE-Abnahme erhöhte sich auf 98 %. Davon ausgenommen sind die Mikrokosmen von Standort 6, in denen der reproduzierte TCE-Abbau nicht vollständig beobachtet wurde, weil das geringere Ansatzvolumen von 1 L aufgebraucht war. Giddings et al. (2010b) stellten ebenfalls eine Stagnation des Abbaus bei niedrigen

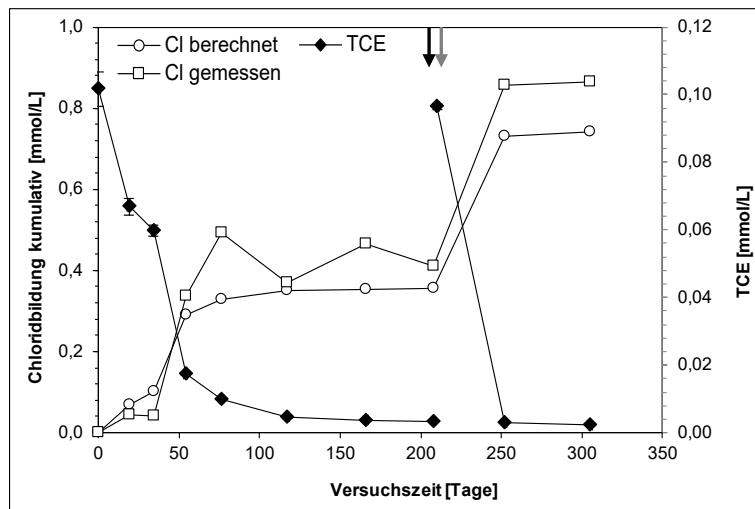


Abbildung 24:

Stöchiometrische Chloridbildung in einem Mikrokosmos von Standort 4 (GWM08/17) mit Flüssigkultur, gemessen und aus dem TCE-Abbau berechnet. Nährstoffe (↓) wurden mit TCE (↓) an Tag 210 zugegeben. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung der Doppelmessung.

Inokulumkonzentrationen in Mikrokosmenexperimenten zur Stimulierung des aeroben cDCE-Abbaus mit Bioaugmentation fest. Entsprechend kann der höhere TCE-Verbrauch und die niedrigeren Restkonzentrationen nach der Aufdosierung auf das Wachstum und die Anreicherung der abbauaktiven Mikroorganismen in den Mikrokosmen zurückgeführt werden.

In den bioaugmentierten Ansätzen wurde ebenfalls eine deutliche Chloridzunahme verzeichnet. Dabei war nicht nur in den in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Ansätzen von Standort 5, sondern auch in drei Mikrokosmenreihen ohne intrinsisches Abbaupotential von Standort 4 (GWM08/17, GWM11/17, GWM17/17) die TCE-Abnahme groß genug und die Chlorid-Hintergrundkonzentration niedrig genug für eine Chloridbildung über die Messungenauigkeit hinaus. Die Messdaten überstiegen meist die stöchiometrisch berechneten Werte zu Versuchsende, wie auch im Beispiel in Abbildung 24 gezeigt. Die Differenz kann auf die über den Versuchszeitraum wachsende Gasphase in den Mikrokosmen zurückgeführt werden, die zu niedrigeren Messwerten in der Flüssigphase und damit zu einer Unterschätzung der abgebauten Chlorethenmenge sowie der Chloridbildung führt. Außerdem kann durch den aeroben Abbau von cDCE und VC zusätzlich Chlorid gebildet werden.

In den Mikrokosmen mit Inokulum war mit dem TCE-Abbau auch ein Rückgang der cDCE-Konzentration zu beobachten. In den Ansätzen mit Anreicherungskultur sank die cDCE-Konzentration parallel zu TCE in 22 % der Fälle unter die Bestimmungsgrenze und stagnierte sonst mit dem TCE-Abbau nach einem Rückgang um 31 bis 70 %, was in Kapitel 4.2.3 weiter ausgeführt wird. Dagegen war in sieben der acht Mikrokosmen mit SF-Wasser eine vollständige cCDE-Abnahme bis unter die Bestimmungsgrenze zu beobachten, die in Abbildung 25 beispielhaft gezeigt ist. Da im Grundwasser des Standortes, von dem das SF-Wasser bezogen wurde, neben dem aerob-

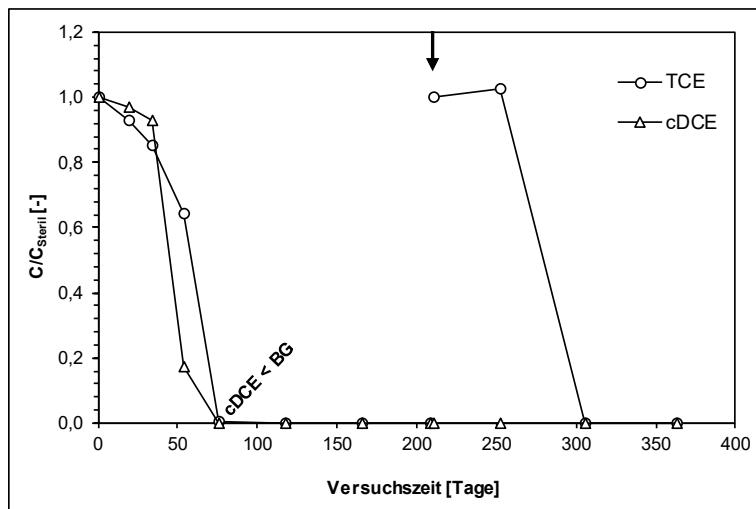


Abbildung 25:

Vollständiger cDCE-Abbau bis unter die Bestimmungsgrenze (< BG) in einem Mikrokosmos mit SF-Wasser von Standort 4 (GWM12/17) durch Stimulierung des aerob-metabolischen TCE- und cDCE-Abbaus. TCE wurde an Tag 210 nachdosiert (↓).

metabolischen TCE-Abbau auch der aerob-metabolische cDCE-Abbau nachgewiesen wurde (Schmidt et al. 2014), kann davon ausgegangen werden, dass durch die Zugabe in den Mikrokosmen beide Prozesse stimuliert wurden.

Die anderen Chlorehene PCE und VC spielten auch in den Mikrokosmen mit Inokulum eine untergeordnete Rolle. Die vergleichsweise geringen VC-Konzentrationen waren nach spätestens 54 d nicht mehr nachweisbar und die vorhandenen PCE-Gehalte zeigten keine nennenswerte Abnahme. Aufgrund dessen und den relativ konstanten Konzentrationen in den Sterilkontrollen kann auch hier ein Rückgang der Schadstoffe durch Verflüchtigung ausgeschlossen werden. Die Konzentration bzw. die Abnahme der anderen Chlorehene sowie die geringen Veränderungen der DOC- und Nitratwerte waren in den beimpften Ansätzen ebenfalls nicht ausreichend für einen co-metabolischen Abbau mit einem anderen Wachstumssubstrat.

Somit konnte in den Mikrokosmenversuchen das von Gaza et al. (2019) anhand von zwei Grundwasserproben exemplarisch aufgezeigte Bioaugmentationspotential bestätigt und für ein breiteres hydrochemisches Spektrum mit verschiedenen Animpfvarianten demonstriert werden. Der aerob-produktive TCE-Abbau wurde durch Bioaugmentation mit Flüssigkultur, immobilisierter Kultur sowie abbauaktivem Standortwasser in allen Grundwasserproben mit TCE-Konzentrationen bis zu 41 mg/L erfolgreich stimuliert bzw. beschleunigt. Nur die Ansätze der Messstelle B17 aus der Nähe des Schadensherdes an Standort 2 mit TCE-Gehalten von ca. 58 mg/L und einer CKW-Gesamtkonzentration von über 100 mg/L zeigten keinen TCE-Rückgang (siehe Tabelle 11 und Tabelle 6). Dies deckt sich ebenfalls mit den Untersuchungen von Gaza et al. (2019) zum Konzentrationsbereich des aerob-produktiven TCE-Abbaus, der bis zu einer Konzentration von

53 mg/L beobachtet wurde. Folglich kann im Grundwasser der Messstelle B17 von toxischen Konzentrationen für die verantwortlichen Mikroorganismen ausgegangen werden.

Weiterhin wurde mit der erfolgreichen Stimulierung sowohl des aerob-metabolischen TCE- als auch cDCE-Abbaus in den Mikrokosmenversuchen mit SF-Wasser die Möglichkeit aufgezeigt, beide Abbauprozesse durch Bioaugmentation anzuregen. Die Realisierung kann mit einer Mischkultur, die beide Substanzen abbaut, oder die gemeinsame Zugabe zweier Kulturen getestet werden, die jeweils TCE und cDCE umsetzen.

4.2.3 Wechselwirkungen mit cDCE

4.2.3.1 Co-metabolischer cDCE-Abbau mit TCE als Primärsubstrat

Alle Mikrokosmen, in denen ein TCE-Abbau festgestellt wurde, zeigten auch eine deutliche Abnahme der cDCE-Konzentration. Wie anhand des Beispiels in Abbildung 26 gezeigt, sank der cDCE-Gehalt zunächst mit dem TCE-Abbau. Anschließend verlangsamte sich die cDCE-Abnahme mit Stagnation des TCE-Abbaus. Nach Aufdosierung von TCE und einem erneuten Abbau setzte auch der cDCE-Rückgang wieder ein und stagnierte erneut mit Stagnation des TCE-Abbaus (siehe auch Diagramme in Anhang 2).

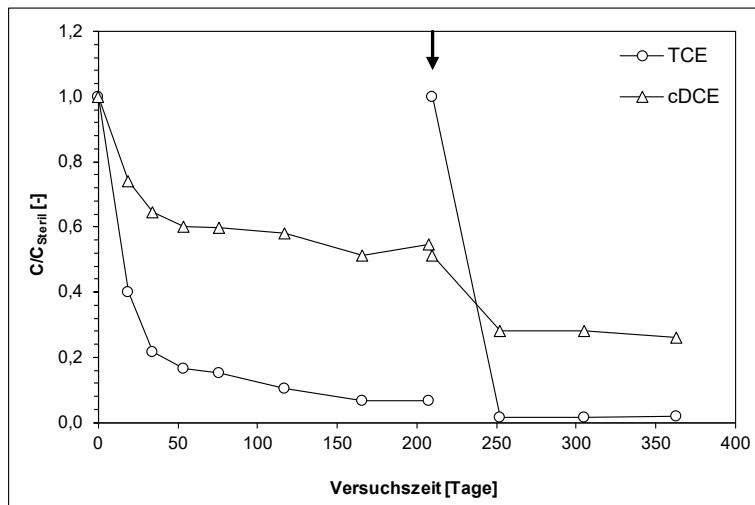


Abbildung 26:

Parallele Abbaumuster von TCE und cDCE in einem Mikrokosmos von Standort 4 (GWM08/17) auch nach TCE-Dosierung (↓)

Dieses auffällig parallele Abbaumuster deutet auf einen co-metabolischen cDCE-Abbau mit TCE als Primärsubstrat hin und war sowohl in Mikrokosmen ohne Inokulum als auch mit Anreicherungskultur zu beobachten, die TCE aerob-metabolisch umsetzt. In dem Grundwasser, aus dem die Kultur stammt, war auch der aerob-metabolische cDCE-Abbau aktiv (Schmidt et al. 2014), wurde aber nach vier Jahren Anreicherung mit TCE als alleinige Kohlenstoffquelle nicht mehr

beobachtet (Gaza et al. 2019). Folglich ist nicht von einer Stimulierung des aeroben cDCE-Abbaus durch die Zugabe der Anreicherungskultur in den Mikrokosmen auszugehen. Darüber hinaus zeigten auch die abbauaktiven Mikrokosmen der Standorte 1, 2, 5 und 7 ohne Bioaugmentation eine parallele cDCE-Abnahme, was ein natürliches co-metabolisches Abbaupotential von cDCE mit TCE im Grundwasser belegt. Umgekehrt kann ein co-metabolischer Abbau von TCE mit cDCE als Wachstumssubstrat in den Mikrokosmen aufgrund der Konzentrationsverhältnisse und Umsatzmengen wie bereits in den vorherigen Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 diskutiert ausgeschlossen werden. Zuletzt wurde keine cDCE-Abnahme ohne TCE-Rückgang beobachtet, während der TCE-Abbau nach Aufdosierung auch nach vollständiger cDCE-Umsetzung bis unter die Bestimmungsgrenze erneut einsetzte, wie anhand des Beispiels in Abbildung 27 gezeigt. Einige Mikrokosmen einschließlich der von Standort 3 zeigten einen TCE-Abbau ohne deutliche cDCE-Abnahme, jedoch war hier die cDCE-Konzentrationen zu niedrig um einen nennenswerten Rückgang zu verzeichnen.

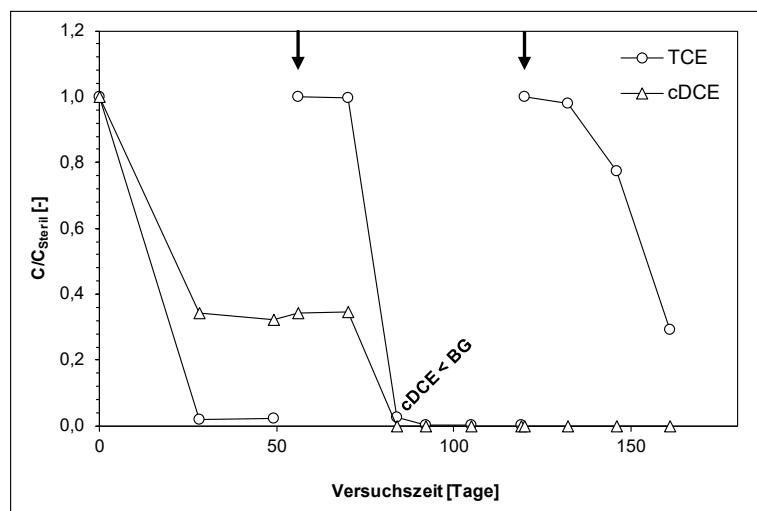


Abbildung 27:

Vollständiger cDCE-Abbau bis unter die Bestimmungsgrenze (< BG) an Tag 84 in einem Mikrokosmos von Standort 6 (B44M). TCE wurde an den Tagen 56 und 120 aufdosiert (↓) und auch in Abwesenheit von cDCE abgebaut.

Als Wachstumssubstrate für den aeroben co-metabolischen cDCE-Abbau sind aus der Literatur die Alkane Methan, Ethan, Propan, Butan, n-Pentan und n-Hexan (Anderson und McCarty 1997; Chang und Alvarez-Cohen 1996; Doughty et al. 2005; Frascari et al. 2013; Frascari et al. 2008; Frascari et al. 2006; Kim et al. 2000; Le und Coleman 2011), die Ethene Ethen und Propen (Ensign et al. 1992; Koziollek et al. 1999), die Aromaten Benzol, Toluol und Phenol (Bielefeldt et al. 1995; Elango et al. 2011; Schäfer und Bouwer 2000) sowie Ammonium (Vannelli et al. 1990) bekannt. Auch die Umsetzung mit anderen chlorierten Verbindungen wie Chlorbenzol, 1,2- und 1,3-Dichlorbenzol (Elango et al. 2011) sowie VC (Broholm et al. 2005; Frascari et al. 2006; Freedman et al. 2001; Verce et al. 2002) wurde bereits beobachtet. Berichte über einen co-metabolischen

Abbau mit TCE als Wachstumssubstrat wurden dagegen nicht gefunden, so dass dieser in vorliegender Arbeit erstmals beschrieben wird.

Diese Erkenntnisse weisen eine außerordentliche Praxisrelevanz auf, da an Standorten, die mit Chloorethenen kontaminiert sind, meist beide Substanzen als Ausgangsschadstoff oder Produkt der reduktiven Dechlorierung vorhanden sind. Folglich stellt ein gemeinsamer Abbau eine vielversprechende Lösung zur mikrobiologischen Sanierung dar.

4.2.3.2 Auswirkungen des cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnisses

In Hinblick auf eine praktische Anwendung wurde ermittelt, wie viel cDCE pro Mengeneinheit TCE in den Mikrokosmen umgesetzt wurde. Das molare Verhältnis von abgebauter Menge des Co-Substrats zu abgebauter Menge des Primärsubstrats ist eine wichtige Größe des co-metabolischen Abbaus. Sie wird als Transformationsumsatz T_y' bezeichnet und dient in der Praxis insbesondere zur Abschätzung der benötigten Menge eines Wachstumssubstrats (Alvarez-Cohen und Speitel 2001). Zur Berechnung wurden die Konzentrationsabnahmen in den Mikrokosmen mit parallelem Abbaumuster jeweils nach Start bis zur Stagnation sowie nach Aufdosierung herangezogen und die abgebaute cDCE-Menge durch die in der gleichen Zeit abgebauten TCE-Menge geteilt. Am Beispiel von Abbildung 26 wurde ein T_y' -Wert aus den Umsatzmengen bis Tag 210 und ein weiterer T_y' -Wert aus dem Zeitraum nach Aufdosierung bis zu Versuchsende ermittelt.

Tabelle 12: Transformationsumsätze T_y' des co-metabolischen cDCE-Abbaus aus der Literatur

Primärsubstrat	T_y' Quellenangabe [cDCE/Primärsubstrat]	T_y' umgerechnet [mol cDCE/mol Primärsubstrat]	Quelle
Methan	0,058	mol/mol	0,058
Benzol	4,6	µg/mg	0,0037
Chlorbenzol	2,1	µg/mg	0,0024
1,2-Dichlorbenzol	2,1	µg/mg	0,0032
1,3-Dichlorbenzol	1,7	µg/mg	0,0026
VC (25°C)	4,9	% (mol/mol)	0,049
VC (17°C)	2,8	% (mol/mol)	0,028
Ethen	0,51	mg/mg	0,15
Ammonium	45	mol/mol ($1/T_y'$)	0,022
Trichlorethen			0,0019 – 0,98 Diese Arbeit

Die mit SF-Wasser beimpften Mikrokosmen von Standort 4 zeigten ebenfalls einen cDCE-Rückgang, wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Hier ist in einigen Fällen der molare Umsatz von cDCE größer als der von TCE, so dass sich T_y' -Werte > 1 ergeben. Teils verlief der cDCE-Abbau auch nicht parallel zur TCE-Abnahme, was auch in Abbildung 25 sichtbar ist und in einem weiteren

Beispiel in Abbildung 28 gezeigt wird. Diese Beobachtungen sprechen gegen einen co-metabolischen cDCE-Abbau und unterstreichen die Schlussfolgerung, dass durch die Zugabe von SF-Wasser neben dem aerob-metabolischen TCE-Abbau auch der aerob-metabolische cDCE-Abbau stimuliert wurde.

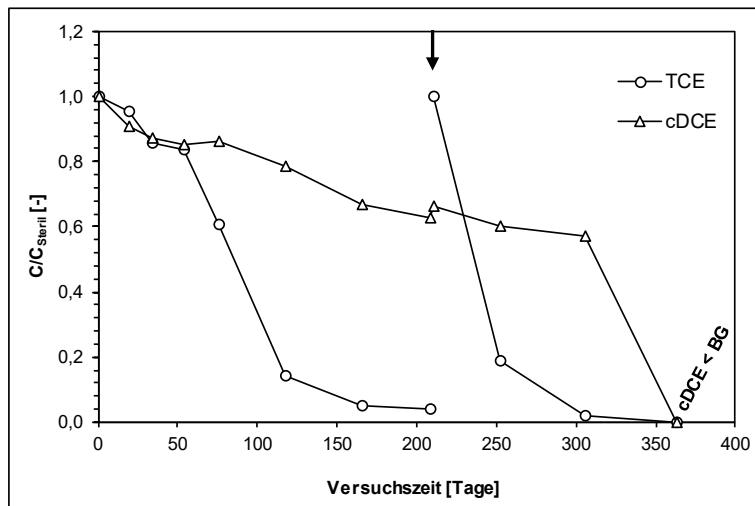


Abbildung 28:

Versetzter Abbau von TCE und cDCE in einem Mikrokosmos von Standort 4 mit SF-Wasser (GWM17/17). TCE wurde an Tag 210 nachdosiert (→)

Die berechneten T_y' -Werte aus den Mikrokosmen ohne Inokulum sowie mit Anreicherungskultur lagen zwischen 0,0019 und 0,98 und damit in einem breiten Spektrum im Vergleich zu Literaturangaben, in denen meist Einzelwerte für den co-metabolischen cDCE-Abbau mit verschiedenen Primärsubstraten zu finden sind (Tabelle 12). Eine Auswertung hinsichtlich des breiten Konzentrationsbereichs von TCE und cDCE, der in den Mikrokosmenversuchen abgedeckt wurde (siehe Tabelle 6), ergab einen linearen Zusammenhang der ermittelten T_y' -Werte mit dem cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnis zu Versuchsbeginn bzw. nach Aufdosierung (Abbildung 29). Demnach wurde umso mehr cDCE pro molare Einheit TCE umgesetzt, je größer das molare cDCE/TCE-Verhältnis war.

Obwohl die meisten der in Tabelle 12 aufgelisteten Studien einen Konzentrationsbereich für beide Substrate in ihren Versuchen angaben, wurde kein direkter Zusammenhang mit dem Transformationsumsatz hergestellt, jedoch deuten einige Arbeiten darauf hin. Anderson und McCarty (1997) ermittelten bei der Untersuchung des co-metabolischen Abbaus verschiedener Chloorethene mit Methan als Wachstumssubstrat die maximalen T_y' -Werte meist bei den höchsten Chloorethenkonzentrationen und den niedrigsten Methankonzentrationen. Dolan und McCarty (1995) beschreiben ebenfalls steigende T_y' -Werte mit zunehmender VC-Konzentration und konstantem Methangehalt für den co-metabolischen VC-Abbau mit Methan als Primärsubstrat. Kocamemi und Çeçen (2010),

die den co-metabolischen TCE-Abbau mit Ammonium als Wachstumssubstrat untersuchten, stellten einen linearen Zusammenhang zwischen dem Transformationsumsatz und dem Konzentrationsverhältnis fest. Sie gaben einen Faktor von 0,0038 an, der im Vergleich zu der in dieser Arbeit ermittelten Konstante von 0,41 (Abbildung 29) deutlich kleiner ist und durch die Molekülstrukturen von TCE und Ammonium erklärt werden könnte, die sich im Gegensatz zu den verwandten Strukturen von cDCE und TCE mehr unterscheiden.

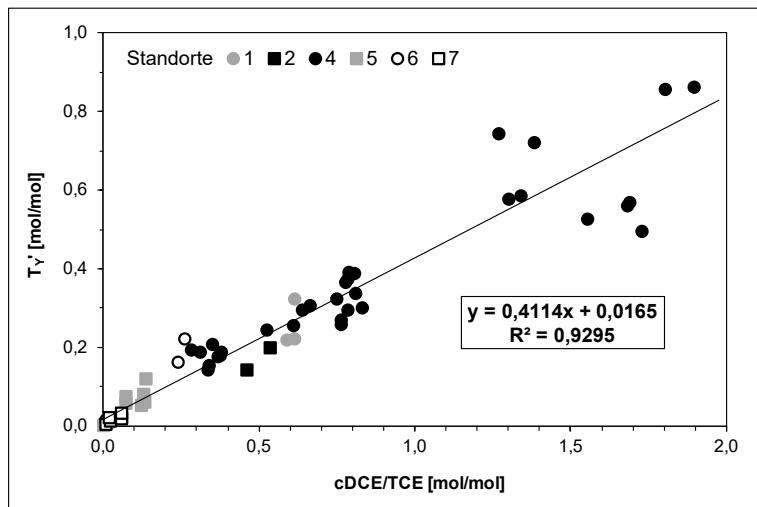


Abbildung 29:

Linearer Zusammenhang zwischen dem molaren Transformationsumsatz T_y' (cDCE/TCE) und dem molaren cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnis zu Versuchsbeginn bzw. nach Aufdosierung in den Mikrokosmen

Um die Beziehung zwischen dem Transformationsumsatz und dem Konzentrationsverhältnis deutlicher zu veranschaulichen und sie mit der Abbauleistung zu verknüpfen, zeigt Abbildung 30 die abgebaute TCE- und cDCE-Menge prozentual zur Ausgangskonzentration (oben) sowie die absoluten Konzentrationsänderungen (unten) mit den entsprechenden T_y' -Werten für drei Konzentrationsverhältnisse. Das erste Beispiel repräsentiert ein sehr kleines cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnis mit entsprechend niedrigem Transformationsumsatz T_y' , so dass nur wenig cDCE pro molare Mengeneinheit TCE co-metabolisch abgebaut wird, was jedoch zu einer vollständigen Entfernung des vergleichsweise gering cDCE-Gehalts führen kann. Im zweiten Beispiel mit annähernd gleichen molaren Anteilen von cDCE und TCE wird mit einer Mengeneinheit TCE etwas weniger als die halbe Mengeneinheit cDCE abgebaut, wobei etwa die Hälfte der ursprünglichen cDCE-Menge als Restkonzentration verbleibt. Das dritte Beispiel enthält fast doppelt so viel cDCE wie TCE, was mit einem hohen T_y' -Wert verbunden ist. Folglich wird beim aerob-produktiven TCE-Abbau fast so viel cDCE wie TCE co-metabolisch umgesetzt, was jedoch zu einer geringeren prozentualen cDCE-Abnahme führt.

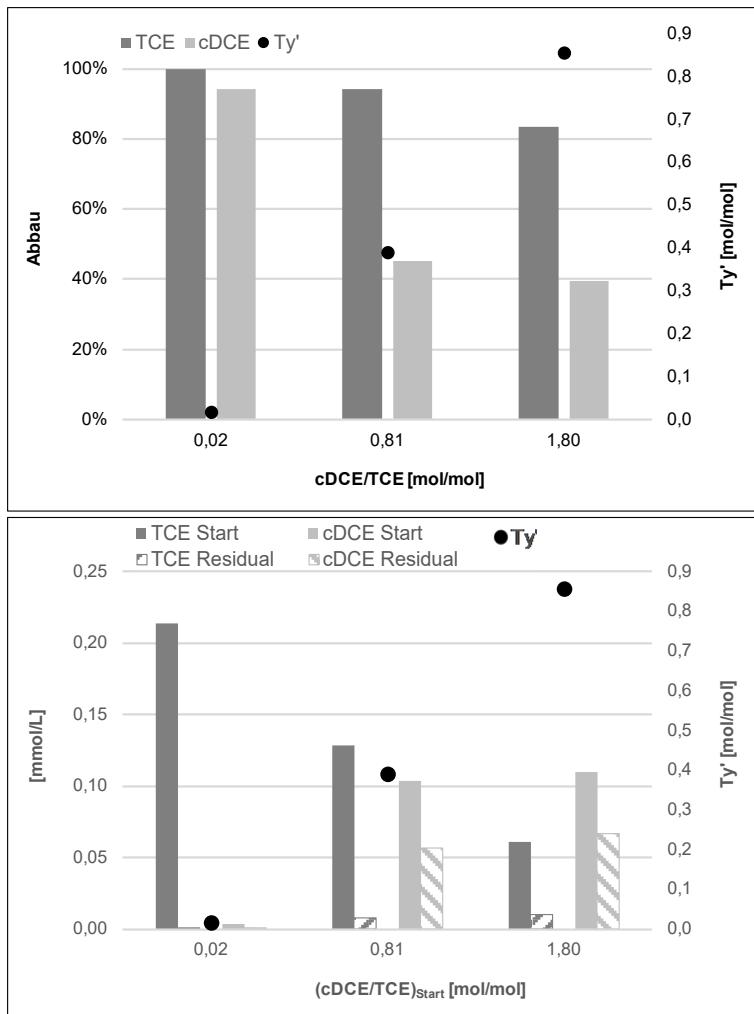


Abbildung 30:

cDCE- und TCE-Abbau prozentual zur Ausgangskonzentration (oben) sowie absolute Konzentrationsänderungen (unten) für drei verschiedene Konzentrationsverhältnisse mit den entsprechenden Ty'-Werten.

Anhand der drei Beispiele in Abbildung 30 ist außerdem erkennbar, dass mit steigendem cDCE-Gehalt im Vergleich zur TCE-Konzentration der abgebauten TCE-Anteil immer weiter abnimmt. Daraufhin wurde ein weiterer linearer Zusammenhang mit dem cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnis hergestellt, der in Abbildung 31 dargestellt ist und belegt, dass der unvollständige TCE-Abbau, der bereits in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 beschrieben wurde, auf die Anwesenheit von cDCE zurückzuführen ist. Folglich hat cDCE eine hemmende Wirkung auf den aerob-produktiven TCE-Abbau, was zu einer Verlangsamung und zu Restkonzentrationen führt, die stark vom cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnis zu Versuchsbeginn abhängen. Gaza et al. (2019) stellten bei der Untersuchung des aerob-metabolischen TCE-Abbaus in Gegenwart äquimolarer Konzentrationen anderer Chlorethene eine vollständige Hemmung durch VC und 1,1DCE fest, jedoch nicht durch cDCE. In vorliegender Arbeit wurde ebenfalls keine vollständige Hemmung beobachtet. TCE

wurde in Anwesenheit von cDCE zwar nicht bis unter die Bestimmungsgrenze, aber substantiell abgebaut.

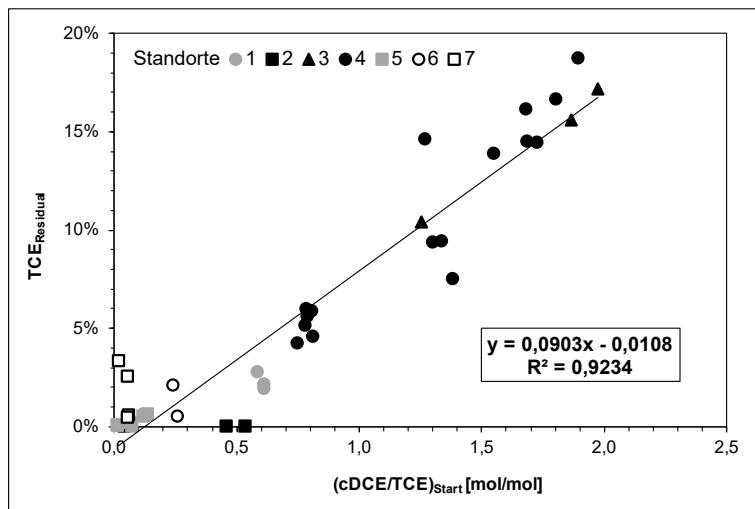


Abbildung 31:

Linearer Zusammenhang zwischen TCE-Restkonzentrationen nach Stagnation des Abbaus und dem molaren cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnis in den Mikrokosmen zu Versuchsbeginn

Aus der Literatur ist eine hemmende Wirkung von Chlorethenen auch für Abbauprozesse anderer Wachstumssubstrate bekannt. Bei der Untersuchung des co-metabolischen VC-Abbaus mit Methan als Primärsubstrat beobachteten Freedman et al. (2001) eine Verlangsamung des Methanabbaus durch VC. Ähnlich beschreiben Kocamemi und Çeçen (2005) eine hemmende Wirkung von TCE auf die Abbaurate von Ammonium in Versuchen zum co-metabolischen TCE-Abbau in nitrifizierenden Systemen. Zhao et al. (2010) untersuchen den aerob-metabolischen cDCE-Abbau in Anwesenheit anderer Chlorethene. Während PCE, tDCE und VC den Abbau verlangsamen, führten 1,1DCE und TCE zu einer vollständigen Hemmung. Bei der Prüfung unterschiedlicher VC-Konzentrationen wurde ebenfalls ein Zusammenhang mit dem Konzentrationsverhältnis festgestellt. Steigende VC-Gehalte verlangsamen den cDCE-Abbau zunehmend, wobei hier beide Substanzen aerob-produktiv umgesetzt wurden. Eine vollständige Hemmung in Anwesenheit von 1,1DCE wird auch von Verce et al. (2002) für den aerob-metabolischen VC-Abbau berichtet. Bei der Untersuchung des co-metabolischen cDCE-Abbaus mit VC als Primärsubstrat beobachteten sowohl Verce et al. (2002) als auch Zhao et al. (2010) eine Verlangsamung des VC-Abbaus in Gegenwart von cDCE. Außerdem setzte der co-metabolische cDCE-Abbau in beiden Untersuchungen erst ein, nachdem der größte Teil der verfügbaren VC-Menge gezehrt war. Ähnliche Beobachtungen wurden auch in dieser Arbeit gemacht. In einigen Mikrokosmen der Standorte 2, 5 (GWM2981 und GWM2983) und 7, in denen die molare TCE-Konzentration ein Vielfaches der molaren cDCE-Menge betrug, setzte der co-metabolische cDCE-Abbau erst nach einer gewissen TCE-Abnahme ein (Abbildung 32).

Frascari et al. (2006) stellten bei Untersuchungen des co-metabolischen cDCE-Abbaus mit VC ebenfalls eine hemmende Wirkung durch das Primärsubstrat fest. Der cDCE-Abbau stagnierte bei jeder VC-Zugabe und setzte erst nach einer gewissen VC-Abnahme wieder ein. Verce et al. (2002) beobachteten den co-metabolischen cDCE-Abbau mit VC ebenfalls erst nach fast vollständiger Zehrung des Wachstumssubstrats. Eine gegenseitige Verlangsamung der Abbauraten beider Substrate wurde auch von Frascari et al. (2008) bei der Modellierung des co-metabolischen cDCE-Abbaus mit Propan als Wachstumssubstrat beschrieben.

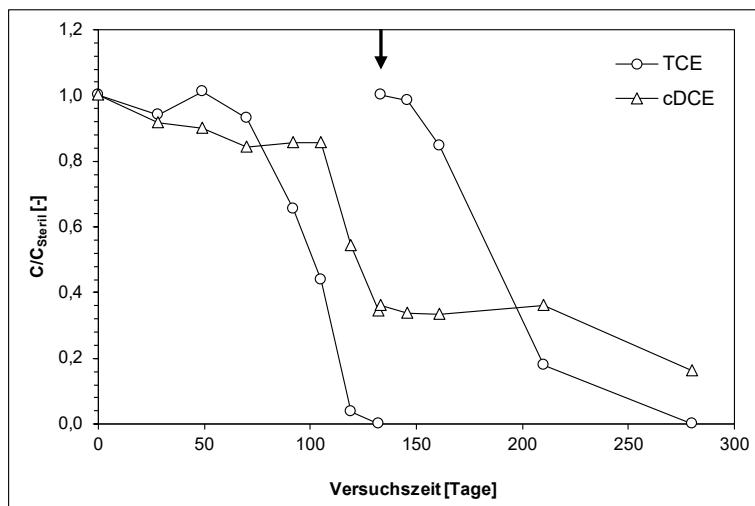


Abbildung 32:

Verzögerung des co-metabolischen cDCE-Abbaus in einem Mikrokosmos mit $C_{\text{TCE}} \gg C_{\text{cDCE}}$ von Standort 5 (GWM2981) auch nach TCE-Dosierung (↓)

In vorliegender Arbeit wurde somit nicht nur TCE als Wachstumssubstrat für den co-metabolischen cDCE-Abbau aufgedeckt, sondern auch Transformationsumsätze des Abbaus ermittelt sowie wechselwirkende Effekte aufgezeigt. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass sowohl die Transformationsumsätze als auch die Wechselwirkungen maßgeblich vom Konzentrationsverhältnis der Schadstoffe abhängen.

Diese Erkenntnisse leisten einen wichtigen Beitrag zur Grundwassersanierung und insbesondere zur Bewertung der Wirksamkeit biologischer Abbauprozesse. Zusammen mit den Befunden aus der Literatur unterstreichen die Ergebnisse, dass bei der Untersuchung von Abbauprozessen an kontaminierten Standorten andere Schadstoffe und ihre Auswirkungen auf die einzelnen Abbauraten zu berücksichtigen sind.

4.3 Biomonitoringmethoden

4.3.1 Weiterentwicklung einer MPN-Methode

4.3.1.1 Vorversuche zur Substratmenge

Für die Entwicklung einer spezifischen MPN-Methode zum Nachweis der Organismen, die TCE aerob-metabolisch umsetzen, wurden zunächst Vorversuche zur Ermittlung einer geeigneten Substratmenge durchgeführt. Getestet wurde die Zugabe von 250 µL und 50 µL TCE. Die für das Medium in den Mikrotiterplatten errechneten Konzentrationen (nach Gleichung (3), siehe Kapitel 3.4.1.1) sowie die analytischen Ergebnisse der Dreifachbestimmung nach verschiedenen Inkubationszeiten sind in Tabelle 13 dargestellt.

Die Messergebnisse zeigen, dass sich TCE im Medium der drei Mikrotiterplatten im Exsikkator gleichmäßig gelöst hat. Folglich hat sich die Zugabe des Substrats über die Gasphase als zielführend erwiesen, wie bereits für andere leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe wie Toluol oder Naphtalin gezeigt (Bushnell und Haas 1941; Hanzel et al. 2011; Wallenius et al. 2012). Zum Nachweis aeroben VC- und cDCE-Verwerter liegen bisher keine veröffentlichten MPN-Methoden vor, die als Vergleich dienen könnten.

Tabelle 13: Ergebnisse der MPN-Vorversuche zur Substratmenge

TCE-Zugabe [µL]	Exsikkator- Volumen [L]	TCE berechnet (Henry) [mg/L]	Inkubation:	TCE [mg/L]			
				1 d	1 Woche	3 Wochen	6 Wochen
250	2,5	340,68	Platte a:	134	57	29	18
			Platte b:	132	47	32	18
			Platte c:	128	48	26	19
	5	177,93	Platte a:	97	43	30	20
			Platte b:	97	47	29	19
			Platte c:	93	55	26	20
50	2,5	68,14	Platte a:	28	12	5	3
			Platte b:	28	11	5	3
			Platte c:	27	11	5	3
	5	35,59	Platte a:	15	9	5	3
			Platte b:	17	9	5	3
			Platte c:	15	8	4	3

Die Daten zeigen auch, dass die gemessenen TCE-Konzentrationen deutlich unter den errechneten Werten lagen. Außerdem unterscheiden sich die Konzentrationen zwischen den beiden Exsikkatorvolumina nach einer Woche nur noch geringfügig. Dies könnte auf Sorptionsprozesse mit dem Kunststoff der Mikrotiterplatten und dem Exsikkatorfett zurückgeführt werden. Weiterhin sind Verluste während dem Öffnen des Exsikkators, der Entnahme der Platten und dem Medium zur Schadstoffanalytik zu berücksichtigen. Bei MPN-Ansätzen mit leichtflüchtigen Monoaromaten

wurden ebenfalls niedrigere Messwerte im Vergleich zu den berechneten Werten beobachtet und als Ursache Sorption in die Platten und verwendeten Plastikboxen sowie Verflüchtigung aufgeführt (Johnsen und Henriksen 2009). Eine genaue Dosierung ist mit dieser Methode demnach erschwert.

Die optimale Substratmenge für MPN-Ansätze fördert das Wachstum der abbauaktiven Organismen bestmöglich und liegt in einem Konzentrationsbereich, der das Wachstum weder durch einen Mangel bei zu niedrigen Konzentrationen noch durch Toxizität bei zu hohen Konzentrationen einschränkt (Wallenius et al. 2012). Bei Zugabe von 250 µL TCE lag die berechnete Konzentration sowie die analytischen Werte nach einem Tag für beide Exsikkatorgrößen weit über der TCE-Konzentration von 53 mg/L. Bis zu dieser Menge haben Gaza et al. (2019) bei Versuchen zum Konzentrationsbereich des aerob-metabolischen TCE-Abbaus noch einen Abbau beobachten können. Nach einer Woche sinken die gemessenen Konzentrationen in den meisten Platten unter diesen Schwellenwert. Zuvor ist von einer toxischen Wirkung für die abbauaktiven Mikroorganismen auszugehen. Bei einer Zugabe von 50 µL TCE zeigen die Ergebnisse, dass die Konzentration von 53 mg/L nicht überschritten wird und auch nach sechs Wochen noch Substrat im Milligrammbereich vorhanden ist. Die TCE-Menge zieht also keine toxische Wirkung nach sich und ist auch für lange Inkubationszeiten geeignet. Darüber hinaus sind durch die Inkubation bei Raumtemperatur, die Sauerstoffverfügbarkeit durch den Luftsauerstoff in der Gasphase des Exsikkators sowie die Verwendung des Mediums mit neutral eingestelltem pH-Wert optimale Wachstumsbedingungen für die TCE-verwertenden Organismen sichergestellt (Gaza et al. 2019).

4.3.1.2 Vorversuche zur Inkubationszeit und Detektionsmethode

Mit der in den Vorversuchen zur Substratmenge als geeignet ermittelten Menge von 50 µL TCE wurden anschließend verschiedene Inkubationszeiten und Auswertemethoden getestet. Die Keimzahlen der vier abbauaktiven Kulturen (SV1-SV4) wurden nach zwei, vier, sechs, acht und zehn Wochen Inkubation jeweils anhand der Trübung und anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® ermittelt und sind in Abbildung 33 als Balken aufgetragen. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse sind die Mittelwerte der Keimzahlentwicklung eingezeichnet.

Die Auswertung anhand der Trübung zeigt, dass eine Inkubationszeit von mindestens sechs Wochen für einen Nachweis der TCE verwertenden Bakterien notwendig ist. Bei kürzeren Inkubationszeiten liegen fast alle Ergebnisse unterhalb der Bestimmungsgrenze. Nach zehn Wochen ist im Vergleich der Einzelergebnisse noch ein deutlicheres Wachstum sichtbar. Drei der vier Proben liegen noch eine Log-Stufe höher. Dagegen konnten anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® alle Kulturen nur nach zwei und zehn Wochen detektiert werden. Da die meisten

Ergebnisse nach vier und sechs Wochen unter der Bestimmungsgrenze liegen, ist bei den Daten nach zwei Wochen von einer Kontamination auszugehen, die vermutlich bei Zugabe des Farbstoffs PrestoBlue® eingetragen wurde und zu einem fälschlich positiven Ergebnis geführt hat. Somit zeigen beide Auswertemethoden nach zehn Wochen die deutlichsten Ergebnisse.

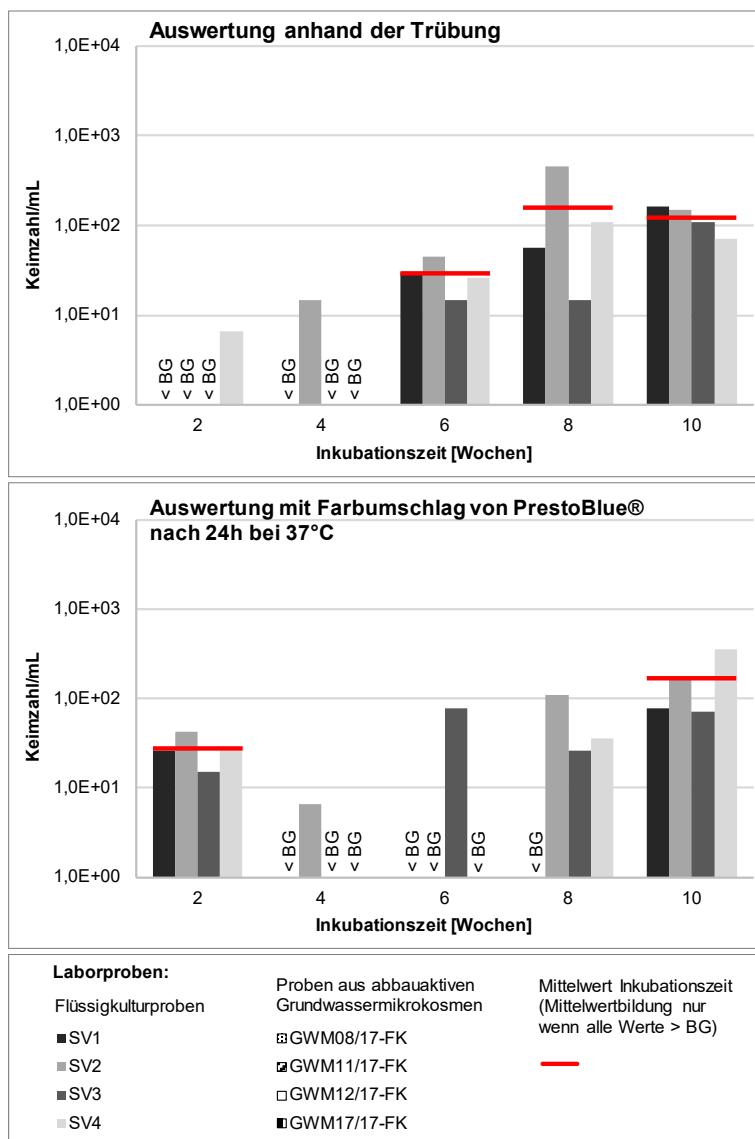


Abbildung 33:

Ergebnisse der MPN-Vorversuche zur Inkubationszeit mit Auswertung anhand der Trübung (oben) und anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® nach 24h Einwirkzeit bei 37°C (unten).

Die Inkubationszeiten bei MPN-Methoden anderer stoffwechselphysiologischer Gruppen sind im Vergleich bedeutend kürzer und in Abbildung 34 veranschaulicht. So werden nitrifizierende Organismen zwei bis drei Wochen inkubiert (Alexander und Clark 1965; Rowe et al. 1977). Für anaerobe Nitrat-Reduzierer sind ein bis zwei Wochen angegeben (Alexander 1965; Focht und Joseph 1973), für Sulfat- und Eisen-Reduzierer zwei bzw. vier Wochen (Gould et al. 2003; Stilinovic und Hrenovic 2004). Protokolle für aerobe PAK-Abbauer beinhalten Inkubationszeiten von sieben bis

30 Tagen (Johnsen et al. 2002; Johnsen und Henriksen 2009; Stieber et al. 1994). Für die Inkubation von Alkan-Verwertern (*n*-Hexadekan) ist eine Angabe von zwei Wochen (Wrenn und Venosa 1996) und für Verwerter der Monoaromaten Phenol sowie der chlorierten Verbindung Chlorbenzoësäure drei bis zehn Tage zu finden (DiGeronimo et al. 1977).

Die lange Inkubationszeit der aerob TCE-verwertenden Bakterien von zehn Wochen ist nach Ermittlung der Verdopplungszeit, die im Vergleich zu anderen Schadstoff-Verwertern ebenfalls deutlich länger ist (siehe Kapitel 4.2.1), plausibel. Durch ihr langsames Wachstum ziehen die Organismen für einen Nachweis durch Kulturverfahren auch lange Inkubationszeiten nach sich.

Dennoch war die Detektion des Bakterienwachstums in den Mikrotiterplatten mit den verschiedenen Auswertemethoden meist undeutlich. Trotz der langen Inkubationszeit war die Trübung sehr schwach ausgeprägt und der Farbumschlag von PrestoBlue® oft nicht vollständig. Die Trübung war mit dem Auge nur selten erkennbar und bei gemeinsamer Betrachtung mit geschultem Personal fiel die Auswertung je nach Person unterschiedlich aus. Die Subjektivität der visuellen Auswertung vor allem bei schwacher Trübung wurde auch von Johnsen und Henriksen (2009) betont.

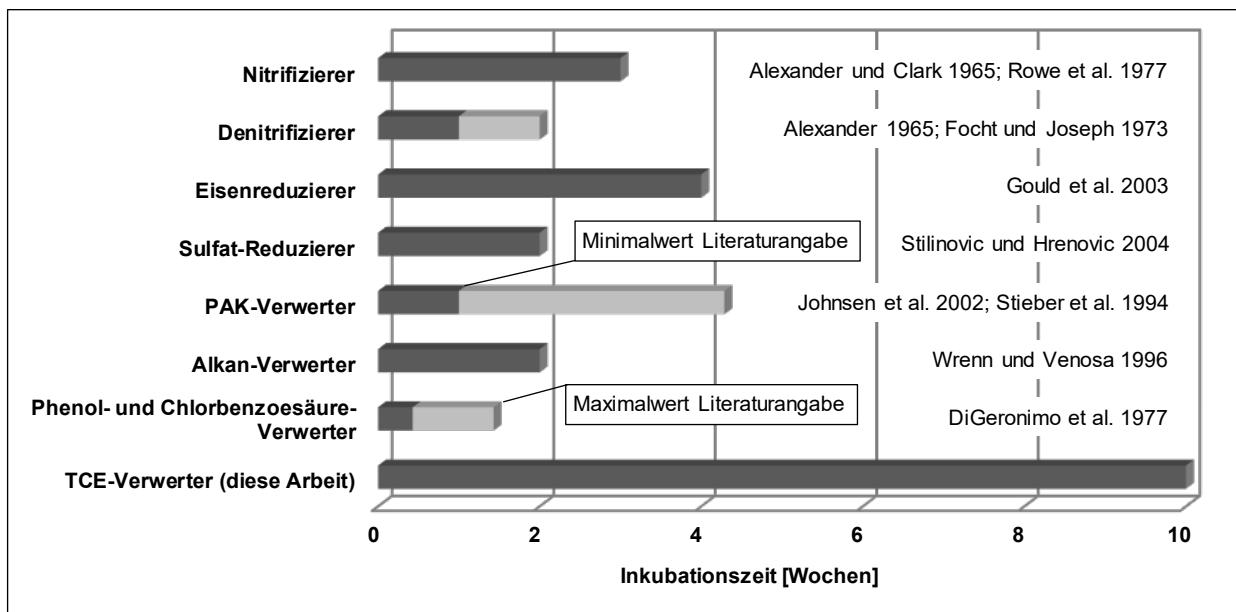


Abbildung 34: Inkubationszeiten bei MPN-Methoden verschiedener stoffwechselphysiologischer Gruppen

Für eine reproduzierbare und objektive Methode wurde die Trübung anhand der optischen Dichte photometrisch erfasst. Der Grenzwert zur positiven Bewertung der Röhrchen sollte idealerweise so festgesetzt werden, dass er über dem höchsten Absorptionwert der Negativkontrollen liegt und gleichzeitig die maximale Anzahl an Röhrchen mit Wachstum erfasst. Bei höheren Blindwerten,

die beispielsweise durch eine Hintergrundtrübung verursacht werden können, sollte der Grenzwert angepasst werden (Wallenius et al. 2012). In den Vorversuchen lagen die Absorptionswerte jedoch auch in der ersten Reihe der Mikrotiterplatten mit der unverdünnten Probe mit höchstens 0,045 nur sehr knapp über den Blindwerten des Mediums ohne Probe von $0,036 \pm 0,001$. Bei positiver Bewertung ab Überschreitung dieses Blindwertes und seiner Abweichung ($\geq 0,038$) wurde vermehrt Wachstum in Reihen hoher Verdünnungsstufen erfasst und damit Röhrchen falsch positiv ausgewertet. Folglich wurde der Grenzwert auf ein Minimum von 0,039 festgelegt. Bei exemplarischen Vergleichen mit der visuellen Auswertung wurden etwa ab diesem Wert auch Trübungen mit dem Auge erkannt. Folglich wurden alle Röhrchen einer Reihe mit Absorptionswerten $\geq 0,039$ positiv ausgewertet. Wenn der Blindwert einer Reihe höher lag, wurde dieser Wert als Grenzwert für die Reihe festgelegt. Dagegen wird von Johnsen (2017) bei Messung der optischen Dichte eine positive Bewertung ab Absorptionswerten von 0,1 vorgeschlagen und auch Wallenius et al. (2012) beobachteten ein wesentlich deutlicheres Wachstum mit Werten, die mehr als das Zehnfache des Blindwertes betragen.

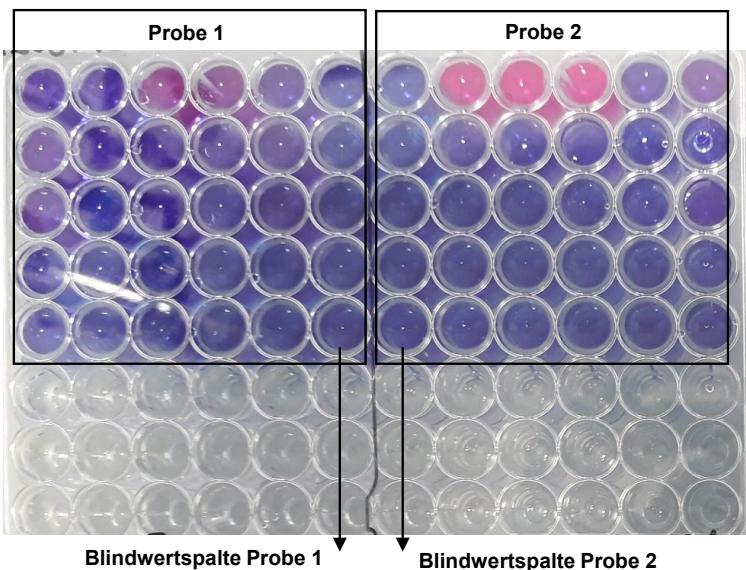


Abbildung 35:

MPN-Ansatz nach Zugabe und Inkubation des Farbstoffs PrestoBlue® (höchste Verdünnungsstufen nicht gefärbt) mit deutlichem Farbumschlag nach pink und leichtem Farbumschlag nach lila.

Als Alternative wurde die Auswertung anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® getestet, der photometrisch durch die Messung von zwei Wellenlängen erfasst wird. Dabei wird erst die Absorption bei der Wellenlänge des rötlichen Reaktionsprodukts gemessen und anschließend die Absorption bei der Wellenlänge des ursprünglich blauen Farbstoffs (Referenz) subtrahiert (Life Technologies Corporation 2010a). Ist der Messwert abzüglich des Referenzwertes größer Null, liegt ein Farbumschlag vor und das Röhrchen kann positiv bewertet werden. Wie bei der Auswertung anhand der Trübung lagen auch hier die Ergebnisse der ersten Reihe selbst bei den längeren

Inkubationszeiten noch häufig unter null, wobei mit dem Auge bereits ein Farbumschlag nach lila im Vergleich zu den blauen Blindwerten sichtbar war (Abbildung 35). Erneut diente ein exemplarischer Vergleich durch visuelle Auswertung zur Festlegung eines einheitlichen Grenzwertes von -0,25, der ggf. wie für die Trübung beschrieben angepasst wurde. Für die Auswertung mit einem anderen Farbstoff nach dem gleichen Messprinzip sind dagegen Grenzwerte über Null von 0,050 und 0,030 zu finden (Johnsen 2017; Johnsen et al. 2002).

Vor allem bei MPN-Methoden für Kohlenwasserstoff-Verwerter wird die Auswertung mit einem Farbstoff angewendet (DiGeronimo et al. 1977; Haines et al. 1996; Johnsen 2017; Johnsen et al. 2002; Johnsen und Henriksen 2009; Wallenius et al. 2012). PAK-Abbauer werden teils auch anhand farbiger Abbauprodukte nachgewiesen (Stieber et al. 1994; Wrenn und Venosa 1996). Die Anwesenheit von Sulfat-reduzierenden Organismen ist durch die schwarze Farbe der gebildeten Sulfide visuell ebenfalls gut erkennbar (Stilinovic und Hrenovic 2004). Eine weitere Detektionsmöglichkeit besteht im Nachweis des Abbauprodukts bzw. im Negativnachweis der Ausgangsstoff nach Inkubation. Mit Nitrit/Nitrat-Teststreifen, die in jedes Röhrchen getaucht werden, können Nitrifizierer anhand eines positiven Ergebnisses durch die Nitratbildung (Papen und Berg 1998) und Denitrifizierer anhand eines negativen Ergebnisses durch den Nitratverbrauch nachgewiesen werden (Focht und Joseph 1973). Für die TCE-verwertenden Bakterien wurde ebenfalls der Nachweis anhand des Abbauprodukts Chlorid in Betracht gezogen. Die Bestimmungsgrenze der im Handel erwerblichen Chlorid-Teststreifen lag jedoch bei mind. 30 mg/L (Firma Hach, Artikel-Nr. 2744940), so dass für einen Nachweis anhand der Chloridbildung mind. 37 mg/L TCE abgebaut werden müssten. Aufgrund dieser hohen Nachweisgrenze ist die Detektionsmethode für den Nachweis der aeroben TCE-Verwerter nicht geeignet und die Auswertung anhand der Trübung und des Farbumschlags wurde weiter getestet.

4.3.1.3 Versuche mit Laborproben

Anhand abbauaktiver Laborproben wurde die in den Vorversuchen ermittelte Inkubationszeit von zehn Wochen nochmals im Vergleich zu einer kürzeren und einer längeren Inkubationszeit geprüft. Dabei wurde auch die gelöste TCE-Menge im Medium der Mikrotiterplatten zur Kontrolle der Substratmenge gemessen. Außerdem wurde getestet, ob eine längere Einwirkzeit des Reagens PrestoBlue® bei niedrigerer Temperatur deutlichere Ergebnisse erzielt. Die Keimzahlen der vier Flüssigkulturen (SV1-SV4) sowie der vier Grundwassermikroskopien-Proben (GWM08/17-FK, GWM11/17-FK, GWM12/17-FK und GWM17/17-FK) wurden nach acht, zehn und zwölf Wochen Inkubationszeit jeweils anhand der Trübung und des Farbumschlags von PrestoBlue® nach 24 h und nach 7 d Einwirkzeit ermittelt und sind in Abbildung 36 mit den Mittelwerten dargestellt.

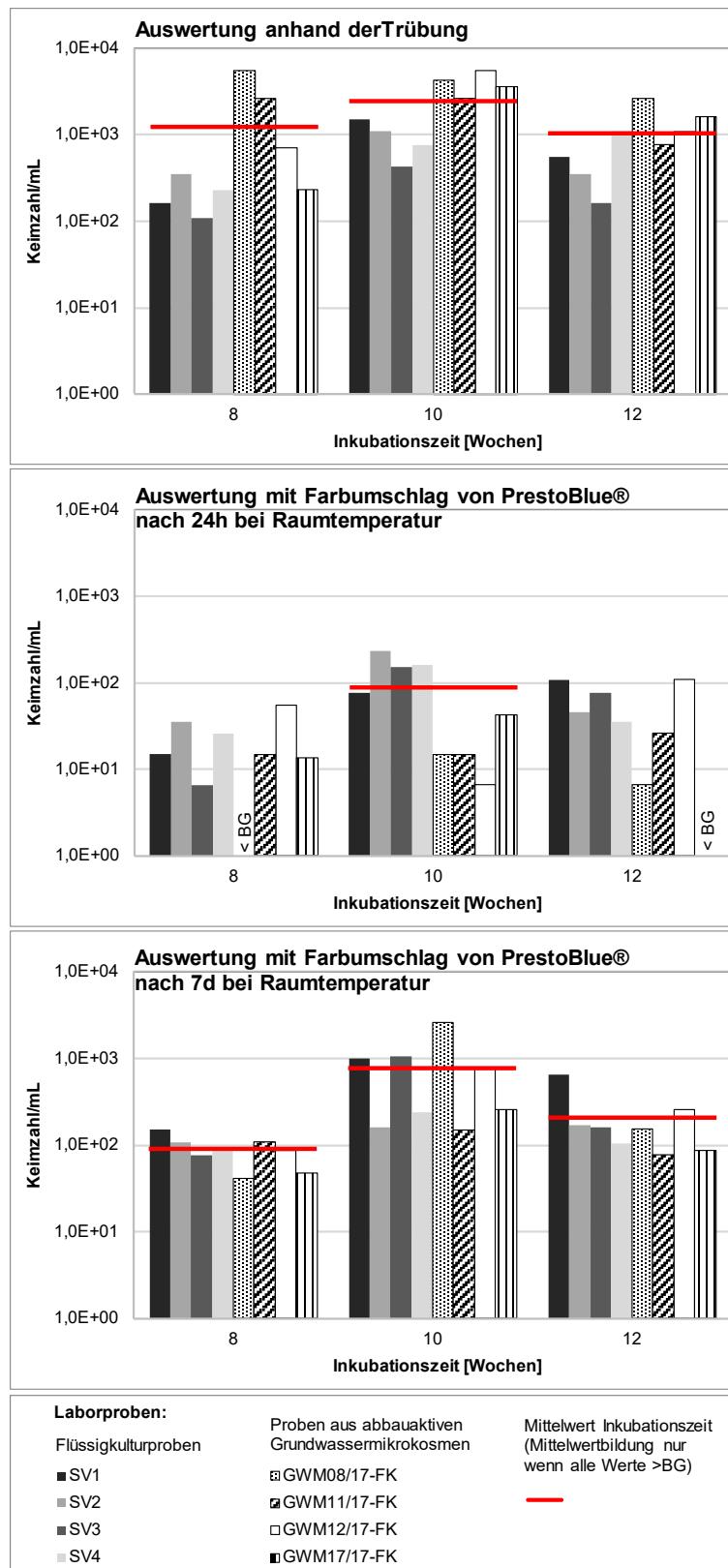


Abbildung 36:

Ergebnisse der MPN-Versuche mit Laborproben und Auswertung anhand der Trübung (oben) sowie anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® nach 24h (Mitte) und nach 7d Einwirkzeit bei Raumtemperatur (unten)

Die gemessene TCE-Konzentration in den Mikrotiterplatten betrug nach 8 Wochen 1,3 mg/L und nach zehn sowie zwölf Wochen jeweils 0,86 mg/L, so dass bei allen getesteten Inkubationszeiten bis zur Auswertung die Verfügbarkeit von ausreichend Wachstumssubstrat sichergestellt war.

Anhand der rot eingeziehenen Mittelwerte in Abbildung 36 wird deutlich, dass die größten Keimzahlen nach einer Inkubationszeit von zehn Wochen ermittelt wurden. Die längere Inkubationszeit von zwölf Wochen zeigt kein größeres Wachstum. Teils liegen die Werte wieder niedriger, so dass die Ergebnisse ein Optimum von zehn Wochen für die Methode bestätigen.

Die Einwirkzeit des Reagenz PrestoBlue® von 7 d bei Raumtemperatur (Abbildung 36, unten) erzielte bei den meisten Proben Keimzahlen um ein bis zwei Logstufen höher als nach einer Einwirkzeit von 24 h (Abbildung 36, Mitte). Hier lagen zwei Werte sogar unter der Bestimmungsgrenze. Die Inkubation ist folglich auch bei Raumtemperatur möglich, wobei die Einwirkzeit von sieben Tagen wesentlich deutlichere Ergebnisse zeigt. Bei dieser bedeutend längeren Einwirkzeit verglichen mit den Herstellerempfehlungen von maximal 24 h (Life Technologies Corporation 2010b) kann der Verdacht entstehen, dass die Mikroorganismen das Reagenz als Wachstumssubstrat nutzen und so ein falsch positives Ergebnis verursacht werden kann. In Anbetracht der heterozyklischen Struktur des Farbstoffs Resazurin (Abbildung 37), der auch in PrestoBlue® enthalten ist, kann eine mikrobiologische Abbaubarkeit nicht ausgeschlossen werden. Um den Verdacht auszuräumen, wurden daher Kontrollplatten mit einer abbauaktiven Kultur nur mit dem Reagenz als potenzielles Wachstumssubstrat und ohne TCE eine Woche inkubiert. Dabei wurde kein Farbumschlag festgestellt, der auf eine Umsetzung von PrestoBlue® durch die TCE-verwertenden Bakterien schließen könnte.

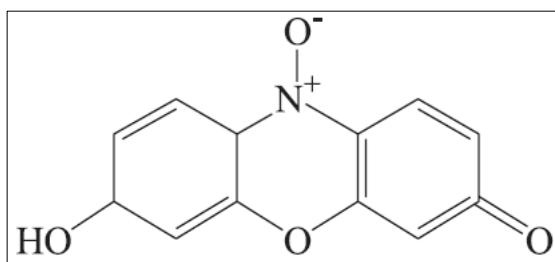


Abbildung 37:

Strukturformel des Farbstoffs Resazurin, der im Reagenz Presto-Blue® enthalten ist (Guerin et al. 2001)

Bisher liegt wenig Literatur zur Anwendung von PrestoBlue® zum Nachweis von Mikroorganismen vor. Guerin et al. (2001) haben den Farbstoff Resazurin, für MPN-Methoden verschiedener Kohlenwasserstoffverwerter getestet und mit der Trübungsbildung verglichen. Dabei wurden die Mikrotiterplatten bis zu 5,7 d mit Resazurin inkubiert. Die Studie hat gezeigt, dass vor allem bei schwacher Trübung deutlichere Ergebnisse und höhere Keimzahlen bei Auswertung anhand des Farbumschlags erzielt werden können. Lall et al. (2013) haben die Zellviabilität verschiedener

bakterieller Krankheitserreger u. a. mit PrestoBlue® untersucht. Dabei wurde der Farbumschlag nach etwa 3 h gemessen und war teils direkt nach Zugabe sichtbar. Organismen mit vergleichsweise langsamen Wachstum (*M. tuberculosis*) zeigten nach 3 h einen leichten Farbumschlag nach lila und wurden für ein deutlicheres Ergebnis anhand eines Farbumschlags nach pink bis zu 24 h inkubiert. Dies entspricht der maximal empfohlenen Inkubationszeit des Herstellers für niedrige Zellzahlen (Life Technologies Corporation 2010b). Verglichen mit dem verwendeten Stamm, für den Verdopplungszeiten von 17 bis 37 h zu finden sind (Dunn und North 1995; North und Izzo 1993; Silver et al. 1998), ist das Wachstum der aeroben TCE-Verwerter mit einer Verdopplungszeit von 24 d (siehe Kapitel 4.2.1) jedoch immer noch bedeutend langsamer, so dass auch eine längere Einwirkzeit für einen deutlichen Farbumschlag erforderlich ist.

4.3.2 Entwicklung einer PCR-Methode

4.3.2.1 Mikrobiomanalyse und Primerentwicklung

Die Ergebnisse der Mikrobiomanalyse wurden im Rahmen des Partnerprojekts BioChlor (siehe Kapitel 1.1) ausgewertet und vorliegender Arbeit zur Verfügung gestellt. Nach Einteilung der Sequenzierungsdaten in OTUs machte OTU 1 mit 14 % den größten Anteil in allen Proben aus und kann nach rRNA-Datenbank-Abgleich der Familie der *Rhodocyclaceae* zugeordnet werden. Vor allem die Flocken, die sich während der Kultivierung gebildet haben und ebenfalls sequenziert wurden (siehe Kapitel 4.1), zeigen hier mit bis zu 68 % einen besonders hohen Anteil. Folglich kann auf eine wesentliche Beteiligung der zu OTU 1 gehörenden phylogenetischen Gruppe am aerob-metabolischen TCE-Abbau geschlossen werden.

Ein Primerpaar für OTU 1 zeigte unter allen entwickelten und mittels Gradienten-PCR geprüften Primerpaaren auch die größte Spezifität auf:

Forward GGACGAAACGGTCAGCTCA
Reverse: GGTAAAGCCCGGGATTCA
Länge: 180 bp
Spez. Temp.: 63,4°C

Somit konnte für die am häufigsten vorkommenden Bakterien in den abbauaktiven Proben nicht nur eine taxonomische Zuordnung vorgenommen, sondern auch ein spezifischer PCR-Nachweis entwickelt werden.

In der Literatur werden Organismen aus der Familie *Rhodocyclaceae* mit dem Abbau verschiedener Monoaromaten und polzyklischer Kohlenwasserstoffe in Verbindung gebracht. Während die

meisten BTEX-Verbindungen von Bakterien dieser Familie vor allem unter Nitrat-reduzierenden Bedingungen umgesetzt werden können (Hess et al. 1997; Kasai et al. 2006; Rabus und Widdel 1995; Rotaru et al. 2010; van der Zaan et al. 2012), wurde für Benzol, Toluol und die PAK-Verbindungen Phenantren und Pyren auch ein aerober Abbau durch *Rhodocyclaceae*-Stämme nachgewiesen (Corteselli et al. 2017; Fries et al. 1994; Tancsics et al. 2018).

Die Morphologie dieser Bakterien wird meist als stäbchenförmig beschrieben (Fries et al. 1994; Hess et al. 1997; Song et al. 1999), die teils gekrümmt und in Paaren, kleinen Clustern, langen Ketten und mit extrazellulärem Material auftraten (Corteselli et al. 2017; Rotaru et al. 2010; Zhou et al. 1995). Diese Beschreibung trifft auch auf die in dieser Arbeit untersuchten Flocken zu (siehe Kapitel 4.1). Die Flockenbildung wird ebenfalls als typisches Charakteristikum für bestimmte Organismen der Familie *Rhodocyclaceae* angegeben (Farkas et al. 2015; Shao et al. 2009).

Als Enzyme für den initialen Schritt des aeroben Aromaten-Abbaus durch *Rhodocyclaceae* wurden ring-hydroxilierende Dioxygenasen identifiziert, die den Benzol-Ring durch den Einbau von zwei Hydroxygruppen oxidieren (Regonne et al. 2013; Singleton et al. 2015; Singleton et al. 2012). Für den aerob-produktiven Chloorethenabbau werden als katalysierende Enzyme hauptsächlich Monooxygenasen beschrieben (Dolinová et al. 2017), der genaue Mechanismus ist jedoch nicht bekannt (siehe Kapitel 2.2.3). Nach den vorliegenden Untersuchungen könnte der aerob-metabolische TCE-Abbau durch Bakterien der Familie *Rhodocyclaceae* auf ähnliche Weise wie der von aromatischen Verbindungen initiiert werden. Womöglich spalten die selben Enzyme als ersten Schritt die Doppelbindung auf und bilden ein zweifach hydroxiliertes Zwischenprodukt, das in anschließenden Schritten mineralisiert wird. Zur Prüfung dieser Hypothese könnten weiterführende Untersuchungen abbauaktive Proben gezielt auf die entsprechenden Enzyme untersuchen und so zum Prozessverständnis des vergleichsweise neuen Abbauweges für TCE beitragen.

4.3.2.2 Versuche mit Laborproben

Der auf Grundlage der Mikrobiomanalyse entwickelte PCR-Nachweis wurde nachfolgend anhand von Laborproben getestet und auf Rückstellproben der Grundwassermikrosomen von Standort 5 und 7 angewendet. Für zwei Beispiele ist das PCR-Ergebnis der drei Probenahmepunkte zu Versuchsbeginn, -mitte und -ende in Abbildung 38 über den TCE-Konzentrationsverlauf aufgetragen.

Im ersten dargestellten Beispiel (Abbildung 38, oben) lag das Messergebnis zu Versuchsstart noch unter der Bestimmungsgrenze und nach dem wiederholten TCE-Abbau von jeweils ca. 30

mg/L zu Versuchsmitte und –ende in der Größenordnung 10^3 Kopien/mL. In einigen anderen Ansätzen wurde das Messergebnis trotz substantiellem TCE-Umsatz zum mittleren Probenahmezeitpunkt erst zu Versuchsende positiv (Abbildung 38, unten), so dass der Zusammenhang zwischen TCE-Abbau und PCR-Messwert nicht immer deutlich war. Insgesamt konnte in den Ansätzen der Messstellen GWM2981 und GWM2984 mit TCE-Umsätzen von mind. 25 mg/L zu mindestens einem Probenahmezeitpunkt ein PCR-Nachweis erbracht werden.

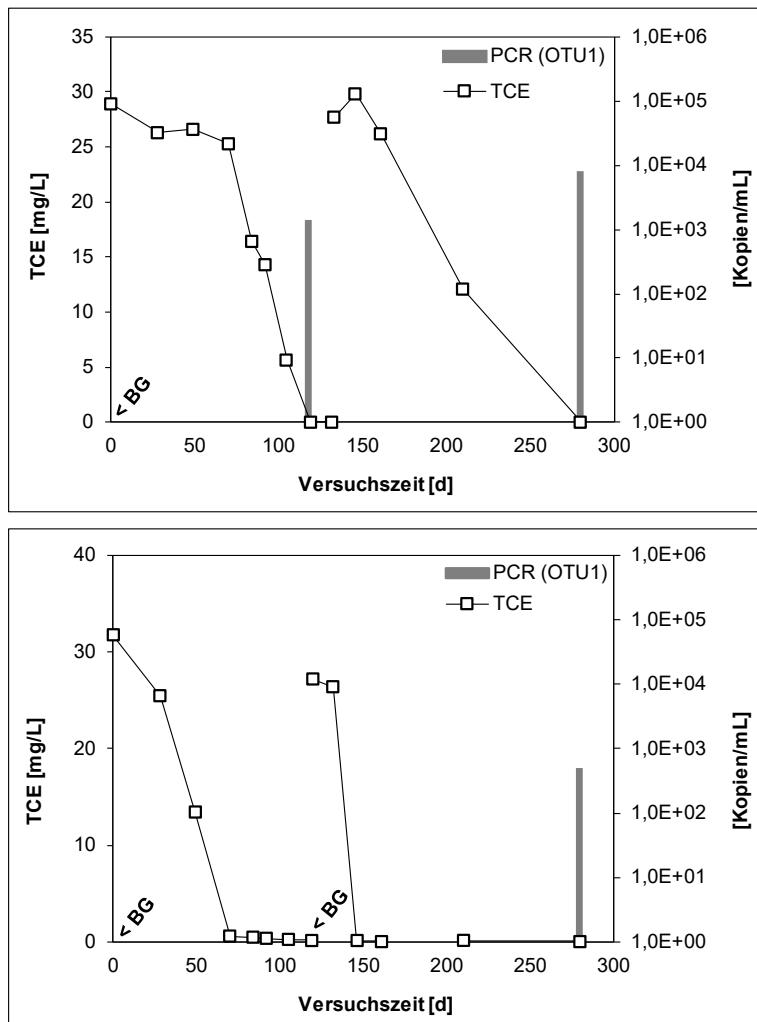
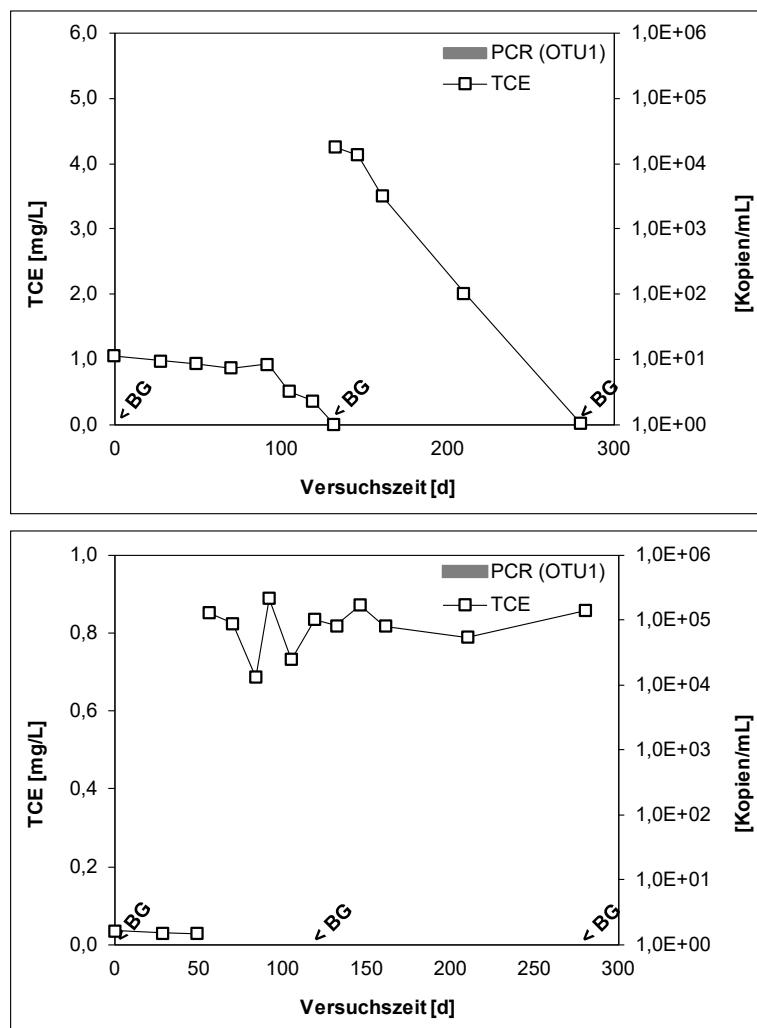


Abbildung 38:
PCR-Nachweis zu Versuchsmitte und -Ende in einem Mikrokosmos von Standort 5 (GWM2981) nach hohem TCE-Umsatz (oben), fehlender Nachweis zu Versuchsmitte in einem Mikrokosmos von Standort 5 (GWM2984) trotz hohem TCE-Umsatz (unten), „< BG“ bezieht sich auf das PCR-Ergebnis

Dagegen lagen die Ergebnisse der GWM2983- und PZ13-Mikrokosmen mit TCE-Umsätzen von maximal 5,5 mg/L bis auf eine Ausnahme zu allen Probenahmezeitpunkten unter der Bestimmungsgrenze (Abbildung 39, oben). Folglich war der TCE-Umsatz und das damit verbundene Bakterienwachstum zu gering, um es mit der Methode erfassen zu können. Der fehlende Nachweis im Ansatz der GWM2983 ohne Inokulum, der keinen Abbau der vergleichsweise geringen

TCE-Menge von ca. 1 mg/L zeigte, ist daher als Negativkontrolle für die Spezifität nicht aussagekräftig (Abbildung 39, unten). Zumindest lagen in allen Mikrokosmen die Ergebnisse zu Versuchsstart unter der Bestimmungsgrenze, so dass bei einem anschließenden Nachweis auf ein Wachstum durch den TCE-Abbau geschlossen werden kann.

Bei der Bewertung der Daten ist das vergleichsweise geringe Probenvolumen von 50 mL zu berücksichtigen, die für die Messung filtriert wurden. Bei den Mikrokosmenversuchen handelt es sich um Grundwasserproben, die für eine PCR-Messung normalerweise anhand wesentlich größerer Volumina von ca. 1 L untersucht werden, was aufgrund des Mikrokosmenvolumens von insgesamt 2 L nicht umsetzbar war.



Der erwähnte fehlende Nachweis zu Versuchsmitte in einigen Proben mit einem hohen TCE-Abbau (Abbildung 38, unten) ist womöglich ebenfalls auf das geringe Probenvolumen in Verbindung

mit der Flockenbildung der abbauaktiven Mikroorganismen zurückzuführen. Aufgrund der hierdurch entstandenen Inhomogenität in den Mikrokosmen könnte trotz TCE-Abbau die Zielsequenz in der entnommenen Probe unterrepräsentiert und erst nach weiterem Wachstum zu Versuchsende erfasst worden sein.

Vor diesem Hintergrund liefern die Daten erste orientierende Ergebnisse, nach denen ein Nachweis mit dem verwendeten Probenvolumen bei großen TCE-Umsatzmengen möglich ist. Bei einem fehlenden Nachweis ist folglich nicht unmittelbar auf ein nicht vorhandenes TCE-Abbaupotential zu schließen, sondern möglicherweise auf einen zu geringen TCE-Umsatz oder ein zu geringes Probenvolumen.

4.3.3 Validierung der Biomonitoringmethoden

4.3.3.1 Validierung mit Feldproben

Die biologische Aktivität wird an dem Standort, an dem der aerob-produktive TCE-Abbau in einem Pilottestfeld mit Sauerstoff stimuliert wird (vgl. Abbildung 16), anhand der Gesamtzellzahl (GZZ) mittels Flowzytometrie überwacht. Für die Validierung der Biomonitoringmethoden werden die Daten zum Vergleich mit den MPN-Ansätzen und PCR-Messungen der spezifischen Sequenz OTU 1 herangezogen und sind mit dem Sauerstoffgehalt zum Zeitpunkt der Probenahme in Abbildung 40 dargestellt. Als weiterer Vergleichsparameter dient der unspezifische PCR-Nachweis des universell in Bakterien vorhandenen 16S-rRNA-Gens (16S).

Die Ergebnisse zeigen einen spezifischen PCR-Nachweis (OTU 1) in vier der sechs Messstellen aus dem Pilottestfeld (B826, S2 tief, S2 flach und B808). Diese Messstellen weisen auch Gesamtzellzahlen um eine Log-Stufe und 16S-Werte um teils vier Log-Stufen höher als in den übrigen Messstellen des Testfeldes (ZB1, ZB2 und B805) sowie der Referenzmessstelle (B809A) auf, in denen das OTU 1-Ergebnis unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt. Der fehlende Nachweis in den Brunnen ZB1 und ZB2 trotz Sauerstoffkonzentrationen über 10 mg/L kann folglich auf die geringere Gesamtpopulation mit TCE-Verwertern, die vermutlich unterhalb der Bestimmungsgrenze vorhanden sind, zurückgeführt werden.

Messstelle B805 liegt zwar innerhalb des Pilottestfelds, scheint jedoch nicht effizient mit Sauerstoff versorgt zu werden. Bei einem Gehalt von lediglich 0,41 mg/L konnten sich womöglich keine TCE-Verwerter über die Bestimmungsgrenze der PCR-Messung hinaus entwickeln. Mit der MPN-Methode und Auswertung anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® konnte dagegen ein

Nachweis erbracht werden. Der 16S-Parameter weist hier mit Werten deutlich über den Ergebnissen der Brunnen ZB1 und ZB2 auch auf eine größere Gesamtpopulation hin. Bei den übrigen Messstellen ist der MPN-Nachweis anhand des Farbumschlags stimmig mit den OTU 1-Befunden.

Die MPN-Auswertung anhand der Trübung zeigt einen Nachweis in jeder Messstelle, sowohl im Pilottestfeld als auch außerhalb. Dabei sind die Keimzahlen in den Brunnen mit PCR-Nachweis und höherer Gesamzellzahl (B826, S2 tief, S2 flach und B808) ebenfalls höher. Der fehlende Negativnachweis ist durch eine Trübung der ersten Reihe in den MPN-Platten mit der unverdünnten Grundwasserprobe begründet. Womöglich ist durch Ausfällung von Phosphat des Phosphatgepufferten Mediums mit Magnesium oder Kalzium des Grundwassers eine Trübung verursacht und die Bildung durch die lange Inkubationszeit begünstigt worden. Die Annahme, dass die Trübung in den Ansätzen der Messstellen ohne PCR-Nachweis (ZB1, ZB2, B809A) auf abiotische Prozesse zurückzuführen sind, wird dadurch verstärkt, dass die anhand des Farbumschlags ermittelten MPN-Ergebnisse hier ebenfalls unter der Bestimmungsgrenze liegen.

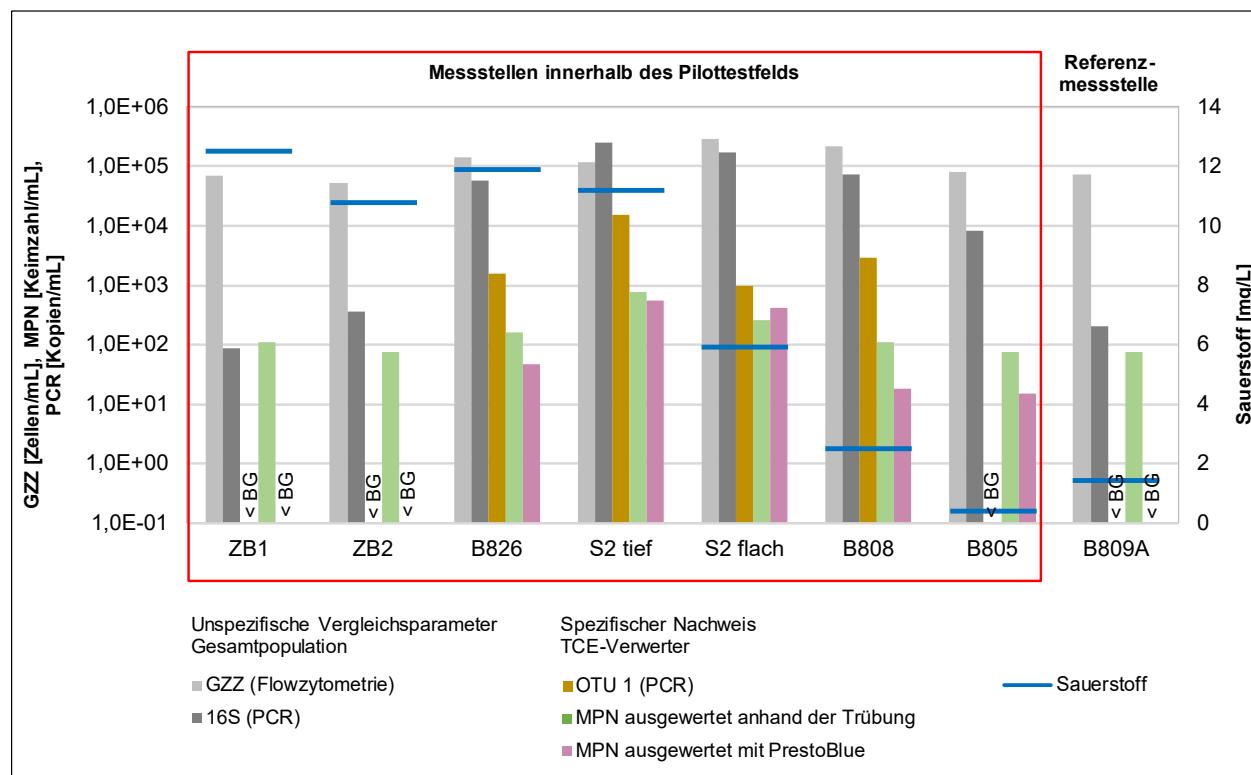


Abbildung 40: Ergebnisse zur Validierung der Biomonitoringmethoden mit Feldproben innerhalb und außerhalb des Pilottestfelds, in dem der aerob-metabolische Chloorethen-Abbau mit Sauerstoff stimuliert wird

Bei einer vergleichenden Betrachtung der getesteten Biomonitoringmethoden bildet das MPN-Verfahren mit Auswertung anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® die biologische Aktivität im Pilottestfeld am besten ab. Die niedrige Bestimmungsgrenze des Kulturverfahrens zeigt sich hier vorteilhaft gegenüber dem schnellen PCR-Nachweis. Orientierend an der GZZ liefert dieser ebenfalls vielversprechende Ergebnisse. Dabei könnten größere Probenvolumina noch geringere Bestimmungsgrenzen ermöglichen. Die MPN-Auswertung anhand der Trübung zeigt dagegen für Feldproben große Unsicherheiten.

4.3.3.2 Validierung mit Kulturproben

Zur Validierung der Biomonitoringmethoden wurden weiterhin Flüssigkulturen (SV1, SV2, SV3, SV4, SV5 und SV6) bei TCE-Dosierung sowie nach einer substantiellen Umsetzung beprobt, um das Bakterienwachstum im Zuge des aeroben Abbaus quantitativ zu erfassen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 41 zusammengefasst.

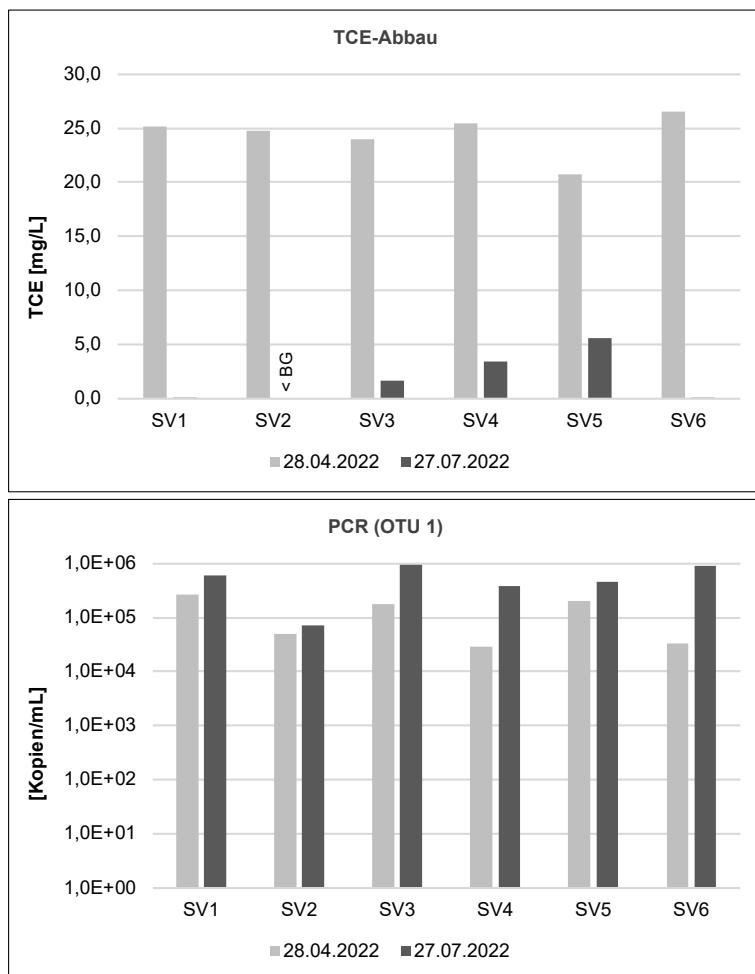


Abbildung 41:

Ergebnisse zur Validierung der Biomonitoringmethoden PCR und MPN im Zuge des TCE-Abbaus der Flüssigkulturen SV1 bis SV6 (Fortsetzung nächste Seite)

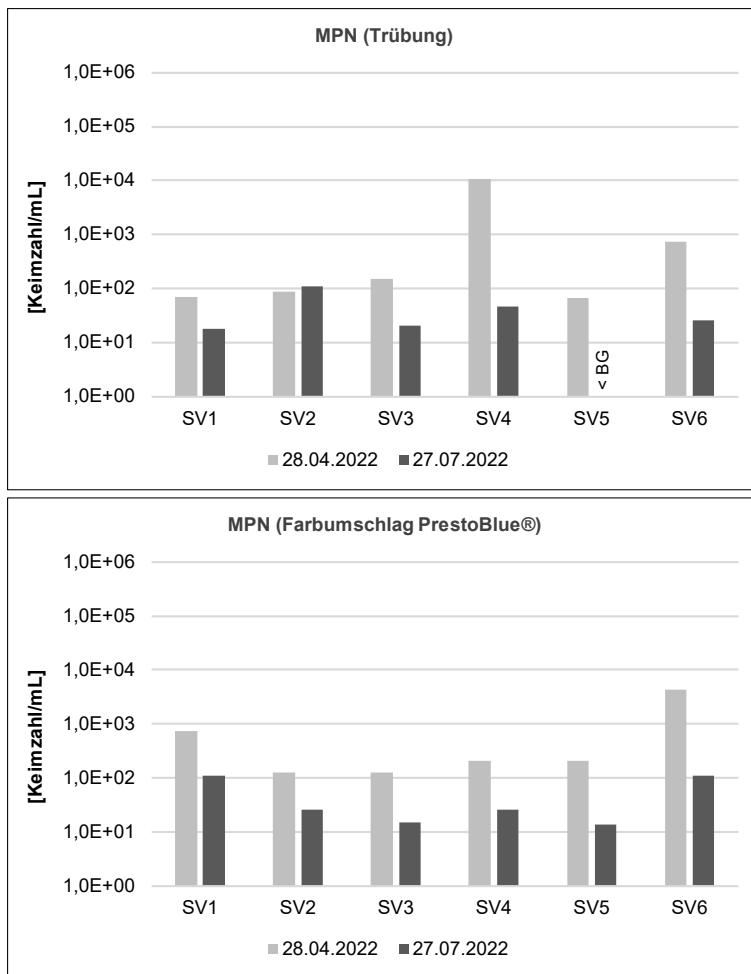


Abbildung 41 (Fortsetzung):

Ergebnisse zur Validierung der Biomonitoringmethoden PCR und MPN im Zuge des TCE-Abbaus der Flüssigkulturen SV1 bis SV6

Abbildung 41 zeigt zunächst die TCE-Konzentration in den Flüssigkulturen zu den beiden Probennahmezeitpunkten. Der erste Balken zeigt die Dosierung in der Größenordnung 20 bis 25 mg/L und der zweite die verbliebene TCE-Menge nach knapp drei Monaten. In der Kultur SV2 wurde TCE bis unter die Bestimmungsgrenze abgebaut. In den übrigen Ansätzen war eine substantielle Abnahme von mind. 15 mg/L zu verzeichnen.

Darunter sind die PCR-Ergebnisse der beiden Zeitpunkte dargestellt. In allen Kulturen konnte die Zielsequenz zum Zeitpunkt der Dosierung in der Größenordnung 10^4 bis 10^5 Kopien/mL erfasst werden. Nach dem TCE-Abbau wurde in allen Proben ein höheres Messergebnis erzielt, wobei die Werte von zwei Proben (SV4 und SV6) nach drei Monaten deutlich um eine Logstufe höher liegen. Folglich konnte mit der PCR-Methode die Zielsequenz zu beiden Zeitpunkten nachgewiesen sowie ein Bakterienwachstum im Zuge des TCE-Abbaus detektiert werden. Verglichen mit den Ergebnissen der Mikrokosmenversuche (siehe Kapitel 4.3.2.2) ist in den Flüssigkulturen zwar

von einer größeren Bakteriendichte auszugehen, dennoch kann auch die Beprobung eines größeren Volumens zu deutlicheren Ergebnissen geführt haben.

Mit dem MPN-Verfahren konnten die TCE-verwertenden Bakterien mit beiden getesteten Auswertemethoden in allen Kulturen zum Zeitpunkt der Dosierung nachgewiesen werden. Während anhand der Trübungsbildung Werte in der Größenordnung 10^1 bis 10^4 Keimzahlen/mL ermittelt wurden, lagen die Ergebnisse anhand des Farbumschlags von PrestoBlue® alle im Bereich 10^2 Keimzahlen/mL mit einer Ausnahme, die sich eine Log-Stufe höher (SV6) befand. Nach dem TCE-Abbau erbrachte die Auswertung anhand der Trübung nur noch einen Nachweis für fünf der sechs Proben mit meist niedrigeren Keimzahlen als zum Zeitpunkt der Dosierung. Die Auswertung mittels Farbumschlag lieferte zwar für alle Proben einen Nachweis, jedoch mit ausnahmslos geringeren Keimzahlen als vor dem TCE-Abbau. Folglich konnten die TCE-Verwerter mit der MPN-Methode zumindest anhand des Farbumschlags in allen Proben zu beiden Zeitpunkten nachgewiesen, jedoch kein Wachstum im Zuge des TCE-Abbaus erfasst werden.

4.3.4 Zusammenfassende Evaluierung der Biomonitoringmethoden

Zum Nachweis der für den aerob-metabolischen TCE-Abbau verantwortlichen Mikroorganismen wurden die MPN-Methode als Kulturverfahren sowie eine PCR-basierte Nachweismethode entwickelt und anhand von Feld- und Laborproben getestet. Die abschließende Bewertung nach bisherigem Entwicklungsstand ist in Tabelle 14 zusammengefasst.

In den meisten Proben konnten die Mikroorganismen durch das MPN-Verfahren mit beiden getesteten Auswertemethoden nachgewiesen werden. Beim Ansatz von Grundwasserproben wurde jedoch eine Trübungsbildung in allen Proben inklusive der als Negativnachweis ausgewählten Referenzmessstelle beobachtet und auf abiotische Prozesse zurückgeführt (siehe Kapitel 4.3.3.1). Die Auswertung anhand der Trübung wird außerdem durch die Neigung der nachzuweisenden Mikroorganismen zur Flockenbildung erschwert (siehe Kapitel 4.1). Diese kann im Zuge des Wachstums in den Röhrchen die Detektion verfälschen, da das Photometer immer mittig der Röhrchen misst und ein Wachstum am Rand möglicherweise nicht erfasst wird. Mit dem Auge könnte zwar auch der Rand der Röhrchen berücksichtigt werden, jedoch ist die Trübung kaum erkennbar und die Auswertung extrem subjektiv. Vor diesem Hintergrund ist diese Auswertemethode für die stoffwechselphysiologische Gruppe nur bedingt geeignet und insbesondere für Grundwasserproben nicht zu empfehlen.

Der Farbumschlag von PrestoBlue® zeigt sich dagegen im gesamten Röhrchen und ist mit dem Auge sowie messtechnisch deutlicher zu erfassen als die Trübungsbildung (vgl. Abbildung 35).

Entsprechend liefert das Verfahren bei der Validierung sowohl mit Feld- als auch Laborproben zuverlässigere Ergebnisse und weist durch seine niedrige Bestimmungsgrenze auch einen Vorteil gegenüber dem schnellen PCR-Nachweis auf. Als Nachteil ist die zusätzliche Kontaminationsgefahr durch den Zwischenschritt der Farbzugabe zu nennen wie in den Vorversuchen zur Inkubationszeit beobachtet (siehe Kapitel 3.4.1.2). Eine quantitative Detektion des Wachstums war mit der Methode ebenfalls nicht möglich. Hierfür können die Flocken der TCE-Verwerter in der Probe verantwortlich sein. Zwar wurden alle Ansätze vor der Probenahme geschüttelt, jedoch erschwert die Flockenbildung sowohl eine repräsentative Probenahme des vergleichsweise geringen Volumens von 1 mL, als auch eine homogene Verdünnung und Verteilung in den Röhrchen. Dies wurde auch von Gaza et al. (2019), die ebenfalls eine Flockenbildung im Zuge des TCE-Abbaus beobachten konnten, in Zusammenhang mit der homogenen Inokulation von Versuchsansätzen diskutiert.

Tabelle 14: Zusammenfassende Bewertung der Biomonitoringmethoden

	MPN (Trübung)	MPN (Farbumschlag)	PCR
Messdauer	10 Wochen	11 Wochen	1 Tag +++
Bestimmungsgrenze	6,6 Keimzahl/mL ++	6,6 Keimzahl/mL ++	2 - 40 Kopien/mL -
Probenvolumen	1 mL Vorteilhaft für Mikrokosmenversuche mit begrenztem Gesamtvolumen Nachteilhaft für repräsentative Probenahme durch Flockenstruktur der TCE-Verwerter +/-	1 mL Vorteilhaft für Mikrokosmenversuche mit begrenztem Gesamtvolumen Nachteilhaft für repräsentative Probenahme durch Flockenstruktur der TCE-Verwerter +/-	50 - 1000 mL Nachteilhaft für Mikrokosmen mit begrenztem Gesamtvolumen Vorteilhaft für Grundwasserprobenahme mit unbegrenztem Volumen -/+
Fehlerpotentiale	Begünstigung abiotischer Trübungsbildung durch lange Inkubationszeit Fehlerhafte Messungen mittig der Röhrchen durch Flockenbildung am Rand ---	Begünstigung von Kontaminationen durch zusätzlichen Zwischenschritt der Farbstoffzugabe -	Fehlende Nachweise möglich bei zu kleinen Probenvolumina und großer Bestimmungsgrenze -

Die Auswirkungen der Flockenbildung treffen zwar auch auf die Probenahme für die PCR-Methode zu, jedoch können hier wesentlich größere Volumina filtriert und aufkonzentriert werden. Außerdem liefert das Verfahren ohne Inkubationszeit wesentlich schneller Ergebnisse. Mit der entwickelten Methode konnte die Zielsequenz in den Versuchen erfolgreich nachgewiesen und mit der Erfassung des Bakterienwachstums im Zuge des TCE-Abbaus auch ein quantitativer Nachweis erbracht werden.

Die Anwendung auf verschiedene Proben und Volumina zeigte, dass größere Probenmengen deutlichere PCR-Ergebnisse nach sich ziehen. So war bei Kulturen die Verwendung von 200 mL und bei Grundwasserproben 1000 mL zielführend. Bei Verfügbarkeit nur kleiner Probenvolumina aus Mikrokosmenversuchen kann ein Nachweis erst bei vergleichsweise hohen TCE-Umsatzmengen erwartet werden. In den bisherigen Versuchen mit 50 mL waren die PCR-Nachweise mit TCE-Umsätzen von mind. 25 mg/L verbunden.

Zur Spezifität der PCR-Methode liegen bisher noch wenige Daten vor. Hier können weitere Standortproben herangezogen sowie erneute Versuche mit Kulturproben durchgeführt werden, bei denen auch Negativproben ohne TCE-Dosierung mitgeführt werden. Außerdem können die Ergebnisse durch die Erhebung mehrerer Datenpunkte bei wiederholter TCE-Zugabe weiter abgesichert und dabei auch die abgebaute TCE-Menge mit dem damit verbundenen Biomassewachstum korreliert werden.

Die MPN-Methode mit Auswertung anhand des Farbumschlags kann vergleichend zur qualitativen Erfassung angewendet und bei der Evaluierung des Abbaupotentials als ergänzendes Werkzeug genutzt werden. In der weiteren Methodenentwicklung können Mehrfachbestimmungen die Ergebnisse weiter absichern. Insbesondere zum quantitativen Nachweis der Mikroorganismen könnten Verfahren zur Auflösung der Flocken als vorbereitenden Schritt getestet werden, wobei das Kulturverfahren nur anwendbar ist, wenn die Mikroorganismen auch außerhalb der Flockenstruktur den aerob-metabolischen TCE-Abbau vollziehen können.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Vorkommen des aerob-produktiven TCE-Abbaus

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit deuten stark auf ein natürliches Vorkommen der Mikroorganismen, die TCE aerob-produktiv umsetzen, an verschiedenen Standorten in Deutschland und Frankreich hin. Bislang wurde der aerob-metabolische TCE-Abbau nur an einem Standort im Raum Stuttgart beobachtet. Jetzt wurde der Prozess in Grundwasserproben von sechs der sieben untersuchten Standorte nur durch die Zugabe von Sauerstoff und teils anorganischen Nährstoffen erfolgreich angeregt und damit seit seiner Aufdeckung erstmals für weitere Standorte nachgewiesen.

Die Grundwasserproben stammen aus verschiedenen Regionen und sowohl aus Poren- als auch Kluftgrundwasserleitern verschiedener geologischer Formationen mit unterschiedlichem Chemismus. Ein Zusammenhang zwischen dem intrinsischen Abbaupotential und den vorliegenden chemischen und hydrogeologischen Daten sowie der geographischen Lage der Standorte wurde nicht festgestellt. Demzufolge kann der aerob-produktive TCE-Abbau über ein breites hydrochemisches Spektrum vorkommen und ist als alternatives Sanierungsverfahren von Grundwasserschadensfällen in Betracht zu ziehen (Abbildung 42).

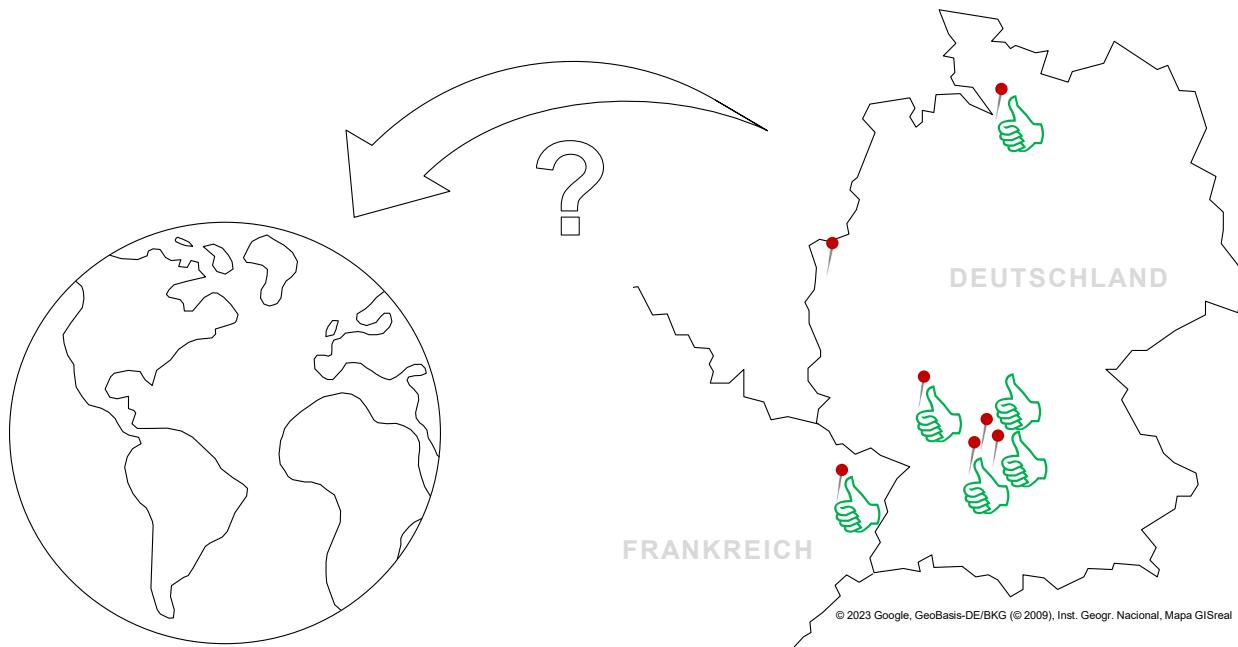


Abbildung 42: Vorkommen des aerob-metabolischen TCE-Abbaus an den untersuchten Standorten (grün) und mögliche überregionale Aufdeckung und Nutzung

In den Laborversuchen wurden lange Anpassungszeiten und ein vergleichsweise langsames Wachstum der abbauaktiven Mikroorganismen festgestellt, was bei der Untersuchung des Abbau-potentials an kontaminierten Standorten berücksichtigt werden sollte. Weiterhin sind die Konzentrationsbereiche des aerob-produktiven TCE-Abbaus und mögliche Nährstofflimitierungen zu beachten. Womöglich sind das auch Gründe, warum der Prozess bisher nicht häufiger beobachtet wurde. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die Beprobung mehrerer Messstellen zur Aufdeckung des aerob-produktiven TCE-Abbaus an einem Standort beitragen kann.

Ein entscheidendes Werkzeug zur Bewertung der biologischen Prozesse an einem Standort und im Genehmigungsverfahren für die Nutzung der natürlichen oder stimulierten Schadstoffminde-rung ist die Prognose der Schadstofffahne. Kinetische Abbau-Parameter stellen essentielle Ein-gangsgrößen für die numerischen Modelle zur Fahnenentwicklung dar und waren für den aerob-produktiven TCE-Abbau bislang nicht bekannt. In vorliegender Arbeit wurden nun eine Verdopp- lungenzeit der abbauaktiven Mikroorganismen von 24 Tagen ermittelt sowie eine Anpassungszeit von bis zu 92 Tagen beobachtet und damit der Altlastensanierungspraxis weitere wertvolle Infor-mationen zur Verfügung gestellt.

5.2 Stimulierung des aerob-produktiven TCE-Abbaus

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der aerob-produktive TCE-Abbau in Grundwasserpro-ben von allen untersuchten Standorten durch Bioaugmentation mit verschiedenen Animpfvarian-ten erfolgreich angeregt. Die Laborergebnisse lassen darauf schließen, dass der Abbauweg auch an Standorten, an denen keine abbauaktiven Mikroorganismen vorhanden sind, durch die Zugabe eines Inokulums stimuliert und als alternative oder ergänzende Sanierungsmaßnahme genutzt werden kann (Abbildung 43). In Grundwasserproben mit intrinsischem Abbaupotential führte die Bioaugmentation zu einem beschleunigten Abbau. Demzufolge kann an Standorten, an denen zwar abbaufähige Mikroorganismen vorhanden sind, aber für die Sanierungsziele keine ausrei-chende Schadstoffeliminierung bewirken, die Abbauleistung durch Bioaugmentation gesteigert werden. In den Laborversuchen stellte nur der Konzentrationsbereich des aerob-metabolischen TCE-Abbaus eine Limitierung dar und sollte bei der Untersuchung des Stimulierungspotentials und bei der Sanierungsplanung an kontaminierten Standorten berücksichtigt werden.

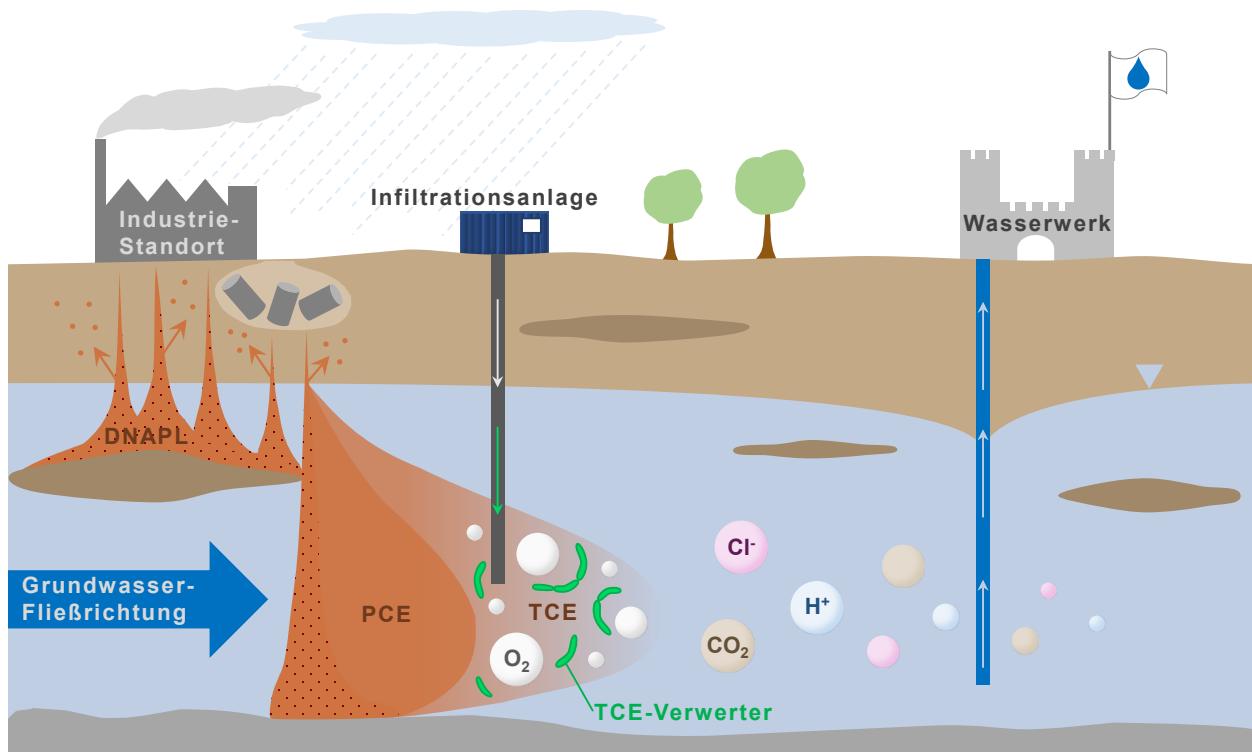


Abbildung 43: Stimulierung des aerob-produktiven TCE-Abbaus durch Bioaugmentation im Feld (eigene Darstellung)

Als Animpfvarianten diente eine flüssige Anreicherungskultur in Mineralmedium, eine auf Quarzsand gewachsene, immobilisierte Anreicherungskultur sowie abbauaktives Grundwasser von dem Standort, an dem der aerob-produktive TCE-Abbau erstmals beobachtet wurde. Alle Animpfvarianten zeigten sich in den Laborversuchen als zielführend. Weiterführende Feldversuche können Aufschluss über die Schadstoffeliminierung in größerem Maßstab und die Anwendbarkeit der verschiedenen Beimpfungsstrategien unter Grundwasserströmungsbedingungen geben. Die Zugabe einer flüssigen Kultur könnte im Feld durch Injektionsbrunnen realisiert werden. Eine auf Quarzsand gewachsene Kultur könnte im Rahmen eines Bodenaustauschs oder im Zuge von Baumaßnahmen in den Aquifer eingebracht werden. Vorausgesetzt ist eine ausreichende Anreicherung der abbauaktiven Mikroorganismen beispielsweise in Bioreaktoren oder Säulen.

Die Animpfung mit Grundwasser, in dem sowohl der aerob-produktive TCE- als auch cDCE-Abbau aktiv ist, führte in den Laborversuchen zur stimulierten Umsetzung beider Substanzen. Die Möglichkeit, verschiedene Abbauprozesse durch Bioaugmentation anzuregen, ist für die Sanierungspraxis von herausragender Bedeutung, da meist mehrere Chlorehene an CKW-kontaminierten Standorten vorhanden sind. Weiterführende Untersuchungen können die Anreicherung

und Animpfung einer Mischkultur beinhalten, die mehrere Chlorehene umsetzen kann oder Versuche mit Zugabe verschiedener Kulturen, die zum Abbau der jeweiligen Einzelsubstanzen fähig sind.

5.3 Wechselwirkungen des aerob-produktiven TCE-Abbaus mit cDCE

In den Laborversuchen dieser Arbeit wurden bisher unbekannte Wechselwirkungen des aerob-produktiven TCE-Abbaus mit cDCE beobachtet. Zunächst wurde TCE als Wachstumssubstrat für den co-metabolischen cDCE-Abbau aufgedeckt und erstmals beschrieben. Weiterhin wurden Transformationsumsätze des neuen Abbauweges über ein breites Konzentrationsspektrum von cDCE und TCE ermittelt. In Gegenwart nennenswerter cDCE-Konzentrationen wurde außerdem eine Verlangsamung des aerob-produktiven TCE-Abbaus beobachtet. Es wurde aufgezeigt, dass sowohl die Transformationsumsätze des co-metabolischen cDCE-Abbaus mit TCE als auch die hemmenden Effekte auf den produktiven TCE-Abbau in einem linearen Zusammenhang mit dem Konzentrationsverhältnis beider Schadstoffe in den Proben stehen.

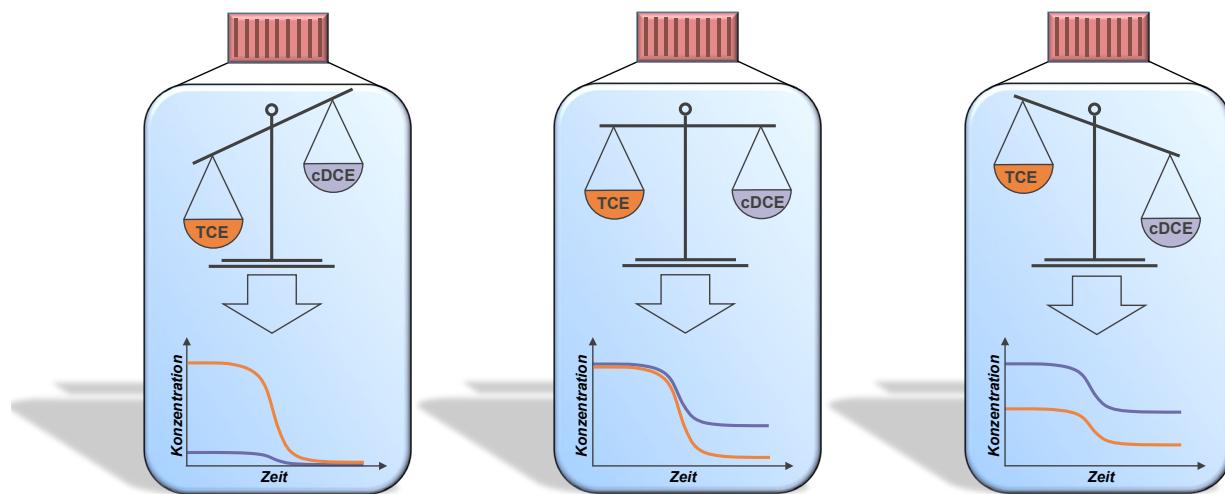


Abbildung 44: Aerober co-metabolischer cDCE-Abbau mit TCE bei verschiedenen Konzentrationsverhältnissen (eigene Darstellung)

Diese Erkenntnisse sind von großer praktischer Relevanz, da bei Grundwasserschäden mit Chlorehenen meist beide Substanzen als Ausgangsschadstoffe oder Produkte der reduktiven Dechlorierung vorhanden sind. Wenn niedrige cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnisse vorliegen, kann der aerob-produktive TCE-Abbau nach den Laborergebnissen zu einer vollständigen co-metabolischen Umsetzung von cDCE führen, wie in Abbildung 44 links schematisch dargestellt. Bei höheren cDCE/TCE-Verhältnissen sind zunehmend hemmende Wirkungen auf den produktiven

TCE-Abbau zu berücksichtigen, die zu einem unvollständigen Abbau führen können (Abbildung 44, Mitte und rechts).

Die Ergebnisse zeigen, dass ein gemeinsamer Abbau eine vielversprechende Lösung zur Grundwassersanierung darstellen kann. Jedoch sind bei der Untersuchung kontaminiert Standorte und der Planung von Sanierungsstrategien auch Auswirkungen von Schadstoffgemischen auf die Abbauraten der einzelnen Stoffe zu berücksichtigen. Kenntnisse zu Wechselwirkungen verschiedener Schadstoffe liefern einen wichtigen Beitrag für die Altlastensanierungspraxis und können zur Bewertung der Wirksamkeit biologischer Abbauprozesse in Hinblick auf die Sanierungsziele dienen. Die in dieser Arbeit ermittelten Transformationsumsätze und Zusammenhänge mit den vorliegenden Schadstoffkonzentrationen können insbesondere als Eingangsdaten bei der Modellierung zur Schadstofffahnenprognose genutzt werden.

5.4 Monitoring des aerob-produktiven TCE-Abbaus

Ein wichtiges Werkzeug zur Bewertung des Abbaupotentials an kontaminierten Standorten stellen Biomonitoringmethoden dar, mit denen die abbauaktiven Mikroorganismen nachgewiesen werden können. Zur Erfassung der Bakterien, die TCE aerob-produktiv umsetzen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit verschiedene Verfahren entwickelt und getestet.

Für die spezifische MPN-Methode wurde eine geeignete Substratmenge und Inkubationszeit ermittelt sowie verschiedene Auswertemethoden evaluiert. Die Anwendung auf Feld- und Laborproben erbrachte einen qualitativen Nachweis. Ein Bakterienwachstum im Zuge des TCE-Abbaus konnte mit der Methode nach bisherigem Entwicklungsstand jedoch nicht erfasst werden. Zudem wirken sich das langsame Wachstum der TCE-Verwerter und ihre Neigung zur Flockenbildung nachteilhaft auf das Kulturverfahren aus. Die lange Verdopplungszeit zieht auch eine lange Inkubationszeit nach sich, die in den Versuchen zehn Wochen betrug. Die Flocken erschweren eine homogene und repräsentative Probenahme sowie ein gleichmäßiges Wachstum in den Röhrchen der Mikrotiterplatten. Als vorteilhaft erwies sich die niedrige Bestimmungsgrenze des Verfahrens, so dass die MPN-Methode als ergänzendes Werkzeug zur Untersuchung und Bewertung des Abbaupotentials genutzt werden kann.

Weiterhin wurde ein PCR-Nachweis getestet, der auf Grundlage einer Mikrobiomanalyse verschiedener abbauaktiver Proben entwickelt wurde. Demnach sind Bakterien der Familie *Rhodocyclaceae* wesentlich am aerob-metabolischen TCE-Abbau beteiligt. Zwar liegen bisher nur wenige Daten zur Spezifität der PCR-Methode vor, die Validierung mit Feld- und Laborproben

zeigte jedoch vielversprechende Ergebnisse. Im Vergleich zu Kulturverfahren ist die Messung wesentlich schneller und erlaubt die Beprobung bedeutend größerer Volumina, wodurch Inhomogenitäten durch die Flockenbildung reduziert und auch die Bestimmungsgrenze weiter gesenkt werden kann.

Molekularbiologische Untersuchungen sind dringend erforderlich um die Organismen und Enzyme zu identifizieren, die am aerob-produktiven TCE-Abbau sowie am co-metabolischen cDCE-Abbau mit TCE als Wachstumssubstrat beteiligt sind. Insbesondere können diese Erkenntnisse zu einem umfassenden Prozessverständnis der Abbauwege sowie zur Entwicklung spezifischer Nachweismethoden beitragen.

Der genaue Mechanismus des aerob-produktiven TCE-Abbaus und die Zusammensetzung der dafür verantwortlichen Bakterien sind nach wie vor nicht bekannt. Demgegenüber stehen die aufgezeigte Wirksamkeit des Abbaus und das außerordentliche Praxispotential.

5.5 Fazit

Zusammenfassend werden die Fragestellungen aus der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit (siehe Kapitel 1.2) aufgegriffen:

1. Wie ist die Verbreitung der Mikroorganismen, die TCE aerob-produktiv umsetzen?

→ Der aerob-produktive TCE-Abbau kann über ein breites hydrochemisches Spektrum vorkommen.

Bei der Untersuchung des intrinsischen Abbaupotentials an kontaminierten Standorten sind die langen Anpassungszeiten und das langsame Wachstum der am Abbau beteiligten Mikroorganismen, mögliche Nährstofflimitierungen sowie der Konzentrationsbereich des Abbaus zu berücksichtigen. Außerdem kann die Untersuchung mehrerer Messstellen an einem Standort zur Aufdeckung des aerob-produktiven TCE-Abbaus beitragen.

2. Kann der aerob-produktive TCE-Abbau an unterschiedlichen Standorten, an denen keine abbaufähigen Mikroorganismen vorhanden sind, durch Bioaugmentation angeregt werden?

→ Auf Grundlage der Laborversuche ist die Bioaugmentation unter Berücksichtigung des Konzentrationsbereichs für den aerob-produktiven TCE-Abbau über ein breites Spektrum an Grundwasserbeschaffenheiten geeignet.

Weiterführende Feldversuche werden empfohlen, um die Anwendbarkeit der verschiedenen Animpfstrategien unter Grundwasserfließbedingungen sowie die Schadstoffeliminierung in größerem Maßstab zu testen.

Außerdem können verschiedene Abbauprozesse durch Bioaugmentation angeregt werden. Diese Möglichkeit kann durch die Anreicherung und Animpfung einer Mischkultur, die mehrere Chlorehene umsetzen kann, oder die Zugabe verschiedener Kulturen mit der Fähigkeit zum Abbau der Einzelsubstanzen weiter untersucht werden.

3. Welche Biomonitoringmethoden eignen sich für den Nachweis und die Überwachung des aerob-produktiven TCE-Abbaus?

→ Bei Verfügbarkeit von großen Probenvolumina ist der entwickelte PCR-Nachweis vorteilhaft. Bei kleinen Volumina und als ergänzendes Werkzeug für einen qualitativen Nachweis kann das spezifische MPN-Verfahren genutzt werden.

Für die Etablierung eines spezifischen Biomonitorings sind weitere molekularbiologische Untersuchungen erforderlich, um die am Abbau beteiligten Organismen und Enzyme zu identifizieren und ein tiefgreifendes Verständnis des Abbauprozesses zu erlangen.

4. Welche Abbauraten sind für den aerob-produktiven TCE-Abbau zu erwarten?

→ Die am Abbau beteiligten Mikroorganismen weisen mit einer Verdopplungszeit von 24 Tagen ein vergleichsweise langsames Wachstum auf.

Die Kinetik des aerob-produktiven TCE-Abbaus kann bei Verfügbarkeit einer geeigneten Biomonitoringmethode zur Aufnahme von Wachstumskurven der beteiligten Mikroorganismen genauer charakterisiert werden.

Darüber hinaus wurden in der vorliegenden Arbeit zuvor unbekannte Wechselwirkungen des aeroben Chlorethen-Abbaus aufgezeigt:

→ TCE ist ein Wachstumssubstrat für den aeroben co-metabolischen cDCE-Abbau.

Ein gemeinsamer Abbau kann eine vielversprechende Lösung zur Grundwassersanierung darstellen.

→ Die Anwesenheit von cDCE führt zu einer Verlangsamung des aerob-produktiven TCE-Abbaus und TCE-Restkonzentrationen.

Bei der Untersuchung kontaminierten Standorte und der Planung von Sanierungsstrategien sind Auswirkungen von Schadstoffgemischen auf die Abbauraten der einzelnen Stoffe zu berücksichtigen.

→ Sowohl die Transformationsumsätze des co-metabolischen cDCE-Abbaus als auch die TCE-Restkonzentrationen stehen in einem linearen Zusammenhang mit dem cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnis.

Bei niedrigen cDCE/TCE-Konzentrationsverhältnissen kann der aerob-produktive TCE-Abbau zu einer vollständigen co-metabolischen Umsetzung von cDCE führen, während bei höheren cDCE/TCE-Verhältnissen zunehmend hemmende Wirkungen auf den produktiven TCE-Abbau zu berücksichtigen sind.

Mit der vorliegenden Arbeit konnte ein wichtiger Beitrag zur Grundwassersanierung geleistet werden. Die bereitgestellten Ergebnisse liefern wertvolle Informationen für die Entwicklung von Konzepten zur systematischen Untersuchung des aerob-produktiven TCE-Abbaus an CKW-kontaminierten Standorten sowie für die Anwendung von Bioaugmentation zur Stimulierung. Die Aufdeckung zuvor unbekannter Wechselwirkungen verschiedener Chlorethene ist von großer praktischer Relevanz, insbesondere für die Planung von Sanierungsstrategien. Von der Identifizierung der am aerob-produktiven TCE-Abbau sowie am co-metabolischen cDCE-Abbau beteiligten Mikroorganismen würde die Altlastensanierungspraxis in ebenso großem Maße profitieren.

Literaturverzeichnis

Abuhamed, T.; Bayraktar, E.; Mehmetoğlu, T.; Mehmetoğlu, Ü. (2004): Kinetics model for growth of *Pseudomonas putida* F1 during benzene, toluene and phenol biodegradation. In: *Process Biochemistry* 39 (8), S. 983–988. DOI: 10.1016/S0032-9592(03)00210-3.

Alexander, M. (1965): Denitrifying bacteria. In: *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties* 9, S. 1484–1486. DOI: 10.2134/agronmonogr9.2.c52.

Alexander, M.; Clark, F. E. (1965): Nitrifying bacteria. In: *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties* 9, S. 1477–1483. DOI: 10.2134/agronmonogr9.2.c51.

Alvarez-Cohen, L.; Speitel, G. E. (2001): Kinetics of aerobic cometabolism of chlorinated solvents. In: *Biodegradation* 12 (2), S. 105–126. DOI: 10.1023/A:1012075322466.

Anderson, J. E.; McCarty, P. L. (1997): Transformation yields of chlorinated ethenes by a methanotrophic mixed culture expressing particulate methane monooxygenase. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 63 (2), S. 687–693. DOI: 10.1128/aem.63.2.687-693.1997.

Arp, D. J. (1995): Understanding the diversity of trichloroethene co-oxidations. In: *Current opinion in biotechnology* 6 (3), S. 352–358. DOI: 10.1016/0958-1669(95)80059-X.

Arp, D. J.; Yeager, C. M.; Hyman, M. R. (2001): Molecular and cellular fundamentals of aerobic co-metabolism of trichloroethylene. In: *Biodegradation* 12 (2), S. 81–103. DOI: 10.1023/a:1012089908518.

Aulenta, F.; Majone, M.; Tandoi, V. (2006): Enhanced anaerobic bioremediation of chlorinated solvents. Environmental factors influencing microbial activity and their relevance under field conditions. In: *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology* 81 (9), S. 1463–1474. DOI: 10.1002/jctb.1567.

Aulenta, F.; Pera, A.; Rossetti, S.; Papini, M. P.; Majone, M. (2007): Relevance of side reactions in anaerobic reductive dechlorination microcosms amended with different electron donors. In: *Water research* 41 (1), S. 27–38. DOI: 10.1016/j.watres.2006.09.019.

Balba, T.; Dore, S.; Pope, D.; Smith, J.; Weston, A. (2008): Stimulation of aerobic degradation of chlorinated ethenes in soil by microbial inoculation. In: *Remediation Journal: The Journal of Environmental Cleanup Costs, Technologies & Techniques* 18 (2), S. 67–74. DOI: 10.1002/rem.20161.

Beeman, R. E.; Bleckmann, C. A. (2002): Sequential anaerobic–aerobic treatment of an aquifer contaminated by halogenated organics. Field results. In: *Journal of Contaminant Hydrology* 57 (3-4), S. 147–159. DOI: 10.1016/S0169-7722(02)00008-6.

Bell, J. (1989): The polymerase chain reaction. In: *Immunology today* 10 (10), S. 351–355. DOI: 10.1016/0167-5699(89)90193-X.

Bielefeldt, A. R.; Stensel, H. D.; Strand, S. E. (1995): Cometabolic degradation of TCE and DCE without intermediate toxicity. In: *Journal of environmental engineering* 121 (11), S. 791–797. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1995)121:11(791).

Boldrin, B.; Tiehm, A.; Fritzsche, C.; Boldrin, B.; Tiehm, A.; Fritzsche, C. (1993): Degradation of phenanthrene, fluorene, fluoranthene, and pyrene by a *Mycobacterium* sp. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 59 (6), S. 1927–1930. DOI: 10.1128/aem.59.6.1927-1930.1993.

Bradley, P. M. (2003): History and ecology of chloroethene biodegradation. A review. In: *Bioremediation Journal* 7 (2), S. 81–109. DOI: 10.1080/713607980.

Bradley, P. M.; Chapelle, F. H. (2000): Aerobic microbial mineralization of dichloroethene as sole carbon substrate. In: *Environmental science & technology* 34 (1), S. 221–223. DOI: 10.1021/es990785c.

Bradley, P. M.; Chapelle, F. H.; Lovley, D. R. (1998): Humic acids as electron acceptors for anaerobic microbial oxidation of vinyl chloride and dichloroethene. In: *Applied and Environmental Microbiology* 64 (8), S. 3102–3105. DOI: 10.1128/AEM.64.8.3102-3105.19.

Broholm, K.; Ludvigsen, L.; Jensen, T. F.; Østergaard, H. (2005): Aerobic biodegradation of vinyl chloride and cis-1, 2-dichloroethylene in aquifer sediments. In: *Chemosphere* 60 (11), S. 1555–1564. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.02.056.

Broholm, M. M.; Arvin, E. (2000): Biodegradation of phenols in a sandstone aquifer under aerobic conditions and mixed nitrate and iron reducing conditions. In: *Journal of Contaminant Hydrology* 44 (3-4), S. 239–273. DOI: 10.1016/S0169-7722(00)00103-0.

Bushnell, L. D.; Haas, H. F. (1941): The utilization of certain hydrocarbons by microorganisms. In: *Journal of bacteriology* 41 (5), S. 653–673. DOI: 10.1128/jb.41.5.653-673.1941.

Chang, C.-H.; Yang, H.-Y.; Hung, J.-M.; Lu, C.-J.; Liu, M.-H. (2017): Simulation of combined anaerobic/aerobic bioremediation of tetrachloroethylene in groundwater by a column system. In: *International Biodeterioration & Biodegradation* 117, S. 150–157. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.12.014.

Chang, H.-L.; Alvarez-Cohen, L. (1995): Transformation capacities of chlorinated organics by mixed cultures enriched on methane, propane, toluene, or phenol. In: *Biotechnology and Bioengineering* 45 (5), S. 440–449. DOI: 10.1002/bit.260450509.

Chang, H.-L.; Alvarez-Cohen, L. (1996): Biodegradation of individual and multiple chlorinated aliphatic hydrocarbons by methane-oxidizing cultures. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 62 (9), S. 3371–3377. DOI: 10.1128/aem.62.9.3371-3377.1996.

Chang, M.-K.; Voice, T. C.; Criddle, C. S. (1993): Kinetics of competitive inhibition and cometabolism in the biodegradation of benzene, toluene, and p-xylene by two *Pseudomonas* isolates. In: *Biotechnology and Bioengineering* 41 (11), S. 1057–1065. DOI: 10.1002/bit.260411108.

Chen, F.; Freedman, D. L.; Falta, R. W.; Murdoch, L. C. (2012): Henry's law constants of chlorinated solvents at elevated temperatures. In: *Chemosphere* 86 (2), S. 156–165. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.10.004.

Clarke, K. R.; Owens, N. J.P. (1983): A simple and versatile micro-computer program for the determination of 'most probable number'. In: *Journal of Microbiological Methods* 1 (3), S. 133–137. DOI: 10.1016/0167-7012(83)90031-3.

Coleman, N. V.; Mattes, T. E.; Gossett, J. M.; Spain, J. C. (2002a): Biodegradation of cis-dichloroethene as the sole carbon source by a β -proteobacterium. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 68 (6), S. 2726–2730. DOI: 10.1128/AEM.68.6.2726-2730.2002.

Coleman, N. V.; Mattes, T. E.; Gossett, J. M.; Spain, J. C. (2002b): Phylogenetic and kinetic diversity of aerobic vinyl chloride-assimilating bacteria from contaminated sites. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 68 (12), S. 6162–6171. DOI: 10.1128/AEM.68.12.6162-6171.2002.

Cooper, G. S.; Makris, S. L.; Nietert, P. J.; Jinot, J. (2009): Evidence of autoimmune-related effects of trichloroethylene exposure from studies in mice and humans. In: *Environmental Health Perspectives* 117 (5), S. 696–702. DOI: 10.1289/ehp.11782.

Corteselli, E. M.; Aitken, M. D.; Singleton, D. R. (2017): *Rugosibacter aromaticivorans* gen. nov., sp. nov., a bacterium within the family Rhodocyclaceae, isolated from contaminated soil, capable of degrading aromatic compounds. In: *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 67 (2), S. 311–318. DOI: 10.1099/ijsem.0.001622.

Coyle, Y. M.; Hynan, L. S.; Euhus, D. M.; Minhajuddin, A. (2005): An ecological study of the association of environmental chemicals on breast cancer incidence in Texas. In: *Breast cancer research and treatment* 92 (2), S. 107–114. DOI: 10.1007/s10549-004-8268-z.

Davis, G. B.; Patterson, B. M.; Johnston, C. D. (2009): Aerobic bioremediation of 1, 2 dichloroethane and vinyl chloride at field scale. In: *Journal of Contaminant Hydrology* 107 (1-2), S. 91–100. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2009.04.004.

Davis, J. W.; Carpenter, C. L. (1990): Aerobic biodegradation of vinyl chloride in groundwater samples. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 56 (12), S. 3878–3880. DOI: 10.1128/aem.56.12.3878-3880.1990.

Devlin, J. F.; Katic, D.; Barker, J. F. (2004): In situ sequenced bioremediation of mixed contaminants in groundwater. In: *Journal of Contaminant Hydrology* 69 (3-4), S. 233–261. DOI: 10.1016/S0169-7722(03)00156-6.

DGUV (2023): GESTIS-Stoffdatenbank. Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Hg. v. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. Online verfügbar unter www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank, zuletzt geprüft am 12.01.2023.

DiGeronimo, M. J.; Nikaido, M.; Alexander, M. (1977): Most-probable-number technique for the enumeration of aromatic degraders in natural environments. In: *Microbial ecology* 4, S. 263–266. DOI: 10.1007/BF02015082.

Dolinová, I.; Štrojsová, M.; Černík, M.; Němeček, J.; Macháčková, J.; Ševců, A. (2017): Microbial degradation of chloroethenes. A review. In: *Environmental Science and Pollution Research* 24 (15), S. 13262–13283. DOI: 10.1007/s11356-017-8867-y.

Doughty, D. M.; La Sayavedra-Soto; Arp, D. J.; Bottomley, P. J. (2005): Effects of dichloroethene isomers on the induction and activity of butane monooxygenase in the alkane-oxidizing bacterium “*Pseudomonas butanovora*”. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 71 (10), S. 6054–6059. DOI: 10.1128/AEM.71.10.6054-6059.2005.

Duba, A. G.; Jackson, K. J.; Jovanovich, M. C.; Knapp, R. B.; Taylor, R. T. (1996): TCE remediation using in situ, resting-state bioaugmentation. In: *Environmental science & technology* 30 (6), S. 1982–1989. DOI: 10.1021/es950730k.

Dunn, P. L.; North, R. J. (1995): Virulence ranking of some *Mycobacterium tuberculosis* and *Mycobacterium bovis* strains according to their ability to multiply in the lungs, induce lung pathology, and cause mortality in mice. In: *Infection and immunity* 63 (9), S. 3428–3437. DOI: 10.1128/iai.63.9.3428-3437.1995.

Durant, N. D.; Wilson, L. P.; Bouwer, E. J. (1995): Microcosm studies of subsurface PAH-degrading bacteria from a former manufactured gas plant. In: *Journal of Contaminant Hydrology* 17 (3), S. 213–237. DOI: 10.1016/0169-7722(94)00034-F.

EEA (2022): Europe's groundwater - a key resource under pressure. Hg. v. European Environmental Agency (Briefing, 03/2022). Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-groundwater/europes-groundwater>, zuletzt aktualisiert am 29.03.2022, zuletzt geprüft am 11.01.2023.

Elango, V.; Kurtz, H. D.; Freedman, D. L. (2011): Aerobic cometabolism of trichloroethene and cis-dichloroethene with benzene and chlorinated benzenes as growth substrates. In: *Chemosphere* 84 (2), S. 247–253. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.04.007.

Ellis, D. E.; Lutz, E. J.; Odom, J. M.; Buchanan, R. J.; Bartlett, C. L.; Lee, M. D. et al. (2000): Bioaugmentation for accelerated in situ anaerobic bioremediation. In: *Environmental science & technology* 34 (11), S. 2254–2260. DOI: 10.1021/es990638e.

Ensign, S. A.; Hyman, M. R.; Arp, D. J. (1992): Cometabolic degradation of chlorinated alkenes by alkene monooxygenase in a propylene-grown *Xanthobacter* strain. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 58 (9), S. 3038–3046. DOI: 10.1128/aem.58.9.3038-3046.1992.

Farhadian, M.; Vachelard, C.; Duche, D.; Larroche, C. (2008): In situ bioremediation of monoaromatic pollutants in groundwater. A review. In: *Bioresource technology* 99 (13), S. 5296–5308. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.10.025.

Farkas, M.; Tancsics, A.; Kriszt, B.; Benedek, T.; Toth, E. M.; Keki, Z. et al. (2015): *Zoogloea oleivorans* sp. nov., a floc-forming, petroleum hydrocarbon-degrading bacterium isolated from biofilm. In: *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 65 (1), S. 274–279. DOI: 10.1099/ijss.0.068486-0.

Fathepure, B. Z.; Elango, V. K.; Singh, H.; Bruner, M. A. (2005): Bioaugmentation potential of a vinyl chloride-assimilating *Mycobacterium* sp., isolated from a chloroethene-contaminated aquifer. In: *FEMS microbiology letters* 248 (2), S. 227–234. DOI: 10.1016/j.femsle.2005.05.033.

Field, J. A.; Sierra-Alvarez, R. (2004): Biodegradability of chlorinated solvents and related chlorinated aliphatic compounds. In: *Reviews in environmental Science and Bio/technology* 3, S. 185–254. DOI: 10.1007/s11157-004-4733-8.

Findlay, M.; Smoler, D. F.; Fogel, S.; Mattes, T. E. (2016): Aerobic vinyl chloride metabolism in groundwater microcosms by methanotrophic and etheneotrophic bacteria. In: *Environmental science & technology* 50 (7), S. 3617–3625. DOI: 10.1021/acs.est.5b05798.

Focht, D. D.; Joseph, H. (1973): An improved method for the enumeration of denitrifying bacteria. In: *Soil Science Society of America Journal* 37 (5), S. 698–699. DOI: 10.2136/sssaj1973.03615995003700050021x.

Frascari, D.; Fraraccio, S.; Nocentini, M.; Pinelli, D. (2013): Aerobic/anaerobic/aerobic sequenced biodegradation of a mixture of chlorinated ethenes, ethanes and methanes in batch bioreactors. In: *Bioresource technology* 128, S. 479–486. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.10.026.

Frascari, D.; Pinelli, D.; Nocentini, M.; Baleani, E.; Cappelletti, M.; Fedi, S. (2008): A kinetic study of chlorinated solvent cometabolic biodegradation by propane-grown *Rhodococcus* sp. PB1. In: *Biochemical Engineering Journal* 42 (2), S. 139–147. DOI: 10.1016/j.bej.2008.06.011.

Frascari, D.; Pinelli, D.; Nocentini, M.; Zannoni, A.; Fedi, S.; Baleani, E. et al. (2006): Long-term aerobic cometabolism of a chlorinated solvent mixture by vinyl chloride-, methane-and propane-utilizing biomasses. In: *Journal of hazardous materials* 138 (1), S. 29–39. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.05.009.

Frascari, D.; Zanaroli, G.; Danko, A. S. (2015): In situ aerobic cometabolism of chlorinated solvents. A review. In: *Journal of hazardous materials* 283, S. 382–399. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.09.041.

Freedman, D. L.; Danko, A. S.; Verce, M. F. (2001): Substrate interactions during aerobic biodegradation of methane, ethene, vinyl chloride and 1, 2-dichloroethenes. In: *Water Science and Technology* 43 (5), S. 333–340. DOI: 10.2166/wst.2001.0320.

Fries, M. R.; Zhou, J.; Chee-Sanford, J.; Tiedje, J. M. (1994): Isolation, characterization, and distribution of denitrifying toluene degraders from a variety of habitats. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 60 (8), S. 2802–2810. DOI: 10.1128/aem.60.8.2802-2810.1994.

Futagami, T.; Goto, M.; Furukawa, K. (2008): Biochemical and genetic bases of dehalorespiration. In: *The chemical record* 8 (1), S. 1–12. DOI: 10.1002/tcr.20134.

Gash, D. M.; Rutland, K.; Hudson, N. L.; Sullivan, P. G.; Bing, G.; Cass, W. A. et al. (2008): Trichloroethylene. Parkinsonism and complex 1 mitochondrial neurotoxicity. In: *Annals of neurology* 63 (2), S. 184–192. DOI: 10.1002/ana.21288.

Gaza, S. (2015): Der aerob-produktive Abbau von Chlorethenen. Nachweis und Charakterisierung eines neuen Abbauweges für Trichlorethen. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doctor rerum naturalium. Karlsruhe: Veröffentlichung aus dem DVGW-Technologiezentrum Wasser (66), ISSN: 1434-5765.

Gaza, S.; Schmidt, K. R.; Weigold, P.; Heidinger, M.; Tiehm, A. (2019): Aerobic metabolic trichloroethene biodegradation under field-relevant conditions. In: *Water research* 151, S. 343–348. DOI: 10.1016/j.watres.2018.12.022.

Giddings, C. G. S.; Jennings, L. K.; Gossett, J. M. (2010a): Microcosm Assessment of a DNA Probe Applied to Aerobic Degradation of cis-1, 2-Dichloroethene by *Polaromonas* sp. Strain JS666. In: *Groundwater Monitoring & Remediation* 30 (2), S. 97–105. DOI: 10.1111/j.1745-6592.2010.01280.x.

Giddings, C. G. S.; Liu, F.; Gossett, J. M. (2010b): Microcosm Assessment of *Polaromonas* sp. JS666 as a Bioaugmentation Agent for Degradation of cis-1, 2-dichloroethene in Aerobic, Sub-surface Environments. In: *Groundwater Monitoring & Remediation* 30 (2), S. 106–113. DOI: 10.1111/j.1745-6592.2010.01283.x.

Gould, W. D.; Stichbury, M.; Francis, M.; Lortie, L.; Blowes, D. W. (Hg.) (2003): An MPN method for the enumeration of iron-reducing bacteria: Citeseer.

Grandel, S.; Dahmke, A. (2008): Natürliche Schadstoffminderung bei LCKW-kontaminierten Standorten Methoden, Empfehlungen und Hinweise zur Untersuchung und Beurteilung. In: *Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany*.

Guerin, T. F.; Mondido, M.; McClellan, B.; Peasley, B. (2001): Application of resazurin for estimating abundance of contaminant-degrading micro-organisms. In: *Letters in applied microbiology* 32 (5), S. 340–345. DOI: 10.1046/j.1472-765X.2001.00916.x.

Haines, J. R.; Wrenn, B. A.; Holder, E. L.; Strohmeier, K. L.; Herrington, R. T.; Venosa, A. D. (1996): Measurement of hydrocarbon-degrading microbial populations by a 96-well plate most-probable-number procedure. In: *Journal of industrial microbiology* 16, S. 36–41. DOI: 10.1007/BF01569919.

Hanzel, J.; Thullner, M.; Harms, H.; Wick, L. Y. (2011): Microbial growth with vapor-phase substrate. In: *Environmental pollution* 159 (4), S. 858–864. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.12.032.

Harinen, R. R.; Lampinen, J.; Raitio, M.; Kytöniemi, V. (2011): Turbidometric growth curve measurements and liquid evaporation studies with a microplate photometer. Hg. v. Thermo Fisher Scientific Inc. Online verfügbar unter <http://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/MultikanFC-Turbidometry-Evaporation.pdf>, zuletzt geprüft am 29.12.2020.

Hess, A.; Zarda, B.; Hahn, D.; Häner, A.; Stax, D.; Höhener, P.; Zeyer, J. (1997): In situ analysis of denitrifying toluene-and m-xylene-degrading bacteria in a diesel fuel-contaminated laboratory aquifer column. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 63 (6), S. 2136–2141. DOI: 10.1128/aem.63.6.2136-2141.1997.

Hood, E. D.; Major, D. W.; Quinn, J. W.; Yoon, W.-S.; Gavaskar, A.; Edwards, E. A. (2008): Demonstration of enhanced bioremediation in a TCE source area at Launch Complex 34, Cape Canaveral Air Force Station. In: *Groundwater Monitoring & Remediation* 28 (2), S. 98–107. DOI: 10.1111/j.1745-6592.2008.00197.x.

Johnsen, A. R. (2017): Introduction to Microplate MPN Enumeration of Hydrocarbon Degraders. In: Terry J. McGenity, Kenneth N. Timmis und Balbina Nogales (Hg.): *Hydrocarbon and Lipid Microbiology Protocols: Microbial Quantitation, Community Profiling and Array Approaches*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17–33. DOI: 10.1007/8623_2014_28.

Johnsen, A. R.; Bendixen, K.; Karlson, U. (2002): Detection of microbial growth on polycyclic aromatic hydrocarbons in microtiter plates by using the respiration indicator WST-1. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 68 (6), S. 2683–2689. DOI: 10.1128/AEM.68.6.2683-2689.2002.

Johnsen, A. R.; Henriksen, S. (2009): Microplate MPN-enumeration of monocyclic-and dicyclic-aromatic hydrocarbon degraders via substrate phase-partitioning. In: *Biodegradation* 20, S. 581–589. DOI: 10.1007/s10532-008-9236-9.

Jørgensen, K. S. (2007): In situ bioremediation. In: *Advances in applied microbiology* 61, S. 285–305. DOI: 10.1016/S0065-2164(06)61008-3.

Kane, A.; Vidumsky, J.; Major, D. W.; Bauer, N. B. (2005): In-situ bioremediation of a chlorinated solvent residual source in unconsolidated sediments and bedrock using bioaugmentation. In: *Contaminated Soils, Sediments and Water*: Springer, S. 45–55. DOI: 10.1007/0-387-23079-3_5.

Kasai, Y.; Takahata, Y.; Manefield, M.; Watanabe, K. (2006): RNA-based stable isotope probing and isolation of anaerobic benzene-degrading bacteria from gasoline-contaminated groundwater. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 72 (5), S. 3586–3592. DOI: 10.1128/AEM.72.5.3586-3592.2006.

Kelly, W. R.; Hornberger, G. M.; Herman, J. S.; Mills, A. L. (1996): Kinetics of BTX biodegradation and mineralization in batch and column systems. In: *Journal of Contaminant Hydrology* 23 (1-2), S. 113–132. DOI: 10.1016/0169-7722(95)00092-5.

Kim, S.; Bae, W.; Hwang, J.; Park, J. (2010): Aerobic TCE degradation by encapsulated toluene-oxidizing bacteria, *Pseudomonas putida* and *Bacillus* spp. In: *Water Science and Technology* 62 (9), S. 1991–1997. DOI: 10.2166/wst.2010.471.

Kim, Y.; Arp, D. J.; Semprini, L. (2000): Chlorinated solvent cometabolism by butane-grown mixed culture. In: *Journal of environmental engineering* 126 (10), S. 934–942. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2000)126:10(934).

Kocamemi, B. A.; Çeçen, F. (2005): Cometabolic degradation of TCE in enriched nitrifying batch systems. In: *Journal of hazardous materials* 125 (1-3), S. 260–265.

Kocamemi, B. A.; Çeçen, F. (2010): Biological removal of the xenobiotic trichloroethylene (TCE) through cometabolism in nitrifying systems. In: *Bioresource technology* 101 (1), S. 430–433. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.07.079.

Koziollek, P.; Bryniok, D.; Knackmuss, H.-J. (1999): Ethene as an auxiliary substrate for the cooxidation of cis-1, 2-dichloroethene and vinyl chloride. In: *Archives of microbiology* 172 (4), S. 240–246. DOI: 10.1007/s002030050766.

Kubista, M.; Andrade, J. M.; Bengtsson, M.; Forootan, A.; Jonák, J.; Lind, K. et al. (2006): The real-time polymerase chain reaction. In: *Molecular aspects of medicine* 27 (2-3), S. 95–125. DOI: 10.1016/j.mam.2005.12.007.

LABO (2015): Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Ständiger Ausschuss Altlasten – ALA, Ad-hoc Unterausschuss „Natürliche Schadstoffminderung“. Online verfügbar unter <https://www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Altlasten.html>.

Lall, N.; Henley-Smith, C. J.; Canha, M. N. de; Oosthuizen, C. B.; Berrington, D. (2013): Viability reagent, PrestoBlue, in comparison with other available reagents, utilized in cytotoxicity and antimicrobial assays. In: *International journal of microbiology* 2013. DOI: 10.1155/2013/420601.

Le, N. B.; Coleman, N. V. (2011): Biodegradation of vinyl chloride, cis-dichloroethene and 1, 2-dichloroethane in the alkene/alkane-oxidising *Mycobacterium* strain NBB4. In: *Biodegradation* 22, S. 1095–1108. DOI: 10.1007/s10532-011-9466-0.

Li, F.; Deng, D.; Zeng, L.; Abrams, S.; Li, M. (2021a): Sequential anaerobic and aerobic bioaugmentation for commingled groundwater contamination of trichloroethene and 1, 4-dioxane. In: *Science of The Total Environment* 774, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145118.

Li, J.; Lu, Q.; Odey, E. A.; Lok, K. S.; Pan, B.; Zhang, Y.; Shim, H. (2021b): Coupling of biostimulation and bioaugmentation for enhanced bioremoval of chloroethylenes and BTEX from clayey soil. In: *Ecotoxicology* 30 (7), S. 1–8. DOI: 10.1007/s10646-020-02323-z.

Life Technologies Corporation (Hg.) (2010a): PrestoBlue® Cell Viability Reagent Frequently Asked Questions. Online verfügbar unter <https://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/PrestoBlueFAQ.pdf>, zuletzt geprüft am 30.06.2023.

Life Technologies Corporation (Hg.) (2010b): PrestoBlue™ Cell Viability Reagent Protocol. Product Information Sheet. Online verfügbar unter http://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/PrestoBlue_Reagent_PIS_15Oct10.pdf, zuletzt geprüft am 18.11.2020.

Little, C. D.; Palumbo, A. V.; Herbes, S. E.; Lidstrom, M. E.; Tyndall, R. L.; Gilmer, P. J. (1988): Trichloroethylene biodegradation by a methane-oxidizing bacterium. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 54 (4), S. 951–956. DOI: 10.1128/aem.54.4.951-956.19.

Löffler, F. E.; Ritalahti, K. M.; Zinder, S. H. (2013): Dehalococcoides and reductive dechlorination of chlorinated solvents. In: *Bioaugmentation for groundwater remediation*: Springer, S. 39–88. DOI: 10.1007/978-1-4614-4115-1_2.

Lohner, S. T.; Becker, D.; Mangold, K.-M.; Tiehm, A. (2011): Sequential reductive and oxidative biodegradation of chloroethenes stimulated in a coupled bioelectro-process. In: *Environmental science & technology* 45 (15), S. 6491–6497. DOI: 10.1021/es200801r.

Lyon, D. Y.; Vogel, T. M. (2013): Bioaugmentation for groundwater remediation. An overview. In: *Bioaugmentation for groundwater remediation*, S. 1–37. DOI: 10.1007/978-1-4614-4115-1_1.

Major, D. W.; McMaster, M. L.; Cox, E. E.; Edwards, E. A.; Dworatzek, S. M.; Hendrickson, E. R. et al. (2002): Field demonstration of successful bioaugmentation to achieve dechlorination of tetrachloroethene to ethene. In: *Environmental science & technology* 36 (23), S. 5106–5116. DOI: 10.1021/es0255711.

Mattes, T. E.; Alexander, A. K.; Coleman, N. V. (2010): Aerobic biodegradation of the chloroethenes. Pathways, enzymes, ecology, and evolution. In: *FEMS Microbiology Reviews* 34 (4), S. 445–475. DOI: 10.1111/j.1574-6976.2010.00210.x.

McCarty, P. L. (1993): In situ bioremediation of chlorinated solvents. In: *Current opinion in biotechnology* 4 (3), S. 323–330. DOI: 10.1016/0958-1669(93)90103-4.

Michels, J.; Stuhrmann, M.; Frey, C.; Koschitzky, H. P. (2008): Handlungsempfehlungen Mit Methodensammlung. Natürliche Schadstoffminderung bei der Sanierung von Altlasten. DECHEMA e.V., Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <http://www.natural-attenuation.de/download.html>.

North, R. J.; Izzo, A. A. (1993): Mycobacterial virulence. Virulent strains of *Mycobacteria tuberculosis* have faster in vivo doubling times and are better equipped to resist growth-inhibiting functions of macrophages in the presence and absence of specific immunity. In: *The Journal of experimental medicine* 177 (6), S. 1723–1733. DOI: 10.1084/jem.177.6.1723.

Olaniran, A. O.; Pillay, D.; Pillay, B. (2006): Biostimulation and bioaugmentation enhances aerobic biodegradation of dichloroethenes. In: *Chemosphere* 63 (4), S. 600–608. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.08.027.

Paje, M. L. F.; Neilan, B. A.; Couperwhite, L. (1997): A *Rhodococcus* species that thrives on medium saturated with liquid benzene. In: *Microbiology* 143 (9), S. 2975–2981. DOI: 10.1099/00221287-143-9-2975.

Pant, P.; Pant, S. (2010): A review. Advances in microbial remediation of trichloroethylene (TCE). In: *Journal of Environmental Sciences* 22 (1), S. 116–126. DOI: 10.1016/S1001-0742(09)60082-6.

Papen, H.; Berg, R. von (1998): A most probable number method (MPN) for the estimation of cell numbers of heterotrophic nitrifying bacteria in soil. In: *Plant and soil* 199, S. 123–130. DOI: 10.1023/A:1004243810473.

Rabus, R.; Widdel, F. (1995): Anaerobic degradation of ethylbenzene and other aromatic hydrocarbons by new denitrifying bacteria. In: *Archives of microbiology* 163, S. 96–103. DOI: 10.1007/BF00381782.

Reardon, K. F.; Mosteller, D. C.; Bull Rogers, J. D. (2000): Biodegradation kinetics of benzene, toluene, and phenol as single and mixed substrates for *Pseudomonas putida* F1. In: *Biotechnology and Bioengineering* 69 (4), S. 385–400. DOI: 10.1002/1097-0290(20000820)69:4<385::AID-BIT5>3.0.CO;2-Q.

Regonne, R. K.; Martin, F.; Mbawala, A.; Ngassoum, M. B.; Jouanneau, Y. (2013): Identification of soil bacteria able to degrade phenanthrene bound to a hydrophobic sorbent in situ. In: *Environmental pollution* 180, S. 145–151. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.04.038.

Rotaru, A.-E.; Probian, C.; Wilkes, H.; Harder, J. (2010): Highly enriched Betaproteobacteria growing anaerobically with p-xylene and nitrate. In: *FEMS microbiology ecology* 71 (3), S. 460–468. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2009.00814.x.

Rowe, R.; Todd, R.; Waide, J. (1977): Microtechnique for most-probable-number analysis. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 33 (3), S. 675–680. DOI: 10.1128/aem.33.3.675-680.1977.

Schaefer, C. E.; Lavorgna, G. M.; White, E. B.; Annable, M. D. (2017): Bioaugmentation in a well-characterized fractured rock DNAPL source area. In: *Groundwater Monitoring & Remediation* 37 (2), S. 35–42. DOI: 10.1111/gwmr.12208.

Schaefer, C. E.; Towne, R. M.; Vainberg, S.; McCray, J. E.; Steffan, R. J. (2010): Bioaugmentation for treatment of dense non-aqueous phase liquid in fractured sandstone blocks. In: *Environmental science & technology* 44 (13), S. 4958–4964. DOI: 10.1021/es1002428.

Schaefer, W.; Wickert, F.; Tiehm, A. (2007): Modellrechnungen zur Quantifizierung von NA-Prozessen für den LCKW-Schadensfall in Karlsruhe-Ost/Killisfeld. In: *Grundwasser* 12 (2), S. 108–124. DOI: 10.1007/s00767-007-0021-1.

Schäfer, A.; Bouwer, E. J. (2000): Toluene induced cometabolism of cis-1, 2-dichloroethylene and vinyl chloride under conditions expected downgradient of a permeable Fe (0) barrier. In: *Water research* 34 (13), S. 3391–3399. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00088-9.

Schmidt, K. R.; Augenstein, T.; Heidinger, M.; Ertl, S.; Tiehm, A. (2010): Aerobic biodegradation of cis-1, 2-dichloroethene as sole carbon source. Stable carbon isotope fractionation and growth characteristics. In: *Chemosphere* 78 (5), S. 527–532. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2009.11.033.

Schmidt, K. R.; Gaza, S.; Voropaev, A.; Ertl, S.; Tiehm, A. (2014): Aerobic biodegradation of trichloroethene without auxiliary substrates. In: *Water research* 59, S. 112–118. DOI: 10.1016/j.watres.2014.04.008.

Schmidt, K. R.; Tiehm, A. (2008): Natural attenuation of chloroethenes. Identification of sequential reductive/oxidative biodegradation by microcosm studies. In: *Water Science and Technology* 58 (5), S. 1137–1145. DOI: 10.2166/wst.2008.729.

Semprini, L. (1997): Strategies for the aerobic co-metabolism of chlorinated solvents. In: *Current opinion in biotechnology* 8 (3), S. 296–308. DOI: 10.1016/S0958-1669(97)80007-9.

Shao, Y.; Chung, B. S.; Lee, S. S.; Park, W.; Lee, S.-S.; Jeon, C. O. (2009): Zoogloea caeni sp. nov., a floc-forming bacterium isolated from activated sludge. In: *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 59 (3), S. 526–530. DOI: 10.1099/ijss.0.65670-0.

Silver, R. F.; Li, Q.; Ellner, J. J. (1998): Expression of virulence of *Mycobacterium tuberculosis* within human monocytes. Virulence correlates with intracellular growth and induction of tumor necrosis factor alpha but not with evasion of lymphocyte-dependent monocyte effector functions. In: *Infection and immunity* 66 (3), S. 1190–1199. DOI: 10.1128/iai.66.3.1190-1199.19.

Singleton, D. R.; Dickey, A. N.; Scholl, E. H.; Wright, F. A.; Aitken, M. D. (2015): Complete genome sequence of a novel bacterium within the family Rhodocyclaceae that degrades polycyclic aromatic hydrocarbons. In: *Genome announcements* 3 (2), 3552-3559. DOI: 10.1128/genomeA.00251-15.

Singleton, D. R.; Hu, J.; Aitken, M. D. (2012): Heterologous expression of polycyclic aromatic hydrocarbon ring-hydroxylating dioxygenase genes from a novel pyrene-degrading betaproteobacterium. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 78 (10), S. 3552–3559. DOI: 10.1128/AEM.00173-12.

Song, B.; Häggblom, M. M.; Zhou, J.; Tiedje, J. M.; Palleroni, N. J. (1999): Taxonomic characterization of denitrifying bacteria that degrade aromatic compounds and description of *Azoarcus toluvorans* sp. nov. and *Azoarcus toluclasticus* sp. nov. In: *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 49 (3), S. 1129–1140. DOI: 10.1099/00207713-49-3-1129.

Steffan, R. J.; Sperry, K. L.; Walsh, M. T.; Vainberg, S.; Condee, C. W. (1999): Field-scale evaluation of in situ bioaugmentation for remediation of chlorinated solvents in groundwater. In: *Environmental science & technology* 33 (16), S. 2771–2781. DOI: 10.1021/es9812204.

Stieber, M.; Haeseler, F.; Werner, P.; Frimmel, F. H. (1994): A rapid screening method for micro-organisms degrading polycyclic aromatic hydrocarbons in microplates. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 40, S. 753–755. DOI: 10.1007/BF00173340.

Stilinovic, B.; Hrenovic, J. (2004): Rapid detection of sulfide-producing bacteria from sulfate and thiosulfate. In: *Folia microbiologica* 49 (5), S. 513–518. DOI: 10.1007/BF02931526.

Stupp, H. D.; Bakenhus, A.; Gass, M.; Lorenz, D.; Schwaar, I. (2007): MNA als Strategie zur Bearbeitung von CKW-Grundwasserschäden. Grundlagen und Kriterien zur Anwendung. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH Co. KG. In: *Altlastenspektrum* (6), S. 263–274.

Tancsics, A.; Szalay, A. R.; Farkas, M.; Benedek, T.; Szoboszlay, S.; Szabo, I.; Lueders, T. (2018): Stable isotope probing of hypoxic toluene degradation at the Siklós aquifer reveals prominent role of Rhodocyclaceae. In: *FEMS microbiology ecology* 94 (6), 1-11. DOI: 10.1093/femsec/fiy088.

Tiehm, A.; Schmidt, K. R. (2007): Methods to evaluate biodegradation at contaminated sites. In: *Environmental Geology, Handbook of Field Methods and Case Studies Springer, Berlin, Heidelberg*, S. 876–920.

Tiehm, A.; Schmidt, K. R. (2011): Sequential anaerobic/aerobic biodegradation of chloroethenes—aspects of field application. In: *Current opinion in biotechnology* 22 (3), S. 415–421. DOI: 10.1016/j.copbio.2011.02.003.

Tiehm, A.; Schmidt, K. R.; Pfeifer, B.; Heidinger, M.; Ertl, S. (2008): Growth kinetics and stable carbon isotope fractionation during aerobic degradation of cis-1, 2-dichloroethene and vinyl chloride. In: *Water research* 42 (10-11), S. 2431–2438. DOI: 10.1016/j.watres.2008.01.029.

TrinkwV (2023): Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2023/TrinkwV.pdf, zuletzt geprüft am 26.10.2023.

UBA (2022): Bundesweite Übersicht zur Altlastenstatistik. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/altlasten-ihre-sanierung>, zuletzt aktualisiert am 21.10.2022, zuletzt geprüft am 11.01.2023.

van der Zaan, B. M.; Saia, F. T.; Stams, A. J. M.; Plugge, C. M.; Vos, W. M. de; Smidt, H. et al. (2012): Anaerobic benzene degradation under denitrifying conditions. *Peptococcaceae* as dominant benzene degraders and evidence for a syntrophic process. In: *Environmental Microbiology* 14 (5), S. 1171–1181. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2012.02697.x.

Vannelli, T.; Logan, M.; Arciero, D. M.; Hooper, A. B. (1990): Degradation of halogenated aliphatic compounds by the ammonia-oxidizing bacterium *Nitrosomonas europaea*. In: *Appl. Environ. Microbiol.* 56 (4), S. 1169–1171. DOI: 10.1128/aem.56.4.1169-1171.1990.

Verce, M. F.; Gunsch, C. K.; Danko, A. S.; Freedman, D. L. (2002): Cometabolism of cis-1, 2-dichloroethene by aerobic cultures grown on vinyl chloride as the primary substrate. In: *Environmental science & technology* 36 (10), S. 2171–2177. DOI: 10.1021/es011220v.

Verce, M. F.; Ulrich, R. L.; Freedman, D. L. (2000): Characterization of an isolate that uses vinyl chloride as a growth substrate under aerobic conditions. In: *Applied and Environmental Microbiology* 66 (8), S. 3535–3542. DOI: 10.1128/AEM.66.8.3535-3542.2000.

Wallenius, K.; Lappi, K.; Mikkonen, A.; Wickström, A.; Vaalama, A.; Lehtinen, T.; Suominen, L. (2012): Simplified MPN method for enumeration of soil naphthalene degraders using gaseous substrate. In: *Biodegradation* 23, S. 47–55. DOI: 10.1007/s10532-011-9485-x.

White, T. J.; Arnheim, N.; Erlich, H. A. (1989): The polymerase chain reaction. In: *Trends in Genetics* 5, S. 185–189. DOI: 10.1016/0168-9525(89)90073-5.

Wiedemeier, T. H.; Rifai, H. S.; Newell, C. J.; Wilson, J. T. (1999): Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface: John Wiley & Sons.

Wilson, J. T. (2003): Aerobic in situ bioremediation. In: *MTBE Remediation Handbook*, S. 243–264.

Wisotzky, F. (2011): Angewandte Grundwasserchemie, Grundwasserbelastung und Aufbereitung. Grundlagen, Anwendungen und Problemlösungen: Springer Berlin.

Wrenn, B. A.; Venosa, A. D. (1996): Selective enumeration of aromatic and aliphatic hydrocarbon degrading bacteria by a most-probable-number procedure. In: *Canadian journal of microbiology* 42 (3), S. 252–258. DOI: 10.1139/m96-03.

Xiao, Z.; Jiang, W.; Chen, D.; Xu, Y. (2020): Bioremediation of typical chlorinated hydrocarbons by microbial reductive dechlorination and its key players. A review. In: *Ecotoxicology and Environmental Safety* 202, S. 110925. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110925.

Zhao, H.-P.; Schmidt, K. R.; Tiehm, A. (2010): Inhibition of aerobic metabolic cis-1, 2-di-chloroethene biodegradation by other chloroethenes. In: *Water research* 44 (7), S. 2276–2282. DOI: 10.1016/j.watres.2009.12.023.

Zhou, J.; Fries, M. R.; Chee-Sanford, J. C.; Tiedje, J. M. (1995): Phylogenetic analyses of a new group of denitrifiers capable of anaerobic growth on toluene and description of *Azoarcus tolulyticus* sp. nov. In: *International Journal of Systematic Bacteriology* 45 (3), S. 500–506. DOI: 10.1099/00207713-45-3-500.

Publikationen

2023 Intrinsic and bioaugmented aerobic Trichloroethene degradation at seven sites. In: *Helion* (<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13485>)

2024 Aerobic co-metabolic cis-Dichloroethene degradation with Trichloroethene as primary substrate and effects of concentration ratios. In: *Chemosphere* (<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141000>)

Anhang

Anhang 1: Analytikergebnisse der Mikrokosmenversuche

Standort 1: B23 Sterilkontrolle (B23-St) (Teil 1 von 2)		Tag Inkubationszeit															
Parameter	Einheit	0		16		22		25		44		51		58		91	
pH	-	5,1	5,2	4,7	nb	5,1	5,1	5,0	5,0	5,1	5,0	5,1	5,1	5,0	5,1	5,1	
O ₂	mg/L	5,0	7,1	6,6	nb	6,3	6,3	7,0	7,0	6,3	6,3	7,0	7,0	7,4	7,4	7,4	
Temperatur	°C	21	21	21	nb	19	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen	mg/L	0,06	< BG														
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC	mg/L	0,12	< BG														
cDCE GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
cDCE GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
cDCE	mg/L	0,02	< BG														
TCE GC 1	mg/L	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
TCE GC 2	mg/L	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
TCE	mg/L	0,0002	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12										
PCE GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
PCE GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
PCE	mg/L	0,0002	< BG	0,0012	< BG	0,0012	< BG	0,0012	< BG	0,0011							
DOC 1	mg/L	0,40	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	
DOC 2	mg/L	0,2	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	
DOC	mg/L	0,2	0,42														
Chlorid	mg/L	1,0	98	112	nb	nb	nb	nb	nb	115	114	115	117	117	117	117	
Nitrat	mg/L	1,0	53	51	nb	nb	nb	nb	nb	52	52	52	53	53	53	53	
Nitrit	mg/L	1,0	< BG														
Sulfat	mg/L	1,0	865	1032	nb	nb	nb	nb	nb	1092	1066	1066	1091	1091	1091	1091	

nb: nicht bestimmt

Standort 1: B23 Sterilkontrolle (B23-St) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	BG	233		284		316		345		367		388		428		484		512		575		
			Tag	Inkubationszeit																			
pH	-	BG			5,2	5,2	5,2	5,2	5,3	4,9	5,2	5,3	5,1	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
O ₂	mg/l	BG			8,0	5,4	7,8	5,0	5,7	5,7	6,0	5,6	8,4	8,4	8,0	8,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,2
Temperatur	°C				22	23	22	22	21	22	22	22	22	22	22	22	23	23	23	23	23	23	22
Ethen GC 1	mg/l				< BG																		
Ethen GC 2	mg/l				< BG																		
Ethen	mg/l	0,06			< BG																		
VC GC 1	mg/l				< BG	< BG																	
VC GC 2	mg/l				< BG	< BG																	
VC	mg/l	0,12			< BG																		
cDCE GC 1	mg/l				0,33	0,43	0,35	0,35	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
cDCE GC 2	mg/l				0,34	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
cDCE	mg/l	0,02			0,34	0,38	0,34	0,38	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,40
TCE GC 1	mg/l				0,77	0,84	0,92	0,92	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,89
TCE GC 2	mg/l				0,82	0,79	0,77	0,77	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,90
TCE	mg/l	0,0002			0,79	0,82	0,84	0,84	0,88	0,89													
PCE GC 1	mg/l				< BG																		
PCE GC 2	mg/l				< BG																		
PCE	mg/l	0,0002			< BG																		
DOC 1	mg/l				0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,65
DOC 2	mg/l				0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,57
DOC	mg/l	0,2			0,2	0,61																	
Chlorid	mg/l				1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,21
Nitrat	mg/l				1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Nitrit	mg/l				1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Sulfat	mg/l				1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

nb: nicht bestimmt

Standort 1: B23 Grundwasser ohne Inokulum (B23-GW) (Teil 1 von 2)

Parameter	Einheit	BG	Tag Inkulationszeit									
			0	8	14	17	27	36	43	50	57	64
pH	-		7,0	7,1	6,6		7,2	6,5	6,4	6,3	6,9	7,5
O ₂	mg/L		5,8	8,2	6,8		7,6	7,3	7,4	7,7	7,9	7,9
Temperatur	°C		21	21	21		19	20	20	21	21	20
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG		< BG					
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG		< BG					
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG		< BG					
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG		< BG					
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG		< BG					
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG		< BG					
cDCE GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG		< BG					
cDCE GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG		< BG					
cDCE	mg/L	0,02	< BG	< BG	< BG		< BG	0,31	0,30	0,32	0,31	0,26
TCE GC 1	mg/L		0,037	< BG	0,70		0,67	0,68	0,50	0,15	0,15	0,24
TCE GC 2	mg/L		0,037	< BG	0,69		0,56	0,65	0,49	0,15	0,15	0,23
TCE	mg/L	0,0002	0,037	< BG	< BG		< BG	0,69	0,62	0,67	0,50	0,15
PCE GC 1	mg/L		0,095	< BG	0,0012		< BG	0,0012	< BG	< BG	< BG	< BG
PCE GC 2	mg/L		0,095	< BG	0,0012		< BG	0,0012	< BG	< BG	< BG	< BG
PCE	mg/L	0,0002	0,095	< BG	< BG		< BG	0,0012	< BG	< BG	< BG	< BG
DOC 1	mg/L		0,63	1,4	0,44		0,48	0,42	0,46	0,52	0,64	0,47
DOC 2	mg/L		0,62	1,4	0,62		0,50	0,48	0,53	0,55	0,46	0,44
DOC	mg/L	0,2	0,63	1,4	0,53		0,49	0,45	0,50	0,54	0,55	0,58
Chlорid	mg/L	1,0	1,12	112	111		110	111	110	111	111	114
Nitrat	mg/L	1,0	51	51	50		50	50	50	50	50	51
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG	< BG		< BG	52				
Sulfat	mg/L	1,0	91	92	97		90	91	90	90	90	91

nb: nicht bestimmt

Standort 1: B23 Grundwasser ohne Inokulum (B23-GW) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	BG	225		276		308		337		343		359		380		420		476		504		567		637		
			Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		Nährstoffzulage		
pH	-	BG	7,4	7,3	7,4	7,5	7,5	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	
O ₂	mg/L		8,7	5,9	5,8	5,9	5,8	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	
Temperatur	°C		23	23	21	22	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG																							
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG																							
Ethen	mg/L	0,06																									
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG																							
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG																							
VC	mg/L	0,12																									
cDCE GC 1	mg/L		0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	
cDCE GC 2	mg/L		0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	
cDCE	mg/L	0,02																									
TCE GC 1	mg/L		0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	
TCE GC 2	mg/L		0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	
TCE	mg/L	0,0002																									
PCE GC 1	mg/L		0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	
PCE GC 2	mg/L		0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058	0,0058		
PCE	mg/L	0,0002																									
DOC 1	mg/L		0,70	0,64	0,54	0,53	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	
DOC 2	mg/L		0,70	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	
DOC	mg/L	0,2																									
Chlорid	mg/L		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Nitrat	mg/L		50	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
Nitrit	mg/L		1,0	< BG	< BG	< BG																					
Sulfat	mg/L		1,0	90	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89

nb: nicht bestimmt

Standort 1: B23 Grundwasser mit Flüssigkultur (B23-FK) (Teil 1 von 2)

Parameter	Einheit	BG	Tag Inkubationszeit									
			0	8	14	17	27	36	43	50	57	64
pH	-		7,1	7,3	7,0	nb	7,3	7,0	6,8	7,0	7,1	7,4
O ₂	mg/L	6,4	8,7	7,1	nb	8,3	7,6	8,1	7,9	8,1	8,5	8,3
Temperatur	°C	21	21	20	nb	19	19	19	19	20	20	20
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L											
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L											
cDCE GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 2	mg/L	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE	mg/L											
TCE GC 1	mg/L	0,153	< BG	< BG	0,79	0,72	0,23	0,033	0,030	0,031	0,027	0,027
TCE GC 2	mg/L	0,0002	0,2	< BG	< BG	0,79	0,71	0,23	0,031	0,028	0,029	0,027
TCE	mg/L											
PCE GC 1	mg/L	0,0016	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PCE GC 2	mg/L	0,0002	0,0016	< BG								
PCE	mg/L											
DOC 1	mg/L	0,51	1,04	0,42	0,48	0,48	0,45	0,51	0,53	0,49	0,52	0,43
DOC 2	mg/L	0,55	1,08	0,48	0,52	0,48	0,54	0,56	0,57	0,43	0,45	0,47
DOC	mg/L	0,2	0,53	1,06	0,45	nb	0,50	0,47	0,53	0,55	0,48	0,44
Chlорid	mg/L	1,0	106	107	104	104	105	105	105	105	105	107
Nitrat	mg/L	1,0	42	48	47	nb	47	47	47	47	47	48
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Sulfat	mg/L	1,0	87	88	86	nb	86	87	86	87	87	88

nb: nicht bestimmt

Standort 1: B23 Grundwasser mit Flüssigkultur (B23-FK) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	BG	225		276		316		345		351		367		388		428		484		512		575			
			Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe			
pH	-		7,6	7,4	7,5	7,5	5,8	5,8	nb	nb	7,4	7,4	6,1	6,1	7,4	7,5	7,4	7,4	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6		
O ₂	mg/L	8,0	5,6	23	21	21	22	nb	nb	21	22	22	22	21	21	22	22	21	21	23	23	24	24	24	22	
Temperatur	°C																									
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG																						
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG																					
Ethen	mg/L	0,06																								
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG																					
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG																					
VC	mg/L	0,12																								
cDCE GC 1	mg/L		0,22	0,23	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	
cDCE GC 2	mg/L		0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	
cDCE	mg/L	0,02																								
TCE GC 1	mg/L		0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	
TCE GC 2	mg/L		0,023	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	
TCE	mg/L	0,0002																								
PCE GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG																					
PCE GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG																					
PCE	mg/L	0,0002																								
DOC 1	mg/L		0,64	0,54	0,49	0,52	0,51	0,51	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	
DOC 2	mg/L		0,72	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	
DOC	mg/L	0,2																								
Chlорid	mg/L	1,0	105	104	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	
Nitrat	mg/L	1,0	47	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG	< BG																					
Sulfat	mg/L	1,0	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83

nb: nicht bestimmt

Standort1: B23 Grundwasser mit Kultur auf Quarzsand (B23-CS) (Teil 1 von 2)										
Parameter	Einheit	0	9	15	18	28	37	44	51	58
Temperatur	°C	22	21	21	nb	18	19	20	19	20
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06								
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12								
DCDE GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
DCDE GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
DCDE	mg/L	0,02								
TCE GC 1	mg/L	0,062	< BG	< BG	0,82	0,78	0,85	0,78	0,69	0,44
TCE GC 2	mg/L	0,067	< BG	< BG	0,80	0,79	0,81	0,71	0,72	0,42
TCE	mg/L	0,0002								
PCE GC 1	mg/L	0,00076	< BG	< BG	0,81	0,79	0,83	0,75	0,70	0,43
PCE GC 2	mg/L	0,00083	< BG							
PCE	mg/L	0,0002								
DOC 1	mg/L	0,49	0,98	0,46	0,49	0,50	0,49	0,49	0,47	0,44
DOC 2	mg/L	0,50	0,70	0,51	0,52	0,49	0,53	0,53	0,56	0,44
DOC	mg/L	0,2								
Chlorid	mg/L	1,0	1,12	1,12	1,11	nb	0,51	0,50	0,51	0,44
Nitrat	mg/L	1,0	49	51	50	nb	50	50	50	50
Nitrit	mg/L	1,0	< BG							
Sulfat	mg/L	1,0	93	90	90	nb	90	89	89	90

n: nicht bestimmt

Standort1: B23 Grundwasser mit Kulturland auf Quarzsand (B23-QS) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	BG	226		277		309		338		344		360		381		421		477		505		568		
			Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		Nährstoffzufuhr		
pH	-		7,9	7,7	7,8	7,8	7,6	7,6	7,8	7,8	7,7	7,7	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	8,0	8,0	8,0	8,0	
O ₂	mg/L	8,3	6,0	6,5	5,6	nb	nb	22	22	nb	nb	6,1	6,5	5,9	5,9	8,8	8,8	8,6	8,6	8,6	8,6	8,4	8,4	8,4	8,6
Temperatur	°C		22	23	22	22	22	22	nb	nb	21	22	22	22	21	22	22	21	22	22	24	24	24	22	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG																					
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG																					
Ethen	mg/L	0,06																							
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG																					
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG																					
VC	mg/L	0,12																							
cDCE GC 1	mg/L		0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	
cDCE GC 2	mg/L		0,20	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	
cDCE	mg/L	0,02																							
TCE GC 1	mg/L		0,014	0,018	0,018	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	
TCE GC 2	mg/L		0,019	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	
TCE	mg/L	0,0002																							
PCE GC 1	mg/L		< BG	< BG																					
PCE GC 2	mg/L		0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	0,00079	
PCE	mg/L	0,0002																							
DOC 1	mg/L		0,66	0,56	0,46	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	
DOC 2	mg/L		0,68	0,62	0,48	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	
DOC	mg/L	0,2																							
Chlорid	mg/L	1,0	1,11	1,10	1,11	1,11	1,10	1,11	1,11	1,10	1,11	1,10	1,11	1,10	1,11	1,10	1,11	1,10	1,11	1,10	1,11	1,10	1,11	1,10	
Nitrat	mg/L	1,0	50	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG																					
Sulfat	mg/L	1,0	90	88	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	

nb: nicht bestimmt

Standort 2: GW M9 Sterilkontrolle (GW M9-St) (Teil 1 von 2)

Parameter	Einheit	Tag Inkubationszeit	BG	0	16	22	44	51	58	100	233	284
pH	-			5,6	5,5	5,6	5,5	5,8	5,7	5,5	5,5	
O2	mg/L			1,9	7,1	5,7	5,2	6,4	7,0	7,0	7,0	7,8
Temperatur	°C			21	21	20	20	19	19	21	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG									
Ethen GC 2	mg/L		< BG									
Ethen	mg/L	0,06	< BG									
VC GC 1	mg/L		< BG									
VC GC 2	mg/L		< BG									
VC	mg/L	0,12	< BG									
cDCE GC 1	mg/L		0,017	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,018
cDCE GC 2	mg/L		0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,016
cDCE	mg/L	0,02	0,018	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,018	0,019	0,017	0,017
TCE GC 1	mg/L		0,53	0,65	0,66	0,60	0,65	0,63	0,58	0,57	0,48	
TCE GC 2	mg/L		0,53	0,63	0,62	0,65	0,63	0,62	0,60	0,52	0,47	
TCE	mg/L	0,0002	0,53	0,64	0,64	0,63	0,64	0,62	0,59	0,54	0,47	
PCE GC 1	mg/L		0,28	0,39	0,38	0,36	0,37	0,37	0,33	0,31	0,24	
PCE GC 2	mg/L		0,27	0,37	0,37	0,38	0,37	0,36	0,33	0,31	0,27	0,25
PCE	mg/L	0,0002	0,28	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,33	0,29	0,25	
DOC 1	mg/L		0,35	0,41	0,41	0,41	0,41	0,40	0,39	0,39	0,52	
DOC 2	mg/L		0,38	nb	0,57							
DOC	mg/L	0,2									0,55	nb
Chlорid	mg/L	1,0	194	214	221	219	220	219	223	nb	nb	
Nitrat	mg/L	1,0	6,3	5,7	6,3	6,2	6,2	6,3	6,3	nb	nb	
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	nb	nb							
Sulfat	mg/L	1,0	1115	1160	1232	1205	1200	1200	1214	nb	nb	

nb: nicht bestimmt

Standort 2: GWM9 Sterilkontrolle (GWM9-St) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	316	345	367	388	428	484	512	575	645
pH	-									
O2	mg/L									
Temperatur	°C									
Ethen GC 1	mg/L									
Ethen GC 2	mg/L									
Ethen	mg/L	0,06								
VC GC 1	mg/L									
VC GC 2	mg/L									
VC	mg/L	0,12								
cDCE GC 1	mg/L									
cDCE GC 2	mg/L									
cDCE	mg/L	0,02	0,018	0,017	0,022	0,021	0,022	0,021	0,019	0,023
TCE GC 1	mg/L									
TCE GC 2	mg/L									
TCE	mg/L	0,0002	0,53	0,50	0,56	0,49	0,50	0,53	0,51	0,56
PCE GC 1	mg/L									
PCE GC 2	mg/L									
PCE	mg/L	0,0002	0,27	0,25	0,23	0,20	0,20	0,21	0,08	0,20
DOC 1	mg/L									
DOC 2	mg/L									
DOC	mg/L	0,2	nb	0,65						
Chlорid	mg/L	1,0	nb	232						
Nitrat	mg/L	1,0	nb	5,0						
Nitrit	mg/L	1,0	nb	< BG						
Sulfat	mg/L	1,0	nb	1168						

nb: nicht bestimmt

Standort 2: GW/M9 Grundwasser ohne Inokulum (GW/M9-GW) (Teil 1 von 2)		0	8	14	27	36	43	50	55	225
Tag Inkubationszeit	Einheit	BG								
pH	-									
O2	mg/L									
Temperatur	°C									
Ethen GC 1	mg/L	< BG								
Ethen GC 2	mg/L	< BG								
Ethen	0,06	< BG								
VC GC 1	mg/L	< BG								
VC GC 2	mg/L	< BG								
VC	0,12	< BG								
cDCE GC 1	mg/L	0,018	0,018	0,019	0,010	0,011	0,010	0,010	0,009	0,010
cDCE GC 2	mg/L	0,019	0,015	0,019	0,010	0,011	0,010	0,010	0,010	0,010
cDCE	0,02	0,019	0,016	0,019	0,010	0,011	0,010	0,009	0,010	0,010
TCE GC 1	mg/L	0,60	0,49	0,33	0,0019	0,00080	0,00065	0,0015	< BG	< BG
TCE GC 2	mg/L	0,61	0,41	0,33	0,0014	0,00069	0,00087	0,0014	< BG	< BG
TCE	0,0002	0,61	0,45	0,33	0,0012	0,0016	0,00075	0,00076	0,0014	< BG
PCE GC 1	mg/L	0,35	0,31	0,39	0,37	0,37	0,45	0,34	0,35	0,33
PCE GC 2	mg/L	0,34	0,35	0,38	0,35	0,36	0,37	0,35	0,34	0,20
PCE	0,0002	0,34	0,31	0,38	0,36	0,37	0,41	0,34	0,35	0,33
DOC 1	mg/L	0,47	0,50	0,41	0,47	0,41	0,46	0,45	0,41	0,59
DOC 2	mg/L	0,49	0,57	0,45	0,48	0,45	0,47	0,47	0,53	0,60
DOC	0,2	0,48	0,54	0,43	0,48	0,43	0,47	0,46	0,47	0,60
Chlорid	mg/L	1,0	2,14	2,14	2,11	2,11	2,10	2,10	2,12	2,19
Nitrat	mg/L	1,0	< BG	6,0	5,6	5,7	5,6	5,7	6,0	5,9
Nitrit	mg/L	1,0	< BG							
Sulfat	mg/L	1,0	374	369	364	365	364	362	364	352

nb: nicht bestimmt

Standort 2: GWM9 Grundwasser ohne Inokulum (GWM9-GW) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	BG	276	308	337	359	380	420	476	504	567	637
pH	-	BG										
O2	mg/L		7,3	7,3	7,2	7,3	7,1	7,0	7,4	7,5	7,5	7,6
Temperatur	°C		5,8	6,2	6,3	6,2	7,0	6,6	8,6	8,8	8,3	8,5
Ethen GC 1	mg/L		< BG									
Ethen GC 2	mg/L		< BG									
Ethen	mg/L	0,06	< BG									
VC GC 1	mg/L		< BG									
VC GC 2	mg/L		< BG									
VC	mg/L	0,12	< BG									
cDCE GC 1	mg/L		< BG	0,012	0,011	0,011	0,011	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
cDCE GC 2	mg/L		0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
cDCE	mg/L	0,02	0,011	0,011	0,011	0,011	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
TCE GC 1	mg/L		< BG	0,79	0,76	0,79	0,76	0,79	0,82	0,74	0,70	0,65
TCE GC 2	mg/L		0,58	0,78	0,76	0,66	0,75	0,73	0,76	0,68	0,68	0,77
TCE	mg/L	0,0002	0,58	0,79	0,76	0,73	0,75	0,77	0,75	0,69	0,69	0,74
PCE GC 1	mg/L		< BG	0,25	0,25	0,25	0,25	0,14	0,22	0,23	0,23	0,22
PCE GC 2	mg/L		0,25	0,25	0,25	0,25	0,20	0,23	0,25	0,24	0,22	0,20
PCE	mg/L	0,0002	0,25	0,25	0,25	0,25	0,23	0,23	0,24	0,24	0,22	0,21
DOC 1	mg/L		0,69	0,58	0,53	0,39	0,51	0,56	1,06	0,54	0,56	0,57
DOC 2	mg/L		0,73	0,55	0,53	0,49	0,52	0,54	0,97	0,53	0,55	0,48
DOC	mg/L	0,2	0,71	0,57	0,53	0,44	0,52	0,55	1,02	0,54	0,56	0,53
Chlorid	mg/L	1,0	212	213	212	213	222	219	219	220	220	222
Nitrat	mg/L	1,0	6,0	5,9	6,0	6,9	6,3	6,3	6,3	6,4	6,4	6,5
Nitrit	mg/L	1,0	< BG									
Sulfat	mg/L	1,0	379	360	359	362	374	364	364	362	364	369

nb: nicht bestimmt

Standort 2: GW M9 Grundwasser mit Flüssiggultur (GW M9-FK) (Teil 1 von 2)

Parameter	Einheit	BG	Tag Inkubationszeit								cDCE, TCE-Zugabe	36	43	50	57	64	78	92
			0	8	14	27	35	cDCE, TCE-Zugabe	7,0	7,0								
pH	-		7,1	7,1	7,3				6,9	7,0								
O ₂	mg/L	2,8	6,4	6,6	7,5	7,1			7,8	7,8								
Temperatur	°C	21	21	21	18	20			19	18								
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG								
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG								
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG								
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG								
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG								
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG								
cDCE GC 1	mg/L		0,024	0,024	0,017	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016								
cDCE GC 2	mg/L		0,024	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016								
cDCE	mg/L	0,02	0,024	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016								
TCE GC 1	mg/L		0,76	0,49	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058								
TCE GC 2	mg/L		0,42	0,42	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027								
TCE	mg/L	0,0002	0,76	0,45	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058	0,00058								
PCE GC 1	mg/L		0,36	0,35	0,37	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36								
PCE GC 2	mg/L		0,27	0,38	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34								
PCE	mg/L	0,0002	0,36	0,31	0,37	0,35	0,36	0,35	0,35	0,35								
DOC 1	mg/L		0,48	0,59	0,39	0,43	0,60	0,60	0,42	0,45								
DOC 2	mg/L		0,51	0,64	0,45	0,53	0,63	0,63	0,46	0,46								
DOC	mg/L	0,2	0,50	0,62	0,42	0,48	0,62	0,62	0,44	0,48								
Chlорid	mg/L	1,0	201	202	201	198	nb	nb	198	199								
Nitrat	mg/L	1,0	3,5	5,5	5,5	5,5	nb	nb	5,4	5,5								
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG	< BG	< BG	nb	nb	< BG	< BG								
Sulfat	mg/L	1,0	350	348	346	342	nb	nb	340	397								

nb: nicht bestimmt

Standort2: GW M9 Grundwasser mit Flüssigkultur (GW M9-FK) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	BG	225		276		308		337		343		359		380		420		476		504		567			
			Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe		Nährstoffzugabe	
pH	-		7,3	7,3	7,4	7,4	6,1	6,3	7,4	7,4	6,3	6,3	nb	7,6	7,2	7,4	7,3	7,4	7,4	7,3	7,4	7,4	7,4	7,5	7,5	
O ₂	mg/L	24	6,9	6,0	22	21			6,1	6,3	21	21	nb	5,4	6,4	5,7	5,7	8,8	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,2	8,5	
Temperatur	°C													22	21	21	21	20	20	20	20	20	20	20	20	
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG																						
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG																						
Ethen	mg/L	0,06																								
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG																						
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG																						
VC	mg/L	0,12																								
cDCE GC 1	mg/L		0,21	0,22	0,20	0,19	0,20	0,19	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,17	0,17	
cDCE GC 2	mg/L		0,21	0,19	0,20	0,19	0,20	0,19	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,17	0,15	0,15	0,14	0,13	0,15	0,15	
cDCE	mg/L	0,02																								
TCE GC 1	mg/L		0,019	0,022	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	
TCE GC 2	mg/L		0,021	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	
TCE	mg/L	0,0002																								
PCE GC 1	mg/L		0,24	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	
PCE GC 2	mg/L		0,26	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	
PCE	mg/L	0,0002																								
DOC 1	mg/L		0,64	0,63	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	
DOC 2	mg/L		0,63	0,65	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	
DOC	mg/L	0,2																								
Chlорid	mg/L	210	199	199	200	200	198	208	208	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207	
Nitrat	mg/L	5,5	7,5	7,6	7,7	7,7	7,7	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	
Nitrit	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Sulfat	mg/L	328	355	355	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337

nb: nicht bestimmt

Standort 2: GWM9 Grundwasser mit Kultur auf Quarzsand (GWM9-QS) (Teil 1 von 2)

Parameter	Einheit	BG	Tag Inkubationszeit										cDCE, TCE-Zugabe	37	44	51	58	65	79
			0	9	15	28	36	37	44	51	58	65							
pH	-		7,0	7,1	7,2	7,3	7,1	7,0	7,1	7,0	7,0	7,1	< BG	< BG	< BG	< BG	7,4	6,8	
O ₂	mg/L	2,8	6,7	6,6	7,6	7,5	7,6	7,5	7,6	7,1	7,9	7,9	< BG	< BG	< BG	< BG	8,1	7,8	
Temperatur	°C	22	21	20	19	19	19	19	19	19	19	19	< BG	< BG	< BG	< BG	19	20	
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
cDCE GC 1	mg/L	0,018	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,34	0,38	0,37	0,38	0,36	0,35	
cDCE GC 2	mg/L	0,019	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,33	0,37	0,37	0,37	0,36	0,35	
cDCE	mg/L	0,02	0,019	< BG	0,33	0,38	0,37	0,36	0,37	0,35									
TCE GC 1	mg/L	0,66	0,0011	< BG	0,51	0,87	0,84	0,86	0,80	0,72									
TCE GC 2	mg/L	0,67	0,0012	< BG	0,50	0,83	0,85	0,83	0,80	0,81									
TCE	mg/L	0,0002	0,67	0,0012	< BG	0,0013	0,50	0,85	0,84	0,80	0,82								
PCE GC 1	mg/L	0,40	0,35	0,33	0,37	0,34	0,37	0,34	0,37	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,34	0,35	
PCE GC 2	mg/L	0,40	0,38	0,38	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,35	0,36	0,35	0,34	0,35	
PCE	mg/L	0,0002	0,40	0,37	0,36	0,36	0,36	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,34	0,34	0,31	
DOC 1	mg/L	0,50	0,50	0,45	0,43	0,52	0,43	0,45	0,46	0,45	0,46	0,46	0,47	0,51	0,49	0,47	0,43	0,49	
DOC 2	mg/L	0,54	0,52	0,46	0,50	0,56	0,50	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,47	0,51	0,49	0,47	0,43	0,46	
DOC	mg/L	0,2	0,52	0,46	0,47	0,54	0,47	0,54	0,46	0,46	0,50	0,48	0,48	0,48	0,48	0,43	0,48	0,48	
Chlорid	mg/L	1,0	2,12	2,14	2,10	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,10	2,09	2,10	2,10	2,10	2,11	2,11	2,11	
Nitrat	mg/L	1,0	5,7	5,7	5,6	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	6,0	6,0	< BG	< BG	< BG	6,0	6,0	6,0	
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Sulfat	mg/L	1,0	364	367	363	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	

nb: nicht bestimmt

Standort 2: GW/M9 Grundwasser mit Kultur auf Quarzsand (GW/M9-QS) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	Tag Inkubationszeit	135	226	277	309	338	344	360	381	421	477	505	568	638
PH	-	BG	nb	7,6	7,4	7,5	7,5	7,4	7,5	7,4	7,4	7,5	7,5	7,6	8,4
CO ₂	mg/L	°C	nb	7,4	6,1	6,2	6,1	6,0	5,6	5,6	5,6	5,6	8,7	8,3	7,6
Temperatur			nb	23	22	21	21	nb	23	22	21	22	21	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG												
Ethen GC 2	mg/L		< BG												
Ethen	mg/L	0,06	< BG												
VC GC 1	mg/L		< BG												
VC GC 2	mg/L		< BG												
VC	mg/L	0,12	< BG												
ODCE GC 1	mg/L		0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,22	0,22	0,22	0,22
ODCE GC 2	mg/L		0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
ODCE	mg/L	0,02	0,23	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,22	0,22	0,17	0,17
TCE GC 1	mg/L		0,027	0,028	0,027	0,030	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,014	0,17
TCE GC 2	mg/L		0,032	0,026	0,025	0,025	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,010	0,0066
TCE	mg/L	0,0002	0,030	0,027	0,026	0,027	0,025	0,010	0,010						
PCE GC 1	mg/L		0,26	0,29	0,28	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
PCE GC 2	mg/L		0,30	0,25	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
PCE	mg/L	0,0002	0,28	0,27	0,27	0,28	0,26	0,22	0,22						
DOC 1	mg/L		0,70	0,65	0,50	0,49	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,43	0,43
DOC 2	mg/L		0,72	0,70	0,52	0,51	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,49	0,49	0,45	0,45
DOC	mg/L	0,2	nb	0,71	0,68	0,51	0,50	nb	0,41	0,45	0,45	0,56	0,56	0,52	0,44
Chlorid	mg/L	1,0	nb	221	209	210	209	nb	210	219	218	218	218	218	218
Nitrat	mg/L	1,0	nb	5,9	8,1	8,1	8,1	nb	9,3	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,9
Nitrit	mg/L	1,0	nb	< BG	< BG	< BG	< BG	nb	< BG						
Sulfat	mg/L	1,0	nb	353	373	355	355	nb	354	374	368	358	360	358	357

nb: nicht bestimmt

Standort 2: B17 Sterilkontrolle (B17-St)		645																							
Tag Inkubationszeit	Einheit	BG		0		14		21		43		49		98		142		233		484		512		575	
Parameter		BG																							
pH	-	5,7	5,3	5,8	5,7	5,8	5,2	6,1	20	19	21	6,3	6,1	5,9	5,8	5,5	5,6	5,5	5,7	5,6	5,8				
O ₂	mg/L	1,9	3,9	4,5	4,5	21	21	21	19	19	20	21	21	21	21	20	21	22	23	23	24	22			
Temperatur	°C	1,5	0,75	0,61	0,41	0,40	0,40	0,40	0,37	0,37	0,37	0,35	0,35	0,35	0,35	0,29	0,29	0,27	0,27	0,25	0,25	0,20			
Ethen GC 1	mg/L	0,06	1,5	0,76	0,59	0,40	0,37	0,36	0,38	0,38	0,38	0,36	0,35	0,35	0,35	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,19			
Ethen GC 2	mg/L	9,5	10	9,9	9,7	9,5	9,7	9,5	8,8	8,8	9,5	9,3	8,9	9,5	8,6	8,6	7,5	7,7	7,6	7,6	7,6	7,6			
Ethen	mg/L	0,06	1,5	0,76	0,59	0,40	0,37	0,36	0,35	0,37	0,36	0,35	0,35	0,35	0,35	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,19			
VC GC 1	mg/L	9,8	9,9	9,4	9,4	74	77	77	77	77	74	74	74	74	74	75	75	75	75	75	75	75			
VC GC 2	mg/L	70	77	73	73	76	75	75	75	75	81	75	75	75	75	72	72	69	69	69	69	69			
VC	mg/L	9,8	9,9	9,4	9,4	74	77	77	77	77	74	74	74	74	74	75									
cDCE GC 1	mg/L	0,02	72	77	75	77	75	75	75	75	80	75	75	75	75	71	71	70	70	69	69	69			
cDCE GC 2	mg/L	55	54	56	55	51	54	54	54	54	52	55	52	52	52	52	47	47	46	46	46	46	46		
cDCE	mg/L	0,02	72	77	75	77	75	75	75	75	80	75	75	75	75	71	71	70	70	68	67	59			
TCE GC 1	mg/L	52	55	51	52	55	54	54	54	54	52	54	52	52	52	52	44	44	44	44	44	44	44		
TCE GC 2	mg/L	54	55	53	54	53	54	54	54	54	52	53	52	52	52	52	45	45	45	45	45	45	45		
TCE	mg/L	54	55	53	54	53	54	54	54	54	52	53	52	52	52	51	45	45	46	46	44	41	36		
PCE GC 1	mg/L	13	12	13	12	13	12	12	12	12	11	13	12	12	12	11	11	11	10	10	10	10			
PCE GC 2	mg/L	13	13	11	11	12	11	12	11	12	11	13	12	12	12	11	10	10	9,2	9,2	9,2	9,2			
PCE	mg/L	13	12	12	12	12	12	12	12	12	11	13	12	12	12	11									
DOC 1	mg/L	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12			
DOC 2	mg/L	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12			
DOC	mg/L	0,2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12				
Chlорid	mg/L	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
Nitrat	mg/L																								
Nitrit	mg/L																								
Sulfat	mg/L	1,0	896	926	918	912	912	912	912	912	912	912	912	912	912	912	912	912	912	912	912	912			
nb: nicht bestimmt																									

Standort 2: B17 Grundwasser ohne Inokulum (B17-GW)

Tage Inkubationszeit			0	6	13	27	35	41	62
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		6,7	6,5	6,5	6,7	6,6	6,4	6,6
O2	mg/L		1,4	2,6	2,0	2,2	3,7	4,3	5,4
Temperatur	°C		21	21	21	21	19	19	21
Ethen GC 1	mg/L		1,3	1,1	0,82	0,67	0,66	0,51	0,49
Ethen GC 2	mg/L		1,4	1,1	0,86	0,66	0,66	0,53	0,45
Ethen	mg/L	0,06	1,3	1,1	0,84	0,66	0,66	0,52	0,47
VC GC 1	mg/L		12	11	10	10	11	9,1	10
VC GC 2	mg/L		12	11	11	10	11	9,7	9,2
VC	mg/L	0,12	12	11	10	10	11	9,4	9,6
cDCE GC 1	mg/L		83	79	76	76	85	74	82
cDCE GC 2	mg/L		79	79	78	77	83	79	77
cDCE	mg/L	0,02	81	79	77	77	84	77	79
TCE GC 1	mg/L		59	59	56	51	59	50	55
TCE GC 2	mg/L		57	58	59	54	58	54	51
TCE	mg/L	0,0002	58	59	58	53	58	52	53
PCE GC 1	mg/L		12	12	10	6,6	7,4	6,3	7,0
PCE GC 2	mg/L		11	11	11	7,1	7,4	6,7	6,3
PCE	mg/L	0,0002	11	12	11	6,9	7,4	6,5	6,7
DOC 1	mg/L		16	15	16	16	16	15	15
DOC 2	mg/L		16	16	15	16	16	16	15
DOC	mg/L	0,2	16	15	16	16	16	15	15
Chlorid	mg/L	1,0	1290	1275	1293	1283	1376	1284	1279
Nitrat	mg/L	1,0	1,4	< BG	1,3	< BG	1,4	1,4	1,4
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Sulfat	mg/L	1,0	195	190	194	191	192	191	187

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			83	90	134	225	477	505	568	638
Parameter	Einheit	BG								
pH	-		6,9	6,4		6,7	6,8	6,8	6,9	6,9
O2	mg/L		3,6	4,1		5,5	6,4	6,3	6,7	6,7
Temperatur	°C		20	20		24	20	22	24	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG							
Ethen GC 2	mg/L		< BG							
Ethen	mg/L	0,06	< BG							
VC GC 1	mg/L		0,61	< BG						
VC GC 2	mg/L		0,55	< BG						
VC	mg/L	0,12	0,58	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		82	74	75	72	70	69	68	59
cDCE GC 2	mg/L		76	75	85	70	66	62	64	60
cDCE	mg/L	0,02	79	75	80	71	68	66	66	59
TCE GC 1	mg/L		59	53	51	49	49	45	45	37
TCE GC 2	mg/L		52	53	61	48	42	41	38	38
TCE	mg/L	0,0002	56	53	56	49	45	43	41	38
PCE GC 1	mg/L		7,5	6,6	6,2	6,3	4,7	4,1	4,1	3,3
PCE GC 2	mg/L		6,4	6,6	7,6	6,0	3,9	3,9	3,0	3,4
PCE	mg/L	0,0002	7,0	6,6	6,9	6,1	4,3	4,0	3,5	3,4
DOC 1	mg/L		14	15		12	12	11	11	11
DOC 2	mg/L		14	14		13	12	11	11	10
DOC	mg/L	0,2	14	14		13	12	11	11	10
Chlorid	mg/L	1,0	1316	1299		1301	1356	1349	1346	1355
Nitrat	mg/L	1,0	1,4	< BG		< BG				
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG		< BG				
Sulfat	mg/L	1,0	193	193		194	192	191	191	193

nb: nicht bestimmt

Standort 2: B17 Grundwasser mit Flüssigkultur (B17-FK)

Tage Inkubationszeit		BG	0	6	13	27	35	41	62
Parameter	Einheit								
pH	-		6,8	6,6	6,7	6,8	6,8	6,7	6,7
O2	mg/L		2,5	2,3	2,1	4,7	4,6	4,1	3,8
Temperatur	°C		21	21	21	21	19	19	20
Ethen GC 1	mg/L		1,3	0,97	0,78	0,54	0,52	0,48	< BG
Ethen GC 2	mg/L		1,4	0,98	0,76	0,57	0,51	0,44	< BG
Ethen	mg/L	0,06	1,3	0,98	0,77	0,56	0,51	0,46	< BG
VC GC 1	mg/L		11	10	10	9,2	9,4	9,2	< BG
VC GC 2	mg/L		11	10	9,9	9,6	9,1	8,4	< BG
VC	mg/L	0,12	11	10	10	9,4	9,3	8,8	< BG
cDCE GC 1	mg/L		74	75	74	69	73	71	67
cDCE GC 2	mg/L		76	75	73	71	70	64	65
cDCE	mg/L	0,02	75	75	74	70	72	68	66
TCE GC 1	mg/L		55	55	56	50	53	52	51
TCE GC 2	mg/L		56	55	54	52	49	42	49
TCE	mg/L	0,0002	55	55	55	51	51	47	50
PCE GC 1	mg/L		11	11	10	8,8	9,1	9,0	8,7
PCE GC 2	mg/L		11	11	10	9,0	8,0	6,3	8,4
PCE	mg/L	0,0002	11	11	10	8,9	8,6	7,6	8,5
DOC 1	mg/L		15	16	15	15	15	13	14
DOC 2	mg/L		15	15	15	15	15	13	13
DOC	mg/L	0,2	15	15	15	15	15	13	13
Chlorid	mg/L	1,0	1216	1217	1216	1221	1212	1196	1197
Nitrat	mg/L	1,0	1,5	< BG	< BG	< BG	< BG	1,4	< BG
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Sulfat	mg/L	1,0	180	180	181	181	180	178	176

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit		BG	90	134	225	477	505	568	638
Parameter	Einheit								
pH	-		6,6	nb	7,1	6,9	6,9	6,9	7,0
O2	mg/L		5,1	nb	5,1	7,2	6,7	6,6	7,0
Temperatur	°C		20	nb	23	21	21	24	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		67	74	64	61	58	54	50
cDCE GC 2	mg/L		68	66	66	62	57	57	52
cDCE	mg/L	0,02	68	70	65	62	57	55	51
TCE GC 1	mg/L		51	55	43	44	40	27	33
TCE GC 2	mg/L		51	49	50	45	39	33	35
TCE	mg/L	0,0002	51	52	46	45	40	30	34
PCE GC 1	mg/L		8,8	9,1	6,5	5,5	5,0	1,9	3,8
PCE GC 2	mg/L		8,4	8,0	8,2	5,6	4,7	3,2	4,0
PCE	mg/L	0,0002	8,6	8,6	7,4	5,6	4,8	3,2	3,9
DOC 1	mg/L		11		12	12	11	10	10
DOC 2	mg/L		12		12	12	11	10	10
DOC	mg/L	0,2	11	nb	12	12	11	10	10
Chlorid	mg/L	1,0	1229	nb	1223	1280	1278	1287	1288
Nitrat	mg/L	1,0	< BG	nb	< BG				
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	nb	< BG				
Sulfat	mg/L	1,0	182	nb	181	181	180	183	183

nb: nicht bestimmt

Standort 2: B17 Grundwasser mit Kultur auf Quarzsand (B17-QS)

Tage Inkubationszeit			0	7	14	28	36	42	63
Parameter	Einheit	BG							
pH			6,7	6,7	6,7	6,9	6,9	6,8	6,7
O2	mg/L		2,3	3,1	3,1	5,5	5,1	4,1	4,4
Temperatur	-		22	21	20	19	19	19	20
Ethen GC 1	g		1,3	0,79	0,58	0,39	0,41	0,38	< BG
Ethen GC 2	g		1,3	0,80	0,55	0,43	0,43	0,39	< BG
Ethen	mg/L	0,06	1,3	0,80	0,57	0,41	0,42	0,39	< BG
VC GC 1	%		11	10	9,4	8,3	9,0	8,9	< BG
VC GC 2	mg/L		11	10	8,8	9,0	9,3	9,0	< BG
VC	mg/L	0,12	11	10	9,1	8,7	9,2	8,9	< BG
cDCE GC 1	%		78	76	74	67	74	74	69
cDCE GC 2	mg/L		78	79	70	72	76	75	68
cDCE	mg/L	0,02	78	78	72	70	75	74	68
TCE GC 1	%		58	54	54	47	53	53	50
TCE GC 2	mg/L		57	58	50	51	54	52	50
TCE	mg/L	0,0002	58	56	52	49	53	52	50
PCE GC 1	%		12	10	9,0	7,1	8,3	8,3	7,2
PCE GC 2	mg/L		11	11	8,2	8,0	8,3	7,5	7,5
PCE	mg/L	0,0002	11	10	8,6	7,6	8,3	7,9	7,4
DOC 1	%		17	16	15	16	15	14	14
DOC 2	mg/L		17	16	15	16	15	14	13
DOC	mg/L	0,2	17	16	15	16	15	14	13
Chlorid	mg/L	1,0	1291	1277	1282	1289	1275	1274	1282
Nitrat	mg/L	1,0	1,4	< BG	< BG	1,4	1,4	< BG	< BG
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Sulfat	mg/L	1,0	192	189	191	190	190	190	189

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			84	91	135	226	477	505	568	638
Parameter	Einheit	BG								
pH			7,0	6,8	nb	7,2	6,9	7,0	7,0	7,1
O2	mg/L		5,6	5,8	nb	5,4	7,2	7,1	6,7	7,4
Temperatur	-		20	20	nb	22	21	22	24	22
Ethen GC 1	g		< BG							
Ethen GC 2	g		< BG							
Ethen	mg/L	0,06	< BG							
VC GC 1	%		< BG	< BG	< BG	< BG	0,13	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L		< BG							
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	0,13	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 1	%		72	72	69	67	67	61	61	51
cDCE GC 2	mg/L		70	71	67	62	63	62	60	53
cDCE	mg/L	0,02	71	72	68	64	65	61	61	52
TCE GC 1	%		54	53	49	49	49	42	40	31
TCE GC 2	mg/L		51	46	47	40	43	43	38	34
TCE	mg/L	0,0002	53	50	48	44	46	42	39	33
PCE GC 1	%		8,4	8,2	6,9	7,2	5,6	4,6	4,2	3,1
PCE GC 2	mg/L		7,4	5,8	6,3	5,4	4,7	4,8	3,6	3,4
PCE	mg/L	0,0002	7,9	7,0	6,6	6,3	5,1	4,7	3,9	3,3
DOC 1	%		13	12		12	12	11	11	10
DOC 2	mg/L		13	13		13	12	11	11	10
DOC	mg/L	0,2	13	12	nb	13	12	11	11	10
Chlorid	mg/L	1,0	1305	1302	nb	1303	1353	1350	1344	1356
Nitrat	mg/L	1,0	1,4	1,4	nb	< BG				
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	< BG	nb	< BG				
Sulfat	mg/L	1,0	192	192	nb	170	191	190	191	193

nb: nicht bestimmt

Standort 3: BP35 Sterilkontrolle (BP35-St)

Tage Inkubationszeit			0	16	22	44	51	58	100	233	284
Parameter	Einheit	BG									
pH	-		5,9	5,5	6,1	5,8	6,1	6,2	5,4	5,6	5,5
O2	mg/L		2,1	6,3	6,1	7,1	6,3	7,2	7,4	6,9	5,5
Temperatur	°C		21	21	20	19	20	19	20	23	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG								
Ethen GC 2	mg/L		< BG								
Ethen	mg/L	0,06	< BG								
VC GC 1	mg/L		< BG								
VC GC 2	mg/L		< BG								
VC	mg/L	0,12	< BG								
cDCE GC 1	mg/L		0,36	0,344	0,345	0,35	0,34	0,34	0,334	0,35	0,32
cDCE GC 2	mg/L		0,35	0,348	0,347	0,34	0,35	0,33	0,336	0,34	0,31
cDCE	mg/L	0,02	0,36	0,35	0,35	0,35	0,35	0,34	0,34	0,34	0,32
TCE GC 1	mg/L		0,26	0,24	0,23	0,23	0,22	0,23	0,22	0,23	0,20
TCE GC 2	mg/L		0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,22	0,23	0,22	0,19
TCE	mg/L	0,0002	0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,23	0,20
PCE GC 1	mg/L		0,018	0,0011	0,0010	< BG	0,0012	0,0008	0,0011	< BG	< BG
PCE GC 2	mg/L		0,022	0,0010	0,0012	< BG	0,0014	0,0009	0,0013	< BG	< BG
PCE	mg/L	0,0002	0,020	0,0011	0,0011	< BG	0,0013	0,0008	0,0012	< BG	< BG
DOC 1	mg/L		2,6						2,4	2,8	
DOC 2	mg/L		2,6						2,5	2,8	
DOC	mg/L	0,2	2,6	nb	nb	nb	nb	nb	2,5	2,8	nb
Chlorid	mg/L	1,0	112	130	133	133	132	134	133	nb	nb
Nitrat	mg/L	1,0	35	34	34	35	34	35	35	nb	nb
Nitrit	mg/L	1,0	< BG	nb	nb						
Sulfat	mg/L	1,0	644	879	926	912	902	917	908	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			316	345	367	388	428	484	512	575	645
Parameter	Einheit	BG									
pH	-		5,5	5,6	5,2	5,5	5,5	5,2	5,4	5,5	5,5
O2	mg/L		5,0	5,7	5,9	6,0	5,6	8,4	8,2	7,9	8,1
Temperatur	°C		22	22	22	22	22	21	21	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG								
Ethen GC 2	mg/L		< BG								
Ethen	mg/L	0,06	< BG								
VC GC 1	mg/L		< BG								
VC GC 2	mg/L		< BG								
VC	mg/L	0,12	< BG								
cDCE GC 1	mg/L		0,32	0,32	0,33	0,33	0,35	0,36	0,33	0,34	0,40
cDCE GC 2	mg/L		0,31	0,34	0,34	0,32	0,36	0,36	0,36	0,32	0,40
cDCE	mg/L	0,02	0,32	0,33	0,34	0,32	0,36	0,36	0,34	0,33	0,40
TCE GC 1	mg/L		0,20	0,20	0,20	0,19	0,21	0,23	0,18	0,19	0,23
TCE GC 2	mg/L		0,20	0,19	0,20	0,16	0,19	0,23	0,22	0,16	0,23
TCE	mg/L	0,0002	0,20	0,20	0,20	0,17	0,20	0,23	0,20	0,18	0,23
PCE GC 1	mg/L		< BG								
PCE GC 2	mg/L		< BG								
PCE	mg/L	0,0002	< BG								
DOC 1	mg/L										2,7
DOC 2	mg/L										2,6
DOC	mg/L	0,2	nb	2,7							
Chlorid	mg/L	1,0	nb	138							
Nitrat	mg/L	1,0	nb	34							
Nitrit	mg/L	1,0	nb	< BG							
Sulfat	mg/L	1,0	nb	900							

nb: nicht bestimmt

Standort 3: BP35 Grundwasser ohne Inokulum (BP35-GW) (Teil 1 von 2)

Parameter	Einheit	BG	Tag Inkubationszeit									
			0	8	14	27	36	43	50	57	64	78
pH	-		7,1	6,8	6,9	7,3	6,7	6,6	6,7	7,2	7,6	7,4
O ₂	mg/L	1,8	6,2	5,9	7,4	7,4	7,2	7,2	7,8	8,0	8,1	7,3
Temperatur	°C	21	21	21	19	19	21	20	19	19	19	20
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L											
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L											
cDCE GC 1	mg/L	0,37	0,34	0,35	0,34	0,36	0,35	0,35	0,35	0,34	0,34	0,34
cDCE GC 2	mg/L	0,40	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
cDCE	mg/L											
TCE GC 1	mg/L	0,27	0,24	0,22	0,24	0,25	0,24	0,24	0,24	0,18	0,19	0,12
TCE GC 2	mg/L	0,29	0,26	0,21	0,24	0,23	0,24	0,24	0,20	0,19	0,19	0,12
TCE	mg/L											
PCE GC 1	mg/L	0,28	0,25	0,22	0,24	0,24	0,24	0,24	0,19	0,19	0,12	0,060
PCE GC 2	mg/L	0,040	< BG	< BG	0,0013	< BG	< BG	< BG	0,0012	0,0009	0,0015	0,00061
PCE	mg/L											
DOC 1	mg/L	3,3	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,2	3,0	3,1
DOC 2	mg/L	3,3	3,2	3,0	3,1	3,0	3,0	3,0	3,1	3,0	3,0	3,1
DOC	mg/L											
Chlорid	mg/L	0,2	3,3	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,2	3,0	3,0	3,0
Nitrat	mg/L	1,0	nb	129	127	127	126	127	128	128	126	129
Nitrit	mg/L	1,0	nb	34	33	35	34	33	34	33	34	34
Sulfat	mg/L	1,0	nb	< BG								
			168	166	166	165	164	165	165	164	167	165

nb: nicht bestimmt

Standort 3: BP35 Grundwasser ohne Inokulum (BP35-GW) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	BG	225		276		308		337		343		359		380		420		476		504		567			
			Nährstoffzugabe																							
pH	-		6,6	7,0	7,1	7,0	6,8	6,1	21	22	nb	7,1	6,6	7,0	7,3	7,5	7,5	7,4	7,4	7,5	8,1	8,1	8,5	8,5	22	
O ₂	mg/L	0,02	8,0	5,8	6,1	5,8	22	23	21	22	nb	6,1	6,3	6,1	8,7	8,4	8,4	21	22	21	23	23	23	23	22	
Temperatur	°C																									
Ethen																										
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC																										
VC GC 1	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
cDCE																										
cDCE GC 1	mg/L		0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	
cDCE GC 2	mg/L		0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	
TCE																										
TCE GC 1	mg/L		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
TCE GC 2	mg/L		0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	
PCE																										
PCE GC 1	mg/L		0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	
PCE GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
DOC																										
DOC 1	mg/L		3,2	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	
DOC 2	mg/L		3,2	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	
Chlорid	mg/L	0,2																								
Nitrat	mg/L	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Nitrit	mg/L																									
Sulfat	mg/L	1,0	72	161	162	163	163	162	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	161	

nb: nicht bestimmt

Standort 3: BP35 Grundwasser mit Flüssigkultur (BP35-FK) (Teil 1 von 2)

Parameter	Einheit	BG	0	8	14	27	36	43	50	57	64	78	85	92
pH	-		7,2	7,0	7,2	7,4	7,1	6,9	7,0	7,2	7,6	7,5	7,2	
O ₂	mg/L		3,6	6,9	6,8	8,0	7,7	7,2	7,3	8,5	8,1	8,0	7,9	8,1
Temperatur	°C		21	21	21	19	19	20	19	19	19	19	20	19
Ethen GC 1	mg/L		< BG											
Ethen GC 2	mg/L		< BG											
Ethen	mg/L	0,06	< BG											
VC GC 1	mg/L		< BG											
VC GC 2	mg/L		< BG											
VC	mg/L	0,12	< BG											
cDCE GC 1	mg/L		0,36	0,30	0,32	0,28	0,28	0,28	0,27	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24
cDCE GC 2	mg/L		0,33	0,32	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,26	0,24	0,24	0,24
cDCE	mg/L	0,02	0,34	0,31	0,32	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24
TCE GC 1	mg/L		0,39	0,32	0,32	0,23	0,18	0,15	0,11	0,10	0,10	0,058	0,050	0,047
TCE GC 2	mg/L		0,36	0,34	0,30	0,23	0,17	0,15	0,11	0,11	0,11	0,058	0,050	0,047
TCE	mg/L	0,0002	0,37	0,33	0,31	0,23	0,18	0,15	0,11	0,10	0,058	0,050	0,048	0,047
PCE GC 1	mg/L		0,025	< BG										
PCE GC 2	mg/L		0,025	< BG										
PCE	mg/L	0,0002	0,025	< BG										
DOC 1	mg/L		3,2	3,1	2,8	3,2	3,0	2,9	3,1	2,9	3,2	3,0	3,1	3,0
DOC 2	mg/L		3,2	3,1	2,9	3,2	3,0	2,9	3,1	2,9	3,2	3,0	3,1	3,0
DOC	mg/L	0,2	3,2	3,1	2,8	3,2	3,0	2,9	3,1	2,9	3,2	3,0	3,1	2,8
Chlорid	mg/L		1,0	nb	123	120	120	120	120	121	121	120	122	121
Nitrat	mg/L		1,0	nb	32	32	32	32	32	32	32	31	32	32
Nitrit	mg/L		1,0	nb	< BG									
Sulfat	mg/L		1,0	nb	159	155	155	155	154	155	156	155	156	157

nb: nicht bestimmt

Standort 3: BP35 Grundwasser mit Flüssigkultur (BP35-FK) (Teil 2 von 2)

z.B. **zmb**: nicht bestimmt

Standort 3: BP35 Grundwasser mit Kultur auf Quarzsand (BP35-QS) (Teil 1 von 2)

Parameter	Einheit	BG	0	9	15	28	37	44	51	58	65	79	86	93
pH	-		7,2	7,2	7,3	7,4	7,2	7,1	7,1	7,2	7,3	7,5	7,6	7,3
O ₂	mg/L	2,9	7,8	6,0	8,2	8,0	6,9	8,1	8,4	8,2	8,4	8,2	8,1	8,1
Temperatur	°C	22	21	19	19	19	20	20	19	19	19	19	19	20
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG											
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	< BG											
cDCE GC 1	mg/L	0,37	0,33	0,33	0,31	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,30	0,29
cDCE GC 2	mg/L	0,37	0,33	0,33	0,31	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,31	0,28
cDCE	mg/L	0,02	0,37	0,33	0,33	0,31	0,33	0,33	0,32	0,32	0,31	0,30	0,31	0,28
TCE GC 1	mg/L	0,25	0,21	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,15	0,11	0,10
TCE GC 2	mg/L	0,25	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17	0,13	0,11
TCE	mg/L	0,0002	0,25	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,15	0,13	0,10
PCE GC 1	mg/L	0,028	< BG											
PCE GC 2	mg/L	0,028	< BG											
PCE	mg/L	0,0002	0,028	< BG										
DOC 1	mg/L	3,2	3,1	2,9	3,0	3,0	3,0	3,2	2,9	3,3	3,2	3,0	3,1	3,1
DOC 2	mg/L	3,3	3,2	3,0	3,1	3,0	3,0	3,4	3,0	3,2	3,1	3,0	3,0	3,2
DOC	mg/L	0,2	3,2	3,2	3,0	3,0	3,0	3,3	2,9	3,2	3,2	3,0	3,1	3,1
Chlорid	mg/L	1,0	128	129	126	127	127	127	126	127	126	127	126	127
Nitrat	mg/L	1,0	29	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Nitrit	mg/L	1,0	< BG											
Sulfat	mg/L	1,0	167	168	166	167	166	166	167	166	167	166	169	166

nb: nicht bestimmt

Standort 3: BP35 Grundwasser mit Kultur auf Quarzsand (BP35-QS) (Teil 2 von 2)

Parameter	Einheit	BG	226		277		309		338		344		360		381		421		477		505		568				
			Nährstoffzugabe				Nährstoffzugabe				Nährstoffzugabe				Nährstoffzugabe				Nährstoffzugabe				Nährstoffzugabe				
pH	-		7,7	7,5	7,5	7,6	7,6	5,8	nb	nb	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,7	7,7	7,7		
O ₂	mg/L	8,1	5,9	6,2	23	22	22	22	nb	nb	5,9	6,1	5,9	6,1	5,9	6,1	5,9	6,1	5,9	6,1	5,9	6,1	5,9	6,1	8,4	8,6	
Temperatur	°C																									24	22
Ethen	mg/L	0,06																								< BG	< BG
Ethen	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC	mg/L	0,12																								< BG	< BG
VC	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
cDCE	mg/L	0,02																								< BG	< BG
cDCE	mg/L		0,24	0,25	0,24	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21													
TCE	mg/L	0,0002																								< BG	< BG
TCE	mg/L		0,044	0,044	0,047	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049														
PCE	mg/L	0,0002																								< BG	< BG
PCE	mg/L		0,044	0,044	0,051	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050														
DOC	mg/L	0,2																								< BG	< BG
DOC	mg/L		3,3	3,2	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0		
Chlорid	mg/L	1,0		127	110	163	126	nb	138	132	130	129	130	129	130	129	130	131	130	131	130	131	130	131	130	131	
Nitrat	mg/L	1,0		33	52	35	35	nb	36	36	nb	36	36	nb	36	36	nb	36	36	nb	36	36	nb	36	36		
Nitrit	mg/L	1,0		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG			
Sulfat	mg/L	1,0		55	88	163	164	nb	164	170	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165		

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM08/17 Sterilkontrolle (GWM08/17-St)

Parameter	Einheit	BG	Tage Inkubationszeit									
			0	19	34	54	76	117	166	208	252	305
pH	-		5,5	5,2	5,1	5,2	5,1	5,2	5,2	5,2	5,2	5,1
O ₂	mg/L	4,8	6,8	4,9	5,6	5,6	6,7	4,3	5,4	5,7	7,4	7,2
Temperatur	°C	23	25	23	23	22	22	21	22	22	23	23
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	0,41	0,29	0,38	0,37	0,33	0,35	0,34	0,38	0,39	0,37	0,27
VC GC 2	mg/L	0,43	0,37	0,33	0,35	0,35	0,32	0,34	0,37	0,33	0,33	0,26
VC	mg/L	0,12	0,42	0,33	0,35	0,36	0,33	0,36	0,38	0,35	0,26	0,26
cDCE GC 1	mg/L	8,1	8,5	8,4	8,2	8,4	8,2	8,6	8,9	8,8	8,8	7,6
cDCE GC 2	mg/L	8,3	7,7	8,0	7,8	8,0	8,4	7,6	8,1	7,3	7,3	6,7
cDCE	mg/L	0,02	8,4	8,2	8,1	8,2	8,0	8,3	8,6	8,2	8,5	7,5
TCE GC 1	mg/L	13	11	14	14	13	13	14	13	14	14	10
TCE GC 2	mg/L	14	13	12	13	12	12	12	13	12	12	10
TCE	mg/L	0,0002	14	12	13	13	12	13	13	11	13	10
PCE GC 1	mg/L	0,30	0,23	0,31	0,31	0,29	0,29	0,26	0,27	0,26	0,26	0,21
PCE GC 2	mg/L	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,24	0,25	0,17	0,23	0,23
PCE	mg/L	0,0002	0,29	0,25	0,29	0,30	0,28	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25
DOC 1	mg/L	4,6						4,0				
DOC 2	mg/L	4,6						4,0				
DOC	mg/L	0,2	4,6	nb	nb	nb	nb	4,0	nb	nb	nb	nb
Chlорid	mg/L	5,0	5,0	nb	nb	nb	nb	58	nb	nb	nb	52
Nitrit	mg/L	5,0	< BG	nb	nb	nb	< BG	nb	nb	nb	nb	< BG
Nitrat	mg/L	5,0	< BG	nb	nb	nb	< BG	nb	nb	nb	nb	< BG
Sulfat	mg/L	5,0	971	nb	nb	nb	305	nb	nb	nb	nb	574

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GW/M08/17 Grundwasser ohne Inokulum (GW/M08/17-GW)

Parameter	Einheit	BG	Tage Inkubationszeit						Nährstoffzugabe	305
			0	19	34	54	76	117		
pH	-		6,9	7,0	7,0	7,1	7,2	7,1	7,2	7,2
O ₂	mg/L		4,3	5,3	4,4	4,9	4,6	5,1	6,1	7,3
Temperatur	°C		23	25	23	22	21	21	22	24
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	0,42	0,36	0,30	0,28	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	0,40	0,31	0,32	0,27	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	0,41	0,34	0,31	0,27	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 1	mg/L	8,1	7,5	7,5	7,9	7,2	7,4	7,0	7,2	7,2
cDCE GC 2	mg/L	8,0	7,5	7,8	7,6	7,3	7,4	6,7	6,7	6,6
cDCE	mg/L	0,02	8,2	7,8	7,6	7,8	7,4	6,9	7,2	6,8
TCE GC 1	mg/L	15	14	12	13	12	12	11	11	11
TCE GC 2	mg/L	14	12	13	13	11	11	9,0	10	10
TCE	mg/L	0,0002	14	13	12	13	12	11	11	11
PCE GC 1	mg/L	0,33	0,32	0,28	0,31	0,27	0,24	0,22	0,23	0,17
PCE GC 2	mg/L	0,31	0,27	0,29	0,29	0,26	0,23	0,20	0,22	0,19
PCE	mg/L	0,0002	0,32	0,29	0,29	0,30	0,26	0,23	0,22	0,18
DOC 1	mg/L	5,1	5,0	4,8	4,7	4,8	4,5	4,6	4,7	4,5
DOC 2	mg/L	5,2	5,0	4,8	4,8	4,8	4,4	4,6	4,7	4,5
DOC	mg/L	0,2	5,2	5,0	4,8	4,7	4,8	4,6	4,7	4,5
Chlорid	mg/L	2,0	59	54	56	54	49	54	53	52
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	3	2	< BG	4	4
Sulfat	mg/L	2,0	76	72	68	65	62	68	69	68
nb: nicht bestimmt										

Standort 4: GWM08/17 Grundwasser mit Flüssigmilch (GWM08/17-FK)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
			Tag Inkubationszeit											
pH	-	6,9	6,9	7,0	6,9	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,1	7,2	7,3	
O ₂	mg/L	5,8	4,9	4,4	4,9	4,4	4,6	4,6	5,2	5,9	5,9	7,7	8,1	
Temperatur	°C	23	25	23	23	23	22	21	21	22	22	24	23	
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC GC 1	mg/L	0,32	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
VC GC 2	mg/L	0,32	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
VC	mg/L	0,12	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
cDCE GC 1	mg/L	6,9	6,2	6,5	5,3	5,3	4,7	4,7	4,4	4,0	4,0	3,4	2,6	
cDCE GC 2	mg/L	6,6	6,1	5,7	5,1	5,1	4,8	4,8	4,3	4,1	4,1	3,2	2,8	
cDCE	mg/L	0,02	6,8	6,2	6,1	5,2	4,8	4,8	4,4	4,1	4,0	3,3	2,7	2,2
TCE GC 1	mg/L	11	10	10	4,5	4,5	2,7	2,7	0,79	0,53	0,52	15	1,6	
TCE GC 2	mg/L	11	10	8,3	4,2	4,2	2,7	2,7	0,78	0,59	0,53	15	1,5	
TCE	mg/L	0,0002	11	10	9,3	4,3	2,7	0,79	0,56	0,52	0,52	15	1,6	0,41
PCE GC 1	mg/L	0,26	0,24	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,20	0,18	0,17	0,19	0,15	
PCE GC 2	mg/L	0,27	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,20	0,19	0,17	0,17	0,15	
PCE	mg/L	0,0002	0,26	0,23	0,25	0,25	0,24	0,24	0,20	0,18	0,17	0,17	0,15	
DOC 1	mg/L	4,8	4,5	4,4	4,3	4,3	4,6	4,6	4,2	4,1	4,2	4,4	4,1	
DOC 2	mg/L	4,8	4,6	4,4	4,3	4,3	4,2	4,2	4,2	4,3	4,3	4,0	4,1	
DOC	mg/L	0,2	4,8	4,5	4,4	4,3	4,5	4,2	4,2	4,1	4,3	4,4	4,0	4,1
Chlорid	mg/L	57	58	64	60	55	64	66	< BG	< BG	< BG	84	86	
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	15	13	16	16	16	16	< BG	< BG	
Nitrat	mg/L	2,0	17	16	17	17	15	13	16	16	16	20	19	
Sulfat	mg/L	2,0	62	77	77	57	57	64	64	66	66	72	72	

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM08/17 Grundwasser mit Flüssigkultur und Nährstoffzugabe (GWM08/17-FKns)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
			Tag Inkubationszeit											
pH	-	6,9	6,9	7,0	6,9	6,9	7,0	7,0	7,0	7,0	6,9	7,0	7,0	7,0
O ₂	mg/L	5,5	5,4	4,9	4,5	4,8	4,4	5,1	6,1	7,5	7,3	7,3	7,7	7,7
Temperatur	°C	22	25	23	23	22	21	21	21	22	21	21	23	23
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	0,41	0,17	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
VC GC 2	mg/L	0,36	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
VC	mg/L	0,12	0,17	0,15	0,17	0,15	< BG							
cDCE GC 1	mg/L	7,6	6,7	6,4	5,1	4,3	4,7	4,7	4,3	4,3	4,0	3,0	2,5	2,4
cDCE GC 2	mg/L	7,1	6,4	6,2	4,9	4,7	4,0	4,3	4,3	4,3	4,1	2,9	2,8	2,2
cDCE	mg/L	0,02	7,4	6,6	6,3	5,0	4,5	4,3	4,3	4,3	4,0	3,0	2,6	2,3
TCE GC 1	mg/L	14	12	10	2,9	1,7	0,84	0,62	0,57	0,57	0,57	16	0,47	0,35
TCE GC 2	mg/L	13	11	10	2,8	1,6	0,71	0,61	0,57	0,57	0,57	16	0,47	0,40
TCE	mg/L	0,0002	13	11	10	2,9	1,6	0,77	0,61	0,57	0,57	16	0,47	0,37
PCE GC 1	mg/L	0,32	0,27	0,27	0,27	0,25	0,25	0,25	0,22	0,21	0,18	0,21	0,18	0,22
PCE GC 2	mg/L	0,29	0,29	0,25	0,25	0,26	0,23	0,19	0,21	0,19	0,17	0,21	0,19	0,16
PCE	mg/L	0,0002	0,31	0,26	0,26	0,24	0,20	0,21	0,18	0,18	0,21	0,18	0,19	0,19
DOC 1	mg/L	4,6	4,4	4,3	4,3	4,3	4,1	4,2	4,2	4,2	4,2	4,0	4,1	4,0
DOC 2	mg/L	4,6	4,4	4,3	4,3	4,3	4,0	4,0	4,1	4,1	4,1	4,3	4,3	4,0
DOC	mg/L	0,2	4,6	4,4	4,3	4,3	4,3	4,1	4,1	4,2	4,2	4,0	4,0	4,0
Chlорid	mg/L	57	58	58	69	74	70	73	71	71	71	87	87	87
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	19	18	20	19	20	19	19	19	19	22	22	22
Sulfat	mg/L	2,0	66	73	65	78	84	77	71	72	72	70	70	70

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM08/17 Grundwasser mit Quarzsand (GWM08/17-QS)

Parameter	Einheit	Tag Inkubationszeit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-			7,0	6,9	7,0	6,9	6,9	7,0	7,0	7,0	6,9	7,0	7,0	7,0
O ₂	mg/L			5,1	5,3	4,8	5,3	4,6	4,4	5,2	6,0	6,0	7,6	7,3	7,6
Temperatur	°C			23	25	23	22	22	21	21	23	nb	21	24	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG												
Ethen GC 2	mg/L		< BG												
Ethen	mg/L	0,06	< BG												
VC GC 1	mg/L		0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
VC GC 2	mg/L		0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
VC	mg/L	0,12	0,40	0,15	< BG										
cDCE GC 1	mg/L		8,3	6,2	5,1	5,1	5,1	4,7	4,7	4,8	4,8	4,8	4,5	4,0	2,4
cDCE GC 2	mg/L		8,3	5,9	5,3	5,3	5,3	4,7	4,8	4,7	4,7	4,7	4,4	4,2	2,1
cDCE	mg/L	0,02	8,3	6,0	5,2	4,9	4,7	4,8	4,7	4,8	4,8	4,8	4,4	4,1	2,1
TCE GC 1	mg/L		15	5,1	2,9	2,5	1,9	1,9	1,4	1,4	0,94	0,82	0,82	0,39	1,8
TCE GC 2	mg/L		14	5,1	3,0	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	1,3	1,0	1,0	0,78	0,35
TCE	mg/L	0,0002	14	5,1	3,0	2,3	2,0	1,4	1,4	1,0	0,80	0,80	0,80	0,19	0,27
PCE GC 1	mg/L		0,33	0,26	0,29	0,32	0,28	0,28	0,28	0,28	0,25	0,25	0,23	0,19	0,35
PCE GC 2	mg/L		0,31	0,26	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,24	0,24	0,23	0,19	0,22
PCE	mg/L	0,0002	0,32	0,26	0,29	0,30	0,29	0,29	0,29	0,29	0,25	0,22	0,22	0,20	0,27
DOC 1	mg/L		5,1	4,9	4,7	4,6	4,6	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,2
DOC 2	mg/L		5,1	4,9	4,7	4,7	4,6	4,6	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4	4,5	4,2
DOC	mg/L	0,2	5,1	4,9	4,7	4,6	4,6	4,3	4,4	4,4	4,6	4,6	4,5	4,3	4,2
Chlорid	mg/L	2,0	58	66	75	66	60	69	72	68	nb	nb	93	93	
Nitrit	mg/L	2,0	< BG												
Nitrat	mg/L	2,0	4,4	3,3	3,6	3,2	3,2	3,4	3,8	3,8	3,6	3,6	3,6	7,5	7,4
Sulfat	mg/L	2,0	66	77	83	68	63	73	74	70	nb	nb	74	74	

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM08/17 Grundwasser mit Quarzsand und Nährstoffzugabe (GWM08/17-QSns)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
			Tag Inkubationszeit											
pH	-		7,0	6,9	6,9	6,9	7,0	6,9	6,9	7,0	6,9	7,0	7,0	7,0
O ₂	mg/L	4,7	4,8	4,7	4,8	4,9	4,8	4,9	4,4	5,2	6,1	7,7	7,4	7,5
Temperatur	°C	23	25	23	25	22	22	22	21	23	21	21	23	23
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	0,39	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
VC GC 2	mg/L	0,40	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
VC	mg/L	0,12	0,40	0,17	0,15	0,15	< BG							
cDCE GC 1	mg/L	8,1	6,4	6,2	5,5	5,5	5,0	5,0	5,2	5,0	4,6	4,1	2,8	2,5
cDCE GC 2	mg/L	8,0	6,8	5,4	5,0	5,1	5,0	5,1	4,7	4,3	4,5	2,8	2,7	2,2
cDCE	mg/L	0,02	8,0	6,6	5,8	5,3	5,0	5,1	4,8	4,5	4,3	2,8	2,6	2,3
TCE GC 1	mg/L	14	6,3	4,9	5,9	5,9	2,4	2,2	1,9	0,88	14	0,32	0,27	0,36
TCE GC 2	mg/L	14	6,6	4,0	2,6	2,6	2,5	2,0	1,7	0,80	18	0,32	0,29	0,31
TCE	mg/L	0,0002	14	6,4	4,5	5,9	2,4	2,1	1,8	0,84	16	0,32	0,28	0,34
PCE GC 1	mg/L	0,31	0,27	0,27	0,27	0,27	0,29	0,29	0,25	0,24	0,23	0,18	0,20	0,26
PCE GC 2	mg/L	0,31	0,27	0,27	0,27	0,27	0,29	0,29	0,22	0,22	0,20	0,21	0,21	0,20
PCE	mg/L	0,0002	0,31	0,27	0,30	0,30	0,29	0,24	0,23	0,22	0,20	0,23	0,20	0,23
DOC 1	mg/L	5,1	5,1	4,7	4,6	4,7	4,3	4,3	4,5	4,5	4,5	4,6	4,2	4,2
DOC 2	mg/L	5,1	5,0	4,7	4,6	4,7	4,2	4,2	4,4	4,4	4,5	4,5	4,3	4,3
DOC	mg/L	0,2	5,1	5,0	4,7	4,6	4,7	4,3	4,4	4,5	4,6	4,3	4,3	4,3
Chlорid	mg/L	56	65	71	72	74	73	72	72	72	72	88	88	88
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	5,8	5,1	5,5	5,1	2,3	5,4	5,5	5,9	5,9	8,1	8,1	9,0
Sulfat	mg/L	2,0	63	78	82	86	88	88	76	76	74	74	73	74

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM08/17 Grundwasser mit Grundwasser aus Sindelfingen (GWM08/17-SF)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-		7,0	7,0	7,1	7,0	7,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,1
O ₂	mg/L		5,5	5,8	5,0	5,4	5,9	4,6	5,5	6,5	6,5	8,0	7,8	7,9
Temperatur	°C		23	25	22	22	22	21	23	21	23	21	23	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG											
Ethen GC 2	mg/L		< BG											
Ethen	mg/L	0,06	< BG											
VC GC 1	mg/L		0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
VC GC 2	mg/L		0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
VC	mg/L	0,12	0,20	< BG										
cDCE GC 1	mg/L		3,4	3,2	3,5	3,5	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
cDCE GC 2	mg/L		3,6	3,5	3,6	3,5	3,6	3,5	3,6	3,5	3,6	3,5	3,6	3,5
cDCE	mg/L	0,02	3,5	3,3	3,5	3,4	3,3	3,4	3,3	3,4	3,1	3,0	2,8	2,8
TCE GC 1	mg/L		6,1	5,5	6,3	6,7	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	7,5	7,5
TCE GC 2	mg/L		6,7	6,1	6,1	6,7	5,8	6,0	5,8	6,0	5,8	5,8	8,0	8,0
TCE	mg/L	0,0002	6,4	5,8	6,5	6,2	5,9	1,9	0,36	0,32	7,8	3,6	0,00102	0,00045
PCE GC 1	mg/L		0,18	0,17	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,15	0,15	0,13	0,13
PCE GC 2	mg/L		0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,14	0,14	0,13	0,13
PCE	mg/L	0,0002	0,19	0,17	0,19	0,19	0,19	0,18	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13
DOC 1	mg/L		3,1	3,0	3,0	2,9	2,9	2,7	2,7	2,7	2,7	2,6	2,5	2,5
DOC 2	mg/L		3,1	3,1	3,1	3,0	2,8	2,8	2,6	2,7	2,7	2,6	2,5	2,5
DOC	mg/L	0,2	3,1	3,1	3,0	2,8	2,9	2,6	2,7	2,7	2,6	2,5	2,5	2,5
Chlорid	mg/L		123	157	158	151	148	157	171	160	160	157	161	163
Nitrit	mg/L		2,0	< BG										
Nitrat	mg/L		2,0	< BG	3,0	4,5	3,8	4,4	7,4					
Sulfat	mg/L		2,0	139	175	179	173	174	179	186	176	165	165	164

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM08/17 Grundwasser mit Grundwasser aus Sindelfingen und Nährstoffzugabe (GWM08/17-SFns)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
			Tag Inkubationszeit											
pH	-		7,0	7,0	7,1	7,0	7,0	7,1	7,0	7,2	6,6	nb	7,1	7,1
O ₂	mg/L	5,8	8,2	5,2	23	23	5,8	6,9	4,9	5,7	6,6	nb	8,1	8,1
Temperatur	°C		23	25	23	23	22	22	21	23	21	22	23	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
VC GC 2	mg/L	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
VC	mg/L	0,12	0,21	< BG										
cDCE GC 1	mg/L	3,6	3,2	3,3	3,2	3,3	3,2	3,2	3,0	0,083	0,022	0,025	0,031	0,027
cDCE GC 2	mg/L	3,6	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,0	0,080	0,024	0,026	0,029	0,026
cDCE	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,081	0,023	0,025	0,030	0,027	< BG
TCE GC 1	mg/L	6,6	5,8	6,1	5,8	6,1	5,8	5,8	2,1	0,14	0,0051	0,0027	7,5	8,4
TCE GC 2	mg/L	6,6	5,0	5,7	5,0	5,7	5,6	5,6	2,1	0,14	0,0056	0,0034	5,9	7,1
TCE	mg/L	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,14	0,054	0,0031	6,7	7,8	< BG
PCE GC 1	mg/L	0,19	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,15	0,08	0,13	0,15	0,15
PCE GC 2	mg/L	0,19	0,15	0,19	0,15	0,18	0,18	0,18	0,18	0,14	0,14	0,13	0,15	0,15
PCE	mg/L	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,19	0,18	0,15	0,14	0,13	0,14
DOC 1	mg/L	3,0	2,9	2,8	2,7	2,8	2,7	2,8	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5
DOC 2	mg/L	3,0	2,9	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,5	2,5	2,5	2,5	2,3	2,4
DOC	mg/L	0,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,8	2,5	2,5	2,6	2,7	2,5	2,3	2,4
Chlорid	mg/L	2,0	127	155	156	143	138	163	166	155	nb	151	158	158
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	2,8	2,6	2,6	2,2	2,6	2,7	< BG	4,3	4,6	4,6	7,9	7,5
Sulfat	mg/L	2,0	145	173	175	160	150	178	175	165	nb	162	162	161

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM11/17 Sterilkontrolle GWM11/17 (GWM11/17-S†)

Parameter	Einheit	BG	Standort 4: GWM11/17 Sterilkontrolle GWM11/17 (GWM11/17-S†)									
			0	19	34	54	76	117	166	208	252	305
pH	-		5,6	5,3	5,3	5,3	5,3	5,4	5,4	5,5	5,4	5,3
O ₂	mg/L	4,2	6,1	6,1	6,9	6,8	6,6	4,9	7,0	6,3	7,2	7,4
Temperatur	°C	23	24	23	22	22	22	22	22	22	22	23
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	0,74	0,63	0,66	0,65	0,60	0,59	0,61	0,58	0,59	0,57	0,45
VC GC 2	mg/L	0,72	0,65	0,64	0,61	0,63	0,24	0,59	0,53	0,49	0,49	0,43
VC	mg/L	0,12	0,73	0,64	0,65	0,62	0,59	0,61	0,59	0,55	0,53	0,44
cDCE GC 1	mg/L	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	9,1
cDCE GC 2	mg/L	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
cDCE	mg/L	0,02	11	11	11	11	11	11	11	11	10	8,9
TCE GC 1	mg/L	13	12	13	12	13	12	12	12	12	11	11
TCE GC 2	mg/L	10	12	12	12	12	12	12	12	12	10	8,7
TCE	mg/L	0,0002	12	12	12	12	12	12	12	12	11	8,0
PCE GC 1	mg/L	0,45	0,39	0,42	0,43	0,40	0,32	0,52	0,32	0,33	0,33	0,35
PCE GC 2	mg/L	0,32	0,39	0,40	0,40	0,41	0,00	0,20	0,30	0,31	0,17	0,31
PCE	mg/L	0,0002	0,38	0,39	0,41	0,42	0,41	0,32	0,52	0,31	0,32	0,33
DOC 1	mg/L	6,0	6,1				5,3					
DOC 2	mg/L		6,0	nb	nb	nb	5,3	nb	nb	nb	nb	nb
DOC	mg/L	0,2	6,0	nb	nb	nb	5,3	nb	nb	nb	nb	nb
Chlорid	mg/L	5,0	69	nb	nb	nb	86	nb	nb	nb	nb	85
Nitrit	mg/L	5,0	< BG	nb	nb	nb	< BG	nb	nb	nb	nb	< BG
Nitrat	mg/L	5,0	< BG	nb	nb	nb	< BG	nb	nb	nb	nb	< BG
Sulfat	mg/L	5,0	1091	nb	nb	nb	206	nb	nb	nb	nb	418

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM11/17 Grundwasser ohne Inokulum (GWM11/17-GW)

Parameter	Einheit	BG	Nährstoffzugabe										363
			0	19	34	54	76	117	166	208	252	305	
pH	-		6,9	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,1	7,5
O ₂	mg/L		4,0	4,4	5,0	5,1	6,3	4,3	6,5	6,3	7,5	7,1	7,5
Temperatur	°C		23	24	22	21	22	20	21	21	21	23	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L		0,68	0,53	0,55	0,47	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
VC GC 2	mg/L		0,78	0,55	0,51	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
VC	mg/L	0,12	0,73	0,54	0,53	0,46	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		11	11	11	10	10	10	10	10	10	10	10
cDCE GC 2	mg/L		11	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10
cDCE	mg/L	0,02	11	11	10								
TCE GC 1	mg/L		12	12	13	12	12	12	12	12	12	12	12
TCE GC 2	mg/L		13	12	12	11	12	11	12	11	11	11	11
TCE	mg/L	0,0002	13	12	12	11	12	11	12	11	11	10	10
PCE GC 1	mg/L		0,43	0,37	0,45	0,41	0,42	0,42	0,31	0,34	0,34	0,34	0,34
PCE GC 2	mg/L		0,41	0,39	0,40	0,39	0,39	0,39	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34
PCE	mg/L	0,0002	0,42	0,38	0,42	0,40	0,41	0,32	0,34	0,31	0,30	0,24	0,33
DOC 1	mg/L		6,5	6,2	6,3	6,1	6,2	5,8	5,9	6,0	6,0	5,9	5,7
DOC 2	mg/L		6,5	6,3	6,3	6,1	6,2	5,7	5,9	5,9	5,9	6,0	5,7
DOC	mg/L	0,2	6,5	6,3	6,1	6,2	5,8	5,9	5,9	6,0	6,0	5,7	5,7
Chlорid	mg/L	2,0	76	91	91	87	87	90	86	91	91	89	85
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	< BG	2,1	2,1	3,0	2,9	171	160	153	160	163	161
Sulfat	mg/L	2,0	146	176	176	172	164	160	171	153	160	163	156

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM11/17 Grundwasser mit Flüssigmilch (GWM11/17-FK)

Parameter	Einheit	BG	0		19		34		54		76		117		166		208		210		252		305		
			Tag Inkubationszeit	Temperatur	mg/L	mg/L																			
pH	-				7,0	7,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	
O ₂	mg/L				5,1	5,1	7,1	7,1	5,2	6,1	4,3	6,4	6,3	6,4	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Temperatur	°C				23	24	23	23	22	22	22	22	21	21	22	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Ethen GC 1	mg/L				< BG																				
Ethen GC 2	mg/L				< BG																				
Ethen	mg/L	0,06			< BG																				
VC GC 1	mg/L				0,63	0,24	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
VC GC 2	mg/L				0,63	0,21	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
VC	mg/L	0,12			0,63	0,22	0,15	< BG																	
cDCE GC 1	mg/L				9,4	8,6	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	
cDCE GC 2	mg/L				9,3	7,9	8,0	8,0	7,9	8,0	7,6	7,6	6,4	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	
cDCE	mg/L	0,02			9,3	8,2	8,2	8,0	8,0	8,0	6,1	6,1	5,9												
TCE GC 1	mg/L				11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
TCE GC 2	mg/L				11	8,8	9,0	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	
TCE	mg/L	0,0002			11	9,5	9,4	9,0	9,0	9,0	2,7	2,7	1,2	1,2	0,93	0,89									
PCE GC 1	mg/L				0,40	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36		
PCE GC 2	mg/L				0,36	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30		
PCE	mg/L	0,0002			0,38	0,33	0,34	0,35	0,35	0,35	0,33	0,33	0,29	0,29	0,25										
DOC 1	mg/L				6,0	6,0	5,7	5,6	5,6	5,8	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4		
DOC 2	mg/L				5,9	6,0	5,8	5,7	5,7	5,8	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4		
DOC	mg/L	0,2			6,0	5,7	5,6	5,6	5,6	5,6	5,4														
Chlорid	mg/L				69	76	86	82	88	93	98	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	
Nitrit	mg/L				2,0	< BG																			
Nitrat	mg/L				2,0	19	16	17	17	16	17	17	16	17	17	16	17	17	16	17	17	17	17	17	
Sulfat	mg/L				2,0	118	129	142	139	129	141	136	142	136	141	136	142	136	141	136	142	136	140	136	

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM11/17 Grundwasser mit Flüssigkultur und Nährstoffzugabe (GWM11/17-FKns)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
			Tag Inkubationszeit											
pH	-		7,0	7,0	7,1	7,0	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2	7,1	7,3	7,3
O ₂	mg/L	4,8	5,2	5,4	6,0	6,7	4,8	6,7	6,7	6,7	6,7	8,2	8,1	8,1
Temperatur	°C	23	24	23	22	22	21	21	21	22	21	21	23	23
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	0,57	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
VC GC 2	mg/L	0,61	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
VC	mg/L	0,59	0,30	< BG										
cDCE GC 1	mg/L	8,8	8,2	8,2	8,0	6,3	5,9	5,7	5,2	5,0	4,1	3,3	3,2	3,1
cDCE GC 2	mg/L	8,9	8,2	8,1	7,2	6,4	6,0	4,9	5,4	5,2	4,0	3,5	3,5	3,1
cDCE	mg/L	0,02	8,9	8,2	8,2	7,6	6,3	5,9	5,3	5,1	4,0	3,4	3,2	
TCE GC 1	mg/L	10	9,4	9,4	8,1	2,8	1,5	1,0	0,82	1,2	0,81	0,44	0,61	
TCE GC 2	mg/L	10	9,1	9,3	6,9	2,9	1,6	0,82	0,92	1,2	0,80	0,47	0,57	
TCE	mg/L	0,0002	10	9,3	9,3	7,5	2,9	1,6	0,90	0,87	1,2	0,81	0,46	0,59
PCE GC 1	mg/L	0,37	0,33	0,33	0,33	0,33	0,29	0,25	0,22	0,16	0,19	0,15	0,20	
PCE GC 2	mg/L	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,28	0,30	0,26	0,18	0,20	0,19	0,15	0,18
PCE	mg/L	0,0002	0,34	0,32	0,33	0,31	0,29	0,26	0,20	0,18	0,19	0,20	0,15	0,19
DOC 1	mg/L	5,9	5,9	5,8	5,5	5,6	5,5	5,3	5,4	5,4	5,4	5,2	5,2	5,2
DOC 2	mg/L	5,9	5,9	5,7	5,5	5,6	5,4	5,3	5,4	5,4	5,4	5,2	5,2	5,2
DOC	mg/L	0,2	5,9	5,9	5,7	5,5	5,6	5,5	5,3	5,4	5,4	5,2	5,2	
Chlорid	mg/L	69	78	85	84	87	92	96	94	nb	108	107	105	
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	
Nitrat	mg/L	2,0	21	19	20	19	18	19	19	nb	25	25	22	
Sulfat	mg/L	2,0	120	139	142	137	130	141	140	136	139	139	137	

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM11/17 Grundwasser mit Quarzsand (GWM11/17-QS)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-		7,0	7,1	7,1	6,9	7,0	7,1	7,1	7,1	7,2	7,1	7,1	7,1
O ₂	mg/L		6,5	5,9	5,1	5,4	6,5	4,4	6,5	6,2	nb	7,8	7,4	7,7
Temperatur	°C		23	24	23	22	22	21	21	22	nb	22	23	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG											
Ethen GC 2	mg/L		< BG											
Ethen	mg/L	0,06	< BG											
VC GC 1	mg/L		0,50	0,24	0,20	0,25	0,19	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
VC GC 2	mg/L		0,75	0,25	0,19	0,25	0,19	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
VC	mg/L	0,75	0,25	0,19	< BG									
cDCE GC 1	mg/L		10	8,9	8,9	8,3	7,4	6,9	7,0	7,0	6,2	4,8	4,1	3,8
cDCE GC 2	mg/L		11	9,3	8,4	8,0	7,7	6,9	7,0	6,5	6,5	4,9	4,3	3,8
cDCE	mg/L	0,02	11	9,1	8,6	8,2	7,6	6,9	7,0	6,8	6,3	4,9	4,2	3,8
TCE GC 1	mg/L		10	7,3	6,4	5,0	3,2	2,1	1,6	1,5	1,5	1,9	0,43	0,63
TCE GC 2	mg/L		13	8,1	5,7	4,6	3,4	2,2	1,5	1,4	1,5	2,0	0,45	0,59
TCE	mg/L	0,0002	12	7,7	6,0	4,8	3,3	2,2	1,6	1,4	14	2,0	0,44	0,61
PCE GC 1	mg/L		0,34	0,29	0,42	0,42	0,38	0,31	0,32	0,30	0,25	0,24	0,21	0,31
PCE GC 2	mg/L		0,44	0,33	0,37	0,38	0,39	0,31	0,28	0,26	0,27	0,25	0,22	0,26
PCE	mg/L	0,0002	0,39	0,31	0,39	0,40	0,38	0,31	0,30	0,28	0,26	0,25	0,21	0,29
DOC 1	mg/L		6,5	6,5	6,2	6,0	6,1	5,7	5,8	5,9	6,0	5,6	5,5	5,5
DOC 2	mg/L		6,5	6,5	6,2	6,0	6,1	5,6	5,7	5,8	5,8	5,6	5,5	5,5
DOC	mg/L	0,2	6,5	6,2	6,0	6,1	5,7	5,8	5,8	5,8	5,9	5,6	5,5	5,5
Chlорid	mg/L	2,0	74	92	96	92	94	96	103	99	nb	114	114	
Nitrit	mg/L	2,0	< BG											
Nitrat	mg/L	2,0	4,8	3,1	3,2	2,3	3,1	3,3	3,7	3,5	nb	8,8	8,6	7,3
Sulfat	mg/L	2,0	141	167	164	158	152	161	160	153	nb	154	154	158

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM11/17 Grundwasser mit Quarzsand und Nährstoffzugabe (GWM11/17-QSns)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
			Tag Inkubationszeit											
pH	-		7,0	7,0	7,1	7,0	6,9	7,1	7,0	7,1	7,0	7,0	7,1	7,1
O ₂	mg/L	4,4	5,8	5,2	5,8	6,5	6,5	6,4	6,4	5,9	5,9	7,1	7,4	7,3
Temperatur	°C	23	24	23	24	22	22	21	21	22	22	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	0,76	0,26	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
VC GC 2	mg/L	0,64	0,24	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
VC	mg/L	0,70	0,25	0,15	< BG									
cDCE GC 1	mg/L	11	9,3	8,8	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
cDCE GC 2	mg/L	10	9,6	8,4	8,4	8,1	8,1	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
cDCE	mg/L	0,02	11	9,5	8,6	8,5	8,5	7,9	7,2	6,8	6,4	6,7	4,3	4,1
TCE GC 1	mg/L	14	8,5	7,1	5,7	3,8	3,8	2,7	2,7	1,7	1,4	1,4	1,0	3,6
TCE GC 2	mg/L	11	7,6	6,5	5,7	4,1	4,1	3,0	3,0	1,3	1,3	1,3	1,3	0,82
TCE	mg/L	0,0002	13	8,0	6,8	5,7	4,0	2,8	1,5	1,3	1,4	1,4	0,92	0,76
PCE GC 1	mg/L	0,50	0,38	0,40	0,37	0,37	0,37	0,30	0,32	0,29	0,28	0,28	0,18	0,33
PCE GC 2	mg/L	0,36	0,31	0,35	0,41	0,40	0,40	0,33	0,19	0,26	0,26	0,26	0,24	0,30
PCE	mg/L	0,0002	0,43	0,34	0,37	0,41	0,38	0,32	0,32	0,27	0,28	0,27	0,21	0,31
DOC 1	mg/L	6,4	6,3	6,1	5,9	6,1	5,6	5,6	5,7	5,9	5,7	5,7	5,6	5,6
DOC 2	mg/L	6,4	6,4	6,1	6,0	6,0	5,6	5,6	5,7	5,8	5,7	5,7	5,6	5,5
DOC	mg/L	0,2	6,4	6,4	6,1	6,0	6,0	5,6	5,7	5,8	5,7	5,7	5,6	5,6
Chlорid	mg/L	75	93	97	94	94	100	103	100	100	100	100	116	113
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	6,4	4,9	5,2	5,0	2,3	5,2	5,5	5,6	5,6	5,6	10	8,6
Sulfat	mg/L	2,0	143	173	169	161	156	171	161	156	156	156	159	162

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM11/17 Grundwasser mit Grundwasser aus Sindelfingen (GWM11/17-SF) (Deckel undicht)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-		7,0	7,2	7,1	7,1	7,1	7,3	7,3	7,2	7,2	7,3	7,3	
O ₂	mg/L	6,2	6,5	6,3	7,1	7,1	7,5	7,2	7,2	6,4	6,4	8,2	8,2	
Temperatur	°C	22	24	23	22	22	22	21	21	22	22	22	23	
Ethen GC 1	mg/L	< BG												
Ethen GC 2	mg/L	< BG												
Ethen	mg/L	< BG												
VC GC 1	mg/L	0,37	0,37	0,33	< BG									
VC GC 2	mg/L	0,33	0,35	< BG										
VC	mg/L	0,35	< BG											
cDCE GC 1	mg/L	5,2	4,3	4,2	3,8	3,8	3,3	2,7	2,7	1,2	0,010	5,3	3,4	
cDCE GC 2	mg/L	4,8	4,2	3,9	3,6	3,6	3,5	3,1	1,1	0,0084	5,7	3,4	< BG	
cDCE	mg/L	5,0	4,2	4,1	3,7	3,4	2,9	1,2	1,2	0,0090	5,5	3,4	< BG	
TCE GC 1	mg/L	6,5	4,3	4,4	3,4	3,4	2,7	0,93	0,24	0,0029	6,4	0,82	< BG	
TCE GC 2	mg/L	5,6	4,0	4,0	3,2	2,9	2,9	1,1	0,26	0,0020	6,6	0,83	0,0044	
TCE	mg/L	6,1	4,1	4,2	3,3	2,8	1,0	0,25	0,0025	6,5	0,83	0,0044	0,0039	
PCE GC 1	mg/L	0,25	0,17	0,17	0,15	0,15	0,051	0,026	0,013	0,011	0,011	0,32	0,17	
PCE GC 2	mg/L	0,21	0,16	0,17	0,15	0,055	0,034	0,015	0,0047	0,015	0,015	0,32	0,17	
PCE	mg/L	0,23	0,17	0,15	0,17	0,053	0,030	0,014	0,011	0,012	0,011	0,031	0,028	
DOC 1	mg/L	3,9	3,8	3,7	3,6	3,6	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4	3,1	3,0	
DOC 2	mg/L	3,9	3,8	3,7	3,6	3,6	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4	3,1	3,0	
DOC	mg/L	3,9	3,8	3,7	3,6	3,6	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4	3,1	3,0	
Chlорid	mg/L	143	175	177	173	168	172	162	164	nb	175	180	179	
Nitrit	mg/L	2,0	< BG											
Nitrat	mg/L	2,0	< BG	5,7	6,0									
Sulfat	mg/L	2,0	186	222	220	215	207	218	206	206	206	218	218	

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM11/17 Grundwasser mit Grundwasser aus Sindelfingen und Nährstoffzugabe (GWM11/17-SFNs)

Parameter	Einheit	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-	7,1	6,6	7,1	7,1	7,2	7,2	7,1	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2
O ₂	mg/L	6,8	7,3	6,6	7,6	7,4	5,4	7,3	6,9	nb	8,0	7,8	8,1
Temperatur	°C	23	24	23	22	22	21	21	22	nb	22	23	23
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG										
VC GC 1	mg/L	0,44	0,44	< BG									
VC GC 2	mg/L	0,35	0,40	< BG									
VC	mg/L	0,12	0,40	< BG									
cDCE GC 1	mg/L	5,9	4,7	5,0	4,8	4,9	4,9	4,8	4,9	4,9	6,0	6,1	6,1
cDCE GC 2	mg/L	5,1	4,7	4,6	4,7	4,8	4,9	4,8	4,9	4,9	6,1	6,1	6,1
cDCE	mg/L	0,02	5,5	4,7	4,8	4,9	4,9	4,8	4,9	4,9	6,1	6,1	6,1
TCE GC 1	mg/L	7,9	5,0	6,2	5,8	5,2	1,2	1,2	0,0027	0,0022	8,4	8,4	8,4
TCE GC 2	mg/L	6,1	5,5	5,4	5,8	5,5	1,4	1,4	0,0021	0,0019	8,6	8,4	8,4
TCE	mg/L	0,0002	7,0	5,2	5,8	5,8	5,4	5,4	0,0024	0,0020	8,5	8,4	8,4
PCE GC 1	mg/L	0,31	0,19	0,25	0,24	0,22	0,22	0,17	0,20	0,19	0,46	0,47	0,45
PCE GC 2	mg/L	0,23	0,21	0,22	0,24	0,23	0,20	0,16	0,17	0,47	0,48	0,41	0,43
PCE	mg/L	0,0002	0,27	0,20	0,23	0,24	0,23	0,18	0,18	0,18	0,47	0,48	0,43
DOC 1	mg/L	3,7	3,7	3,5	3,4	3,4	3,2	3,2	3,2	3,2	3,3	3,0	2,9
DOC 2	mg/L	3,7	3,7	3,5	3,4	3,4	3,2	3,3	3,2	3,2	3,2	3,0	2,9
DOC	mg/L	0,2	3,7	3,7	3,5	3,4	3,4	3,2	3,3	3,2	3,2	3,0	2,9
Chlорid	mg/L	2,0	144	176	180	174	173	186	188	183	nb	179	192
Nitrit	mg/L	2,0	< BG										
Nitrat	mg/L	2,0	2,9	2,8	2,5	2,5	2,6	2,7	4,8	nb	6,6	7,7	7,1
Sulfat	mg/L	2,0	191	229	226	218	233	232	230	nb	227	226	226

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM12/17 Sterilkontrolle (GWM12/17-St)

Parameter	Einheit	BG	Tage Inkubationszeit											
			0	19	34	54	76	117	166	208	252	305	363	
pH	-													
O ₂	mg/L		5,7	5,3	5,2	4,2	5,3	5,0	5,5	5,4	5,3	5,4	5,4	
Temperatur	°C		4,6	6,5	5,3	5,4	4,7	5,0	6,0	7,4	7,5	7,4	7,4	
Ethen GC 1	mg/L		23	25	23	22	22	21	22	22	22	22	23	
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
cDCE GC 1	mg/L		2,3	2,1	2,4	2,3	2,2	2,1	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	
cDCE GC 2	mg/L		2,1	2,2	2,4	2,4	2,2	2,3	2,2	2,3	2,3	2,3	2,2	
cDCE	mg/L	0,02	2,2	2,1	2,4	2,2	2,3	2,2	2,3	2,2	2,3	2,2	2,1	1,9
TCE GC 1	mg/L		1,9	1,7	2,0	2,0	1,8	1,8	2,0	1,9	1,9	1,9	1,7	
TCE GC 2	mg/L		1,7	1,7	2,0	1,8	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	2,0	1,5	
TCE	mg/L	0,0002	1,8	1,7	2,0	1,9	1,8	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,6	1,4
PCE GC 1	mg/L		0,065	0,055	0,070	0,074	0,062	0,064	0,073	0,067	0,061	0,061	0,061	
PCE GC 2	mg/L		0,054	0,052	0,068	0,063	0,065	0,069	0,067	0,060	0,072	0,060	0,060	
PCE	mg/L	0,0002	0,059	0,054	0,069	0,069	0,063	0,066	0,070	0,063	0,067	0,061	0,059	
DOC 1	mg/L		3,3											
DOC 2	mg/L		3,3											
DOC	mg/L	0,2	3,3	nb										
Chlорid	mg/L	5,0	51	nb	nb	nb	nb	58	nb	nb	nb	nb	nb	56
Nitrit	mg/L	5,0	< BG	nb	nb	nb	< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb	< BG
Nitrat	mg/L	5,0	< BG	nb	nb	nb	< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb	< BG
Sulfat	mg/L	5,0	1092	nb	nb	nb	nb	280	nb	nb	nb	nb	nb	488

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GW/M12/17 Grundwasser ohne Inokulum (GW/M12/17-GW)

Parameter	Einheit	BG	Nährstoffzugabe									
			0	19	34	54	76	117	166	208	252	305
pH	-		6,9	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,5	7,2	7,3	7,2
O ₂	mg/L		4,6	4,9	5,1	4,6	4,8	4,6	6,1	8,0	7,9	7,8
Temperatur	°C		23	25	22	22	22	20	20	22	21	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L		0,14	< BG								
VC GC 2	mg/L		0,13	< BG								
VC	mg/L	0,13	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 1	mg/L		2,5	2,2	2,3	2,2	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9
cDCE GC 2	mg/L		2,4	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,2	2,0	1,7
cDCE	mg/L	0,02	2,4	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9	1,7	1,5
TCE GC 1	mg/L		2,2	1,8	1,9	1,9	1,7	1,8	1,6	1,6	0,37	0,29
TCE GC 2	mg/L		2,0	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,5	0,36	0,29
TCE	mg/L	0,0002	2,1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5	0,36	0,29	0,34
PCE GC 1	mg/L		0,082	0,062	0,071	0,076	0,061	0,065	0,055	0,063	0,051	0,062
PCE GC 2	mg/L		0,072	0,060	0,059	0,063	0,065	0,059	0,056	0,058	0,047	0,057
PCE	mg/L	0,0002	0,077	0,061	0,065	0,070	0,063	0,062	0,056	0,051	0,049	0,059
DOC 1	mg/L		3,6	3,9	3,5	3,4	5,1	3,2	3,5	3,2	3,3	3,2
DOC 2	mg/L		3,6	3,8	3,6	3,4	5,0	3,1	3,5	3,2	3,4	3,2
DOC	mg/L	0,2	3,6	3,9	3,6	3,4	5,1	3,1	3,5	3,2	3,3	3,2
Chlорid	mg/L		55	57	61	59	60	59	52	64	68	64
Nitrit	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L		< BG	< BG	< BG	2,5	2,4	< BG	< BG	2,6	2,5	2,3
Sulfat	mg/L		67	76	84	82	85	86	72	93	99	103
nb: nicht bestimmt												

Standort 4: GWM12/17 Grundwasser mit Flüssigkultur (GWM12/17-FK)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
			Tag Inkubationszeit											
pH	-		6,9	7,1	7,0	7,1	7,1	7,2	7,2	7,1	7,2	7,2	7,1	7,1
O ₂	mg/L	4,9	4,7	4,8	4,9	5,6	4,7	5,4	5,4	5,8	5,8	7,9	7,9	7,9
Temperatur	°C	23	25	23	22	22	21	21	22	22	22	22	23	23
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 1	mg/L	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
cDCE GC 2	mg/L	1,9	1,7	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
cDCE	mg/L	0,02	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4
TCE GC 1	mg/L	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
TCE GC 2	mg/L	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
TCE	mg/L	0,0002	1,5	1,4	1,5	1,4	1,5	1,3	1,3	1,3	1,3	0,24	0,24	0,24
PCE GC 1	mg/L	0,041	0,051	0,052	0,052	0,053	0,053	0,054	0,054	0,055	0,055	0,049	0,047	0,047
PCE GC 2	mg/L	0,050	0,045	0,054	0,052	0,053	0,053	0,054	0,052	0,056	0,056	0,058	0,049	0,049
PCE	mg/L	0,0002	0,045	0,048	0,048	0,048	0,048	0,053	0,053	0,054	0,054	0,043	0,043	0,043
DOC 1	mg/L	3,3	3,7	3,2	3,1	3,9	2,9	3,2	3,0	3,0	3,0	3,1	2,8	2,8
DOC 2	mg/L	3,3	3,7	3,2	3,1	3,8	2,9	3,3	3,0	3,0	3,0	3,1	2,8	2,8
DOC	mg/L	0,2	3,3	3,7	3,2	3,1	3,9	2,9	3,3	3,0	3,0	3,1	2,8	2,8
Chlорid	mg/L	59	57	61	60	63	59	60	56	56	56	65	61	60
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	19	17	18	17	16	17	16	17	16	17	19	19	19
Sulfat	mg/L	62	72	78	75	80	76	74	68	68	68	82	74	74

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM12/17 Grundwasser mit Flüssigkultur und Nährstoffzugabe (GWM12/17-FKns)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-		7,0	7,1	7,0	7,0	7,2	7,2	7,2	7,1	7,1	7,2	7,2	7,2
O ₂	mg/L		4,1	4,6	5,0	4,9	5,1	4,9	5,3	6,0	8,1	8,1	8,1	8,0
Temperatur	°C		23	25	23	22	22	21	21	22	22	22	22	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG											
Ethen GC 2	mg/L		< BG											
Ethen	mg/L	0,06	< BG											
VC GC 1	mg/L		< BG											
VC GC 2	mg/L		< BG											
VC	mg/L	0,12	< BG											
cDCE GC 1	mg/L		2,0	1,7	1,8	1,7	1,7	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	1,1	1,0
cDCE GC 2	mg/L		1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,5	1,4	1,1	1,0	0,89
cDCE	mg/L	0,02	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5	1,5	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9
TCE GC 1	mg/L		1,8	1,4	1,5	1,3	1,3	0,68	0,34	0,24	2,3	0,19	0,17	0,20
TCE GC 2	mg/L		1,6	1,5	1,5	1,5	1,2	0,72	0,37	0,23	2,5	0,19	0,15	0,16
TCE	mg/L	0,0002	1,7	1,5	1,5	1,3	0,70	0,36	0,23	2,4	0,19	0,16	0,18	
PCE GC 1	mg/L		0,061	0,046	0,053	0,056	0,052	0,052	0,050	0,049	0,042	0,048	0,044	0,052
PCE GC 2	mg/L		0,052	0,051	0,050	0,053	0,046	0,046	0,056	0,045	0,049	0,036	0,034	
PCE	mg/L	0,0002	0,056	0,048	0,052	0,055	0,049	0,054	0,051	0,046	0,043	0,049	0,040	0,052
DOC 1	mg/L		3,3	3,6	3,2	3,1	3,1	2,9	3,3	3,0	3,0	3,0	2,9	2,5
DOC 2	mg/L		3,4	3,5	3,2	3,1	2,9	3,4	3,0	3,1	2,9	2,9	2,9	2,8
DOC	mg/L	0,2	3,4	3,6	3,2	3,1	2,9	3,3	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9	2,7
Chlорid	mg/L		59	56	58	59	62	60	59	59	63	61	59	
Nitrit	mg/L		2,0	< BG										
Nitrat	mg/L		2,0	18	20	19	18	19	18	18	19	20	20	
Sulfat	mg/L		2,0	63	70	74	77	81	73	73	71	71	72	

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM12/17 Grundwasser mit Quarzsand (GWM12/17-QS)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-		7,0	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,3	7,2	7,2
O ₂	mg/L	5,3	5,1	4,9	4,9	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Temperatur	°C	23	25	23	22	22	21	21	21	21	21	21	21	21
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG											
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	< BG											
cDCE GC 1	mg/L	2,2	1,7	1,9	1,9	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
cDCE GC 2	mg/L	2,0	1,9	1,8	1,8	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
cDCE	mg/L	0,02	2,1	1,8	1,9	1,7								
TCE GC 1	mg/L	1,9	0,89	1,0	0,84	0,64	0,63	0,31	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
TCE GC 2	mg/L	1,5	1,0	0,92	0,73	0,62	0,59	0,28	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
TCE	mg/L	0,0002	1,7	1,0	1,0	0,78	0,63	0,61	0,30	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
PCE GC 1	mg/L	0,068	0,050	0,067	0,060	0,056	0,060	0,063	0,062	0,10	0,045	0,045	0,045	0,045
PCE GC 2	mg/L	0,053	0,060	0,058	0,054	0,058	0,058	0,063	0,062	0,10	0,045	0,045	0,045	0,045
PCE	mg/L	0,0002	0,060	0,055	0,063	0,060	0,059	0,058	0,058	0,10	0,045	0,045	0,045	0,045
DOC 1	mg/L	3,7	3,7	3,4	3,3	3,1	3,4	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
DOC 2	mg/L	3,7	3,7	3,4	3,4	3,3	3,2	3,3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
DOC	mg/L	0,2	3,7	3,7	3,4	3,3	3,1	3,3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Chlорid	mg/L	55	56	59	60	61	61	60	55	55	55	55	55	55
Nitrit	mg/L	2,0	< BG											
Nitrat	mg/L	2,0	4,2	3,3	3,4	3,2	2,0	3,5	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
Sulfat	mg/L	2,0	67	78	83	85	86	87	78	78	78	78	78	78

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM12/17 Grundwasser mit Quarzsand und Nährstoffzugabe (GWM12/17-QSns)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
			Tag Inkubationszeit											
pH	-	mg/L	6,9	7,1	7,1	7,1	7,2	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,3
O ₂	mg/L	5,2	4,8	5,0	4,9	5,3	5,0	5,3	5,3	5,9	5,9	7,8	7,9	7,8
Temperatur	°C		23	25	23	22	22	21	21	22	22	22	22	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 1	mg/L		2,1	1,9	2,0	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,0
cDCE GC 2	mg/L		2,1	1,8	1,9	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,0
cDCE	mg/L	0,02	2,1	1,8	1,9	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,0
TCE GC 1	mg/L		1,7	1,0	1,1	0,87	0,73	0,62	0,62	0,34	0,28	0,28	0,26	0,20
TCE GC 2	mg/L		1,7	1,0	1,0	0,81	0,74	0,62	0,62	0,32	0,27	0,27	0,27	0,20
TCE	mg/L	0,0002	1,7	1,0	1,0	0,84	0,74	0,62	0,33	0,28	2,6	0,36	0,16	0,20
PCE GC 1	mg/L		0,059	0,057	0,071	0,064	0,058	0,059	0,060	0,052	0,051	0,057	0,045	0,060
PCE GC 2	mg/L		0,059	0,059	0,058	0,062	0,057	0,059	0,068	0,054	0,054	0,056	0,057	0,053
PCE	mg/L	0,0002	0,059	0,057	0,066	0,061	0,058	0,058	0,057	0,050	0,052	0,056	0,057	0,057
DOC 1	mg/L		3,6	3,7	3,4	3,3	3,3	3,1	3,4	3,2	3,2	3,2	3,0	3,1
DOC 2	mg/L		3,7	3,7	3,4	3,3	3,3	3,0	3,6	3,2	3,1	3,1	3,0	3,1
DOC	mg/L	0,2	3,6	3,7	3,4	3,3	3,3	3,0	3,5	3,2	3,2	3,2	3,0	3,1
Chlорid	mg/L		55	56	59	58	62	60	59	58	58	66	59	59
Nitrit	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L		5,7	4,6	4,8	4,3	4,9	5,2	5,3	7,3	6,8	6,8	6,9	6,9
Sulfat	mg/L		65	79	84	86	87	78	79	89	89	78	78	78

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GW/M12/17 Grundwasser mit Grundwasser aus Sindelfingen (GW/M12/17-SF)

Parameter	Einheit	BG	Tag Inkubationszeit										Nährstoffabgabe	210	252	305	
			0	19	34	54	76	117	166	208	210	252					
pH	-		7,0	7,1	7,1	7,1	7,2	7,1	7,2	7,2	7,2	7,3	< BG	< BG	7,2	7,2	
O ₂	mg/L		5,7	6,7	6,0	5,9	5,8	5,0	5,5	6,3	6,3	8,2	< BG	< BG	8,2	8,1	
Temperatur	°C		23	25	23	22	22	21	21	22	22	23	< BG	< BG	23	23	
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
cDCE GC 1	mg/L		1,1	1,0	1,0	0,94	1,0	1,0	0,94	1,0	0,94	1,0	< BG	< BG	< BG	< BG	
cDCE GC 2	mg/L		1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	< BG	< BG	< BG	< BG	
cDCE	mg/L	0,02	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	< BG	< BG	< BG	< BG	
TCE GC 1	mg/L		0,88	0,80	0,83	0,73	0,35	0,0019	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	< BG	< BG	< BG	< BG	
TCE GC 2	mg/L		0,90	0,74	0,85	0,74	0,34	0,0020	0,0015	0,0016	0,0016	0,0016	< BG	< BG	< BG	< BG	
TCE	mg/L	0,0002	0,89	0,77	0,84	0,73	0,35	0,0020	0,0015	0,0016	0,0016	0,0016	< BG	< BG	< BG	< BG	
PCE GC 1	mg/L		0,031	0,028	0,032	0,029	0,029	0,029	0,032	0,026	0,032	0,027	0,027	0,028	0,028	0,028	0,028
PCE GC 2	mg/L		0,032	0,026	0,032	0,028	0,028	0,028	0,031	0,029	0,032	0,029	0,027	0,027	0,028	0,028	0,028
PCE	mg/L	0,0002	0,032	0,027	0,032	0,029	0,028	0,028	0,032	0,027	0,032	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
DOC 1	mg/L		2,4	2,5	2,2	2,1	2,0	1,7	2,2	2,0	2,0	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	
DOC 2	mg/L		2,4	2,6	2,2	2,1	2,0	1,8	2,2	2,0	2,0	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	
DOC	mg/L	0,2	2,4	2,5	2,2	2,1	2,0	1,8	2,2	2,0	2,0	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	
Chlорid	mg/L	2,0	127	155	159	157	160	162	145	166	166	166	< BG	< BG	153	153	
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Nitrat	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Sulfat	mg/L	2,0	145	177	180	176	176	183	183	164	164	196	< BG	< BG	3,3	3,3	

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM12/17 Grundwasser mit Grundwasser aus Sindelfingen und Nährstoffzugabe (GWM12/17-SFns)

zph: nicht bestimmt

Standort 4: GWM17/17 Sterilkontrolle (GWM17/17-St)

Parameter	Einheit	BG	Tag Inkubationszeit											
			0	19	34	54	76	117	166	208	252	305	363	
pH	-													
O ₂	mg/L													
Temperatur	°C													
Ethen GC 1	mg/L													
Ethen GC 2	mg/L													
Ethen	mg/L	0,06												
VC GC 1	mg/L													
VC GC 2	mg/L													
VC	mg/L	0,12												
cDCE GC 1	mg/L													
cDCE GC 2	mg/L													
cDCE	mg/L	0,02												
TCE GC 1	mg/L													
TCE GC 2	mg/L													
TCE	mg/L	0,0002												
PCE GC 1	mg/L													
PCE GC 2	mg/L													
PCE	mg/L	0,0002												
DOC 1	mg/L													
DOC 2	mg/L													
DOC	mg/L	0,2												
Chlорid	mg/L	5,0		79	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	87
Nitrit	mg/L	5,0		< BG	nb	nb	nb	nb	< BG	nb	nb	nb	nb	< BG
Nitrat	mg/L	5,0		< BG	nb	nb	nb	nb	< BG	nb	nb	nb	nb	< BG
Sulfat	mg/L	5,0		624	nb	nb	nb	nb	146	nb	nb	nb	nb	220

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM17/17 Grundwasser ohne Inokulum (GWM17/17-GW)

Parameter	Einheit	BG	Nährstoffzugabe										363
			0	19	34	54	76	117	166	208	252	305	
pH	-		6,8	6,9	7,0	6,1	6,9	7,0	6,9	7,1	7,2	7,3	7,3
O ₂	mg/L		4,4	6,5	5,5	5,6	5,3	5,2	5,6	6,0	8,0	7,6	7,8
Temperatur	°C		23	24	23	22	22	21	21	23	22	23	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L		0,30	0,22	0,23	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L		0,33	0,24	0,32	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	0,32	0,23	0,27	0,18	0,18	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		11	10	11	10	10	10	10	9,8	9,8	9,3	7,8
cDCE GC 2	mg/L		12	< BG	11	10	10	10	9,9	8,9	9,2	6,9	7,0
cDCE	mg/L	0,02	11	10	11	10	10	10	9,8	9,3	9,3	7,3	7,0
TCE GC 1	mg/L		19	18	22	19	20	20	18	17	17	13	11
TCE GC 2	mg/L		24	21	22	19	20	18	18	14	17	10	11
TCE	mg/L	0,0002	22	20	22	19	20	19	18	16	17	11	11
PCE GC 1	mg/L		0,58	0,68	0,70	0,60	0,65	0,49	0,49	0,40	0,42	0,31	0,33
PCE GC 2	mg/L		0,82	0,68	0,70	0,60	0,62	0,43	0,44	0,33	0,41	0,22	0,33
PCE	mg/L	0,0002	0,70	0,68	0,70	0,60	0,64	0,46	0,44	0,36	0,41	0,26	0,33
DOC 1	mg/L		4,5	4,6	4,4	4,2	4,3	4,0	4,3	4,2	4,1	4,0	3,8
DOC 2	mg/L		4,6	4,7	4,4	4,3	4,4	4,0	4,3	4,2	4,2	4,0	3,9
DOC	mg/L	0,2	4,5	4,7	4,4	4,3	4,4	4,0	4,3	4,2	4,1	4,0	3,8
Chlорid	mg/L	2,0	65	81	83	80	78	82	< BG	< BG	82	81	86
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	2,6	2,4	2,2	2,2	2,4	2,4	2,8	2,6	8,8	8,5	10
Sulfat	mg/L	2,0	136	193	195	183	177	190	164	172	173	171	182

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM17/17 Grundwasser mit Flüssigkultur (GWM17/17-FK)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-		6,8	6,9	6,9	6,8	6,9	6,9	6,9	7,0	5,9	6,9	6,9	6,9
O ₂	mg/L		4,7	9,6	5,4	5,2	5,6	4,7	5,5	5,9	7,5	7,7	7,5	7,5
Temperatur	°C		23	24	23	22	22	21	23	nb	21	23	23	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG											
Ethen GC 2	mg/L		< BG											
Ethen	mg/L	0,06	< BG											
VC GC 1	mg/L		0,32	0,22	0,28	0,21	0,28	0,21	0,22	< BG				
VC GC 2	mg/L		0,30	0,21	< BG									
VC	mg/L	0,12												
cDCE GC 1	mg/L		10	8,9	9,3	7,7	7,7	7,2	5,9	5,7	5,6	5,3	4,1	3,0
cDCE GC 2	mg/L		9,6	8,8	9,6	7,3	7,3	7,2	6,2	5,9	5,4	5,2	4,1	3,1
cDCE	mg/L	0,02	10	8,8	9,5	7,5	7,2	6,0	5,8	5,5	5,3	4,1	3,7	3,1
TCE GC 1	mg/L		22	17	19	8,7	4,9	1,8	1,1	1,0	22	1,0	0,43	0,42
TCE GC 2	mg/L		19	17	19	8,2	5,0	1,9	1,2	1,0	22	1,0	0,39	0,42
TCE	mg/L	0,0002	21	17	19	8,4	4,9	1,9	1,2	1,0	22	1,0	0,41	0,42
PCE GC 1	mg/L		0,79	0,54	0,65	0,54	0,57	0,42	0,41	0,38	0,34	0,30	0,36	0,34
PCE GC 2	mg/L		0,63	0,44	0,65	0,46	0,59	0,44	0,43	0,35	0,34	0,35	0,36	0,32
PCE	mg/L	0,0002	0,71	0,49	0,65	0,50	0,58	0,43	0,42	0,37	0,34	0,37	0,30	0,33
DOC 1	mg/L		4,3	4,4	4,1	4,0	5,0	3,8	4,2	3,9	3,9	3,8	3,8	3,8
DOC 2	mg/L		4,3	4,4	4,0	4,0	4,9	3,8	4,1	3,9	3,9	3,7	3,7	3,7
DOC	mg/L	0,2	4,3	4,4	4,0	4,9	3,8	4,1	3,9	nb	3,9	3,8	3,8	3,8
Chlорid	mg/L	64	78	83	88	89	97	101	103	nb	116	122	125	125
Nitrit	mg/L	2,0	< BG											
Nitrat	mg/L	2,0	21	19	20	19	19	18	19	19	24	24	24	24
Sulfat	mg/L	2,0	127	171	173	166	159	170	162	166	164	162	162	164

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM17/17 Grundwasser mit Flüssigkultur und Nährstoffzugabe (GWM17/17-FKns)

Parameter	Einheit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-		6,9	6,9	7,0	6,9	6,9	6,9	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
O ₂	mg/L		4,7	9,2	5,8	5,4	5,6	5,2	5,6	6,0	6,0	7,3	7,6	7,5
Temperatur	°C		23	24	23	22	22	21	21	23	23	22	23	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG											
Ethen GC 2	mg/L		< BG											
Ethen	mg/L	0,06	< BG											
VC GC 1	mg/L		0,29	0,20	0,28	0,20	0,13	< BG						
VC GC 2	mg/L		0,28	0,20	0,28	0,20	0,13	< BG						
VC	mg/L	0,12	0,28	0,20	0,13	< BG								
cDCE GC 1	mg/L		9,8	8,6	9,1	7,8	6,0	5,4	5,4	5,4	5,2	4,8	3,5	3,2
cDCE GC 2	mg/L		9,6	8,7	9,3	8,0	6,1	5,5	5,5	5,4	5,1	4,8	2,2	3,2
cDCE	mg/L	0,02	9,7	8,7	9,2	7,9	6,1	5,4	5,6	5,4	5,2	4,8	3,5	3,2
TCE GC 1	mg/L		21	17	18	12	2,5	1,0	0,93	0,88	0,88	22	9,0	0,47
TCE GC 2	mg/L		20	17	18	12	2,6	1,1	1,0	0,86	0,86	22	8,7	0,43
TCE	mg/L	0,0002	20	17	18	12	2,5	1,1	1,0	0,87	0,87	22	8,8	0,45
PCE GC 1	mg/L		0,72	0,53	0,61	0,55	0,48	0,39	0,40	0,36	0,34	0,37	0,33	0,36
PCE GC 2	mg/L		0,68	0,53	0,61	0,54	0,54	0,40	0,44	0,36	0,34	0,35	0,36	0,36
PCE	mg/L	0,0002	0,70	0,53	0,61	0,54	0,51	0,39	0,42	0,36	0,34	0,36	0,34	0,36
DOC 1	mg/L		4,2	4,3	3,9	3,9	4,0	3,7	4,0	3,8	4,0	3,7	3,7	3,7
DOC 2	mg/L		4,2	4,3	3,9	3,9	4,0	3,7	4,3	3,8	3,8	3,7	3,7	3,6
DOC	mg/L	0,2	4,2	4,3	3,9	4,0	3,7	4,1	3,8	nb	3,8	3,7	3,7	3,7
Chlорid	mg/L	2,0	61	75	82	85	91	97	100	100	105	120	123	
Nitrit	mg/L	2,0	< BG											
Nitrat	mg/L	2,0	23	21	22	21	21	21	21	21	25	26	26	
Sulfat	mg/L	2,0	121	157	167	164	155	169	160	164	150	161	162	

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM17/17 Grundwasser mit Quarzsand (GWM17/17-QS)

Parameter	Einheit	BG	0		19		34		54		76		117		166		208		210		252		305				
			Tag Inkubationszeit	Einheit	0	19	23	24	23	22	21	23	22	23	21	23	nb										
pH	-	mg/L			6,9	7,0	7,0	5,5	6,0	5,2	4,8	5,2	7,0	7,0	7,1	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	7,0		
O ₂	mg/L				4,4	6,7	5,5	5,2	6,0	5,2	4,8	5,2	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,7	
Temperatur	°C				23	24	23	24	23	22	23	22	21	23	21	23	22	23	22	23	22	23	22	23	23	23	
Ethen GC 1	mg/L				< BG																						
Ethen GC 2	mg/L				< BG																						
Ethen	mg/L	0,06			< BG																						
VC GC 1	mg/L				0,29	0,20	0,29	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20
VC GC 2	mg/L				0,30	0,22	0,30	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20
VC	mg/L	0,12			0,30	0,21	< BG																				
cDCE GC 1	mg/L				11	8,8	8,3	7,1	6,9	6,2	6,2	6,9	7,1	7,1	7,1	7,1	6,6	5,7	5,5	5,5	5,5	5,7	5,5	5,7	5,5	5,7	
cDCE GC 2	mg/L				11	9,2	8,4	7,1	6,4	7,1	6,4	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	6,6	5,7	5,5	5,5	5,5	5,7	5,5	5,7	5,5	5,7	
cDCE	mg/L	0,02			11	9,0	8,4	7,1	7,0	6,4	5,7	6,4	5,7	5,7	5,7	5,7	5,4										
TCE GC 1	mg/L				21	11	8,6	6,2	5,1	3,4	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	
TCE GC 2	mg/L				22	12	8,6	6,1	5,3	3,6	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
TCE	mg/L	0,0002			22	12	8,6	6,1	5,2	3,5	2,2	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	27										
PCE GC 1	mg/L				0,70	0,58	0,68	0,67	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	
PCE GC 2	mg/L				0,74	0,66	0,67	0,64	0,64	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	
PCE	mg/L	0,0002			0,72	0,62	0,68	0,65	0,65	0,65	0,65	0,45	0,45	0,42	0,42	0,42	0,40										
DOC 1	mg/L				4,8	4,8	4,3	4,2	4,3	4,0	4,3	4,0	4,3	4,0	4,3	4,0	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	
DOC 2	mg/L				4,7	4,7	4,7	4,4	4,4	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	
DOC	mg/L	0,2			4,7	4,8	4,3	4,2	4,2	4,0	4,2	4,0	4,2	4,0	4,2	4,0	4,2										
Chlорid	mg/L				68	93	98	104	96	103	103	103	103	103	103	103	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	
Nitrit	mg/L				< BG																						
Nitrat	mg/L				6,4	5,9	5,9	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	
Sulfat	mg/L				150	199	195	202	182	197	176	173	173	173	173	173	173	168	168	168	168	168	168	168	168	168	

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM17/17 Grundwasser mit Quarzsand und Nährstoffzugabe (GWM17/17-QSns)

Parameter	Einheit	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-	6,9	7,0	7,0	6,9	7,0	7,0	7,0	7,0	6,7	6,9	7,0	7,0
O ₂	mg/L	5,2	9,4	5,8	5,9	5,9	5,2	5,8	5,8	6,7	7,0	7,7	7,7
Temperatur	°C	23	24	23	22	23	22	21	21	22	22	23	23
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG										
VC GC 1	mg/L	0,26	0,17	< BG									
VC GC 2	mg/L	0,32	0,17	< BG									
VC	mg/L	0,17	0,29	< BG									
cDCE GC 1	mg/L	9,7	8,1	8,4	7,6	7,2	5,9	5,7	5,4	5,0	4,2	2,8	2,3
cDCE GC 2	mg/L	11	2,4	8,9	7,5	7,2	6,4	5,7	5,4	5,4	1,9	1,9	2,3
cDCE	mg/L	0,02	10	8,1	8,6	7,5	7,2	6,2	5,7	5,4	4,2	2,4	2,3
TCE GC 1	mg/L	19	10	8,3	6,1	3,1	1,1	0,78	21	6,0	0,34	0,31	0,31
TCE GC 2	mg/L	24	2,3	11	7,8	6,3	3,3	1,1	0,75	21	1,8	0,22	0,31
TCE	mg/L	0,0002	21	10	11	8,1	6,2	3,2	1,1	0,77	21	6,0	0,34
PCE GC 1	mg/L	0,62	0,44	0,64	0,62	0,54	0,40	0,42	0,38	0,32	0,38	0,34	0,37
PCE GC 2	mg/L	0,84	0,07	0,69	0,54	0,56	0,41	0,35	0,35	0,31	0,13	0,14	0,36
PCE	mg/L	0,0002	0,73	0,44	0,67	0,58	0,55	0,41	0,42	0,36	0,32	0,34	0,36
DOC 1	mg/L	4,6	4,7	4,2	4,1	4,2	3,9	4,2	4,0	4,1	3,9	3,8	3,8
DOC 2	mg/L	4,6	4,7	4,3	4,2	4,3	3,9	4,2	4,1	4,1	3,9	3,9	3,7
DOC	mg/L	0,2	4,6	4,7	4,3	4,1	3,9	4,2	4,1	4,1	3,9	3,8	3,8
Chlорid	mg/L	65	87	91	98	89	96	100	102	nb	109	122	125
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	nb	< BG	< BG	< BG						
Nitrat	mg/L	2,0	7,9	7,4	7,7	7,2	6,6	7,6	7,9	8,6	12	13	14
Sulfat	mg/L	2,0	145	187	183	191	170	185	170	176	160	171	173

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM17/17 Grundwasser mit Grundwasser aus Sindelfingen (GWM17/17-SF)

Parameter	Einheit	BG	Tag Inkubationszeit						Nährstoffabgabe	210	252	305
			0	19	34	54	76	117				
pH	-		7,0	7,1	7,2	7,3	7,3	7,1	< BG	< BG	7,2	7,3
O ₂	mg/L	6,2	7,2	6,6	7,1	6,4	6,0	7,6	< BG	< BG	8,3	8,4
Temperatur	°C	23	24	23	22	23	22	23	< BG	< BG	22	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	0,16	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	0,16	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,16	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 1	mg/L	5,7	4,8	4,9	4,7	4,7	4,2	3,9	3,4	3,5	3,3	2,0
cDCE GC 2	mg/L	5,4	4,8	5,1	4,5	4,8	4,3	3,7	3,4	3,5	3,1	< BG
cDCE	mg/L	5,6	4,8	5,0	4,6	4,8	4,2	3,8	3,4	3,6	3,4	< BG
TCE GC 1	mg/L	13	10	10	10	10	6,6	1,5	0,57	0,43	12	2,5
TCE GC 2	mg/L	11	10	10	10	9,0	6,8	1,5	0,51	0,42	14	2,9
TCE	mg/L	12	10	10	10	9,3	6,7	1,5	0,54	0,43	13	2,7
PCE GC 1	mg/L	0,38	0,29	0,30	0,31	0,28	0,29	0,21	0,19	0,15	0,17	0,15
PCE GC 2	mg/L	0,30	0,29	0,31	0,31	0,28	0,29	0,21	0,18	0,15	0,17	0,15
PCE	mg/L	0,0002	0,34	0,29	0,31	0,29	0,29	0,21	0,19	0,15	0,16	0,18
DOC 1	mg/L	2,9	2,9	2,6	2,6	2,7	2,3	2,9	2,5	2,4	2,2	2,2
DOC 2	mg/L	2,9	2,9	2,7	2,6	2,7	2,3	2,9	2,5	2,5	2,2	2,2
DOC	mg/L	0,2	2,9	2,9	2,7	2,6	2,7	2,3	2,9	2,5	2,4	2,2
Chlорid	mg/L	2,0	131	172	178	171	172	181	162	167	194	183
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	2,3	2,2	2,4	2,1	1,7	2,4	< BG	< BG	7,2	6,6
Sulfat	mg/L	2,0	181	238	240	231	227	240	216	220	245	245

nb: nicht bestimmt

Standort 4: GWM17/17 Grundwasser mit Grundwasser aus Sindelfingen und Nährstoffzugabe (GWM17/17-SFns)

Parameter	Einheit	Tag Inkubationszeit	BG	0	19	34	54	76	117	166	208	210	252	305	363
pH	-			7,0	7,1	7,1	7,1	7,2	7,1	7,1	7,2	7,3	7,1	7,0	7,1
O ₂	mg/L			6,2	7,3	6,1	6,7	6,1	5,1	5,5	7,2	7,3	7,1	8,1	8,1
Temperatur	°C			23	24	23	23	23	23	22	23	23	22	23	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG												
Ethen GC 2	mg/L		< BG												
Ethen	mg/L	0,06	< BG												
VC GC 1	mg/L		0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
VC GC 2	mg/L		0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
VC	mg/L	0,17	< BG												
cDCE GC 1	mg/L		4,8	4,4	4,7	4,6	4,6	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,3	3,9	3,9
cDCE GC 2	mg/L		4,9	4,5	4,7	4,3	4,3	4,4	4,0	3,7	3,8	4,0	3,7	3,7	2,4
cDCE	mg/L	0,02	4,8	4,4	4,7	4,4	4,4	4,0	4,0	3,9	3,9	3,9	3,7	2,7	2,4
TCE GC 1	mg/L		10	9,0	10	10	10	5,8	5,8	0,60	0,58	0,47	12	4,7	0,26
TCE GC 2	mg/L		10	9,3	10	8,9	10	5,8	0,79	0,40	0,43	0,43	13	4,7	0,30
TCE	mg/L	0,0002	10	9,1	10	9,3	10	5,8	0,70	0,49	0,45	0,45	13	4,7	0,26
PCE GC 1	mg/L		0,32	0,28	0,31	0,32	0,32	0,29	0,22	0,27	0,23	0,22	0,22	0,24	0,21
PCE GC 2	mg/L		0,31	0,29	0,30	0,29	0,30	0,30	0,18	0,21	0,23	0,23	0,23	0,23	0,21
PCE	mg/L	0,0002	0,32	0,28	0,32	0,30	0,30	0,30	0,22	0,27	0,22	0,22	0,23	0,21	0,21
DOC 1	mg/L		2,7	2,8	2,5	2,5	2,5	2,3	2,9	2,5	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2
DOC 2	mg/L		2,7	3,4	2,5	2,5	2,4	2,3	2,6	2,4	2,4	2,4	2,4	2,2	2,1
DOC	mg/L	0,2	2,7	3,1	2,5	2,5	2,5	2,3	2,7	2,5	2,5	2,4	2,4	2,2	2,2
Chlорid	mg/L		2,0	1,17	1,70	1,75	1,68	< BG	171	182	176	178	189	186	190
Nitrit	mg/L		2,0	< BG											
Nitrat	mg/L		2,0	3,9	3,7	3,7	3,4	3,0	3,7	5,2	5,6	5,6	9,3	6,2	8,3
Sulfat	mg/L		2,0	163	234	235	229	223	237	233	236	236	242	232	233

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2981 Sterilkontrolle (GWM2981-St)

Tag/ Inkubationszeit		GWM2981-St																									
Parameter	Einheit	BG		0		28		49		70		92		105		119		132		146		161		170		180	
pH	-	5,7	5,4	5,3	5,4	5,1	4,1	5,9	5,9	5,2	5,3	7,9	7,9	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,1	5,1	5,1				
O ₂	mg/L	4,1	3,7	2,2	2,1	2,2	2,1	2,2	2,1	2,2	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2				
Temperatur	°C																										
Ethen																											
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG					
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG					
VC																											
VC GC 1	mg/L	0,16	0,13	0,14	0,14	0,16	0,13	0,16	0,16	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16				
VC GC 2	mg/L	0,16	0,13	0,14	0,14	0,16	0,13	0,16	0,16	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16				
cDCE																											
cDCE GC 1	mg/L	0,35	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35				
cDCE GC 2	mg/L	0,35	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35				
TCE																											
TCE GC 1	mg/L	29	25	23	25	25	23	27	27	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25				
TCE GC 2	mg/L	30	27	31	27	27	31	27	27	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25				
PCE																											
PCE GC 1	mg/L	0,95	0,75	0,39	0,61	0,61	0,61	0,84	0,84	0,71	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78				
PCE GC 2	mg/L	0,99	0,79	0,98	0,98	0,98	0,98	0,57	0,82	0,82	0,73	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83				
DOC																											
DOC GC 1	mg/L	0,97	0,77	0,98	0,98	0,97	0,97	0,98	0,98	0,59	0,83	0,83	0,83	0,72	0,81	0,79	0,79	0,69	0,77	0,77	0,48	0,63	0,63				
DOC GC 2	mg/L	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5				
Chlорid	mg/L	156	156	145	145	145	145	145	145	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153				
Nitrit	mg/L	5,0	5,0	< BG																							
Nitrat	mg/L	5,0	5,0	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0				
Sulfat	mg/L	5,0	5,0	521	521	468	468	468	468	451	451	451	451	451	451	451	451	451	451	451	451	451	451				
PCR (OTU1)		nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb					

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2981 Grundwasser ohne Inokulum (GWM2981-GW)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	70	92	105	119
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,4	6,4
O2	mg/L		4,9	3,4	5,3	5,7	7,2	7,5	7,4
Temperatur	°C		22	21	22	22	21	22	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		0,15	< BG					
VC GC 2	mg/L		0,14	< BG					
VC	mg/L	0,12	0,15	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		0,35	0,26	0,32	0,24	0,29	0,27	0,11
cDCE GC 2	mg/L		0,34	0,27	0,32	0,24	0,29	0,26	0,11
cDCE	mg/L	0,02	0,34	0,27	0,32	0,24	0,29	0,27	0,11
TCE GC 1	mg/L		30	24	25	26	14	5,8	0,025
TCE GC 2	mg/L		28	28	29	25	15	5,6	0,026
TCE	mg/L	0,0002	29	26	27	25	14	5,7	0,026
PCE GC 1	mg/L		0,97	0,51	0,43	0,57	0,77	0,78	0,80
PCE GC 2	mg/L		0,89	0,64	0,88	0,51	0,81	0,73	0,82
PCE	mg/L	0,0002	0,93	0,57	0,88	0,54	0,79	0,76	0,81
DOC 1	mg/L		9,3						
DOC 2	mg/L		9,3						
DOC	mg/L	0,2	9,3	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	118	124	120	121	130	136	139
Nitrit	mg/L	2,0	< BG						
Nitrat	mg/L	2,0	< BG						
Sulfat	mg/L	2,0	57	61	58	58	62	63	63
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	1,3E+03

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			132	133	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe					
pH	-		6,5	nb	6,5	6,5	6,4	6,3
O2	mg/L		7,8	nb	7,7	7,8	7,3	7,4
Temperatur	°C		22	nb	23	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG					
Ethen GC 2	mg/L		< BG					
Ethen	mg/L	0,06	< BG					
VC GC 1	mg/L		< BG					
VC GC 2	mg/L		< BG					
VC	mg/L	0,12	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		0,11	0,10	0,10	0,10	0,092	0,055
cDCE GC 2	mg/L		0,11		0,10		0,10	0,052
cDCE	mg/L	0,02	0,11	0,10	0,10	0,10	0,093	0,054
TCE GC 1	mg/L		0,021	28	29	26	11	0,018
TCE GC 2	mg/L		0,022		31		13	0,017
TCE	mg/L	0,0002	0,021	28	30	26	12	0,018
PCE GC 1	mg/L		0,77	0,74	0,71	0,75	0,41	0,72
PCE GC 2	mg/L		0,77		0,77		0,47	0,57
PCE	mg/L	0,0002	0,77	0,74	0,74	0,75	0,44	0,65
DOC 1	mg/L					8,5	8,2	8,1
DOC 2	mg/L					8,4	8,2	8,0
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	8,4	8,2	8,0
Chlorid	mg/L	2,0	137	nb	130	133	166	171
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG
Sulfat	mg/L	2,0	62	nb	59	61	69	68
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb	nb	nb	nb	nb	7,2E+03

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2981 Grundwasser ohne Inokulum mit Nährstoffen (GWM2981-NS)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	70	92	105	119
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,4
O2	mg/L		4,0	3,7	5,4	5,8	7,3	7,2	7,7
Temperatur	°C		23	21	22	22	21	22	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		0,16	< BG					
VC GC 2	mg/L		0,16	< BG					
VC	mg/L	0,12	0,16	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		0,37	0,32	0,33	0,24	0,30	0,29	0,19
cDCE GC 2	mg/L		0,36	0,33	0,32		0,30	0,29	0,19
cDCE	mg/L	0,02	0,36	0,33	0,32	0,24	0,30	0,29	0,19
TCE GC 1	mg/L		32	26	29	23	19	11	1,0
TCE GC 2	mg/L		31	25	28	27	19	11	1,0
TCE	mg/L	0,0002	31	26	29	25	19	11	1,0
PCE GC 1	mg/L		1,0	0,81	0,90	0,48	0,80	0,79	0,79
PCE GC 2	mg/L		1,0	0,77	0,90	0,67	0,85	0,82	0,82
PCE	mg/L	0,0002	1,0	0,79	0,90	0,57	0,82	0,80	0,81
DOC 1	mg/L		10,5						
DOC 2	mg/L		8,7						
DOC	mg/L	0,2	9,6	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	130	132	127	128	134	142	148
Nitrit	mg/L	2,0	< BG						
Nitrat	mg/L	2,0	< BG	< BG	3,0	3,1	3,3	3,1	3,4
Sulfat	mg/L	2,0	63	65	62	63	66	68	68
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	3,1E+04

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			132	133	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe					
pH	-		6,5	nb	6,6	6,5	6,3	6,4
O2	mg/L		7,7	nb	7,6	7,6	7,5	7,7
Temperatur	°C		22	nb	23	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG					
Ethen GC 2	mg/L		< BG					
Ethen	mg/L	0,06	< BG					
VC GC 1	mg/L		< BG					
VC GC 2	mg/L		< BG					
VC	mg/L	0,12	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		0,11	0,12	0,11	0,12	0,10	0,054
cDCE GC 2	mg/L		0,12		0,11		0,10	0,056
cDCE	mg/L	0,02	0,12	0,12	0,11	0,12	0,10	0,055
TCE GC 1	mg/L		0,023	28	27	24	4,1	0,015
TCE GC 2	mg/L		0,027		25		4,3	0,014
TCE	mg/L	0,0002	0,025	28	26	24	4,2	0,015
PCE GC 1	mg/L		0,70	0,76	0,72	0,68	0,51	0,63
PCE GC 2	mg/L		0,77		0,65		0,53	0,58
PCE	mg/L	0,0002	0,73	0,76	0,68	0,68	0,52	0,61
DOC 1	mg/L					8,8	8,4	8,4
DOC 2	mg/L					8,8	8,3	8,3
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	8,8	8,3	8,3
Chlorid	mg/L	2,0	148	nb	144	148	175	174
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	3,8	nb	4,4	4,2	< BG	3,4
Sulfat	mg/L	2,0	69	nb	68	69	73	71
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb	nb	nb	nb	nb	8,3E+03

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2981 Grundwasser mit Flüssigkultur (GWM2981-FK)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	56	70	92	105
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe						
pH	-		6,5	6,3	6,3	nb	6,2	6,3	6,2
O2	mg/L		5,1	3,6	4,9	nb	5,7	6,9	7,2
Temperatur	°C		22	21	22	nb	22	21	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		0,13	< BG					
VC GC 2	mg/L		0,13	< BG					
VC	mg/L	0,12	0,13	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		0,31	0,26	0,11	0,041	0,039	0,039	0,026
cDCE GC 2	mg/L		0,38	0,18	0,40	0,011	0,041	0,037	0,024
cDCE	mg/L	0,02	0,35	0,22	0,40	0,041	0,040	0,038	0,025
TCE GC 1	mg/L		25	13	1,3	28	26	14	3,2
TCE GC 2	mg/L		25	12	1,3	29	31	13	3,1
TCE	mg/L	0,0002	25	12	1,3	28	28	14	3,1
PCE GC 1	mg/L		0,85	0,78	0,37	0,48	0,39	0,74	0,55
PCE GC 2	mg/L		0,83	0,47	0,40	0,51	0,54	0,69	0,52
PCE	mg/L	0,0002	0,84	0,78	0,39	0,50	0,47	0,72	0,54
DOC 1	mg/L		9,5						
DOC 2	mg/L		9,2						
DOC	mg/L	0,2	9,4	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L		2,0	127	134	138	nb	137	149
Nitrit	mg/L		2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG
Nitrat	mg/L		2,0	15	16	17	nb	22	18
Sulfat	mg/L		2,0	63	65	62	nb	63	66
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			119	132	133	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe						
pH	-		6,2	6,2	nb	6,3	6,3	6,0	6,0
O2	mg/L		7,7	7,7	nb	7,7	7,7	7,3	7,9
Temperatur	°C		22	22	nb	23	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		< BG						
cDCE GC 2	mg/L		< BG						
cDCE	mg/L	0,02	< BG						
TCE GC 1	mg/L		0,0045	0,0042	28	27	31	0,012	0,0093
TCE GC 2	mg/L		0,0038	0,0043		31		0,012	0,014
TCE	mg/L	0,0002	0,0042	0,0042	28	29	31	0,012	0,014
PCE GC 1	mg/L		0,50	0,48	0,45	0,56	0,47	0,42	0,48
PCE GC 2	mg/L		0,39	0,47		0,64		0,45	0,50
PCE	mg/L	0,0002	0,44	0,47	0,45	0,60	0,47	0,43	0,49
DOC 1	mg/L						9,2	8,4	8,6
DOC 2	mg/L						9,2	8,4	8,6
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	9,2	8,4	8,6
Chlorid	mg/L		2,0	161	160	nb	155	158	191
Nitrit	mg/L		2,0	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L		2,0	19	19	nb	19	19	20
Sulfat	mg/L		2,0	68	69	nb	68	69	67
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb		nb	nb	nb	4,2E+03

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2981 Grundwasser mit Quarzsandkultur (GWM2981-QS)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	56	70	92	105
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe						
pH	-		6,5	6,3	6,3	nb	6,3	6,4	6,4
O2	mg/L		5,1	4,9	5,0	nb	5,9	7,8	7,2
Temperatur	°C		22	21	22	nb	22	21	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		0,14	< BG					
VC GC 2	mg/L		0,14	< BG					
VC	mg/L	0,12	0,14	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		0,34	0,036	0,019	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 2	mg/L		0,33	0,032	< BG				
cDCE	mg/L	0,02	0,33	0,034	0,019	< BG	< BG	< BG	< BG
TCE GC 1	mg/L		29	0,27	0,015	30	33	29	22
TCE GC 2	mg/L		27	0,19	0,0095	32	28	30	24
TCE	mg/L	0,0002	28	0,23	0,015	31	31	29	23
PCE GC 1	mg/L		0,95	0,64	0,56	0,85	0,67	0,76	0,58
PCE GC 2	mg/L		0,83	0,42	0,30	0,90	0,55	0,81	0,59
PCE	mg/L	0,0002	0,89	0,64	0,56	0,88	0,61	0,79	0,58
DOC 1	mg/L		9,8						
DOC 2	mg/L		9,7						
DOC	mg/L	0,2	9,7	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	130	149	144	nb	146	149	150
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	6,5	6,4	7,5	nb	8,3	10	10
Sulfat	mg/L	2,0	64	64	62	nb	64	67	69
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			119	132	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG						
pH	-		6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
O2	mg/L		7,7	7,6	7,5	7,6	7,6	7,5
Temperatur	°C		22	22	22	23	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG					
Ethen GC 2	mg/L		< BG					
Ethen	mg/L	0,06	< BG					
VC GC 1	mg/L		< BG					
VC GC 2	mg/L		< BG					
VC	mg/L	0,12	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		< BG					
cDCE GC 2	mg/L		< BG					
cDCE	mg/L	0,02	< BG					
TCE GC 1	mg/L		18	2,2	0,037	0,059	0,0019	0,0027
TCE GC 2	mg/L		19	2,2	0,037		0,0024	0,0026
TCE	mg/L	0,0002	18	2,2	0,037	0,059	0,0021	0,0026
PCE GC 1	mg/L		0,74	0,74	0,73	0,76	0,44	0,64
PCE GC 2	mg/L		0,80	0,74	0,69		0,55	0,58
PCE	mg/L	0,0002	0,77	0,74	0,71	0,76	0,49	0,61
DOC 1	mg/L					10	9,1	9,3
DOC 2	mg/L					9,7	9,1	9,2
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	9,8	9,1	9,2
Chlorid	mg/L	2,0	156	165	162	164	176	172
Nitrit	mg/L	2,0	< BG					
Nitrat	mg/L	2,0	10	11	12	11	8,4	8,8
Sulfat	mg/L	2,0	68	68	67	71	71	70
PCR (OTU1)	Kopien/mL		5,0E+01	nb	nb	nb	nb	<BG

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2983 Sterilkontrolle (GWM2983-St)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	56	70	84	92
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe						
pH	-		6,4	5,7	5,3	nb	5,2	5,1	5,2
O2	mg/L		4,6	3,8	4,8	nb	6,2	7,9	8,0
Temperatur	°C		23	21	21	nb	22	21	21
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		0,066	0,065	0,063	0,071	0,063	0,079	0,065
cDCE GC 2	mg/L		0,067	0,066	0,061	0,066	0,068	0,082	0,066
cDCE	mg/L	0,02	0,066	0,065	0,062	0,069	0,065	0,080	0,066
TCE GC 1	mg/L		0,038	0,033	0,027	1,0	1,0	0,75	0,96
TCE GC 2	mg/L		0,029	0,033	0,024	0,96	1,1	0,81	0,95
TCE	mg/L	0,0002	0,033	0,033	0,025	0,98	1,0	0,78	0,96
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		0,0043	< BG					
PCE	mg/L	0,0002	0,0043	< BG					
DOC 1	mg/L		2,8						
DOC 2	mg/L		2,8						
DOC	mg/L	0,2	2,8	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	5,0	117	nb	104	n.b.	nb	105	108
Nitrit	mg/L	5,0	<BG	nb	<BG	n.b.	nb	<BG	<BG
Nitrat	mg/L	5,0	<BG	nb	<BG	n.b.	nb	<BG	<BG
Sulfat	mg/L	5,0	190	nb	290	n.b.	nb	297	288
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb						

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			105	119	132	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		5,1	5,2	5,3	5,2	5,2	5,1	5,2
O2	mg/L		7,8	7,8	7,8	7,6	7,7	7,8	7,9
Temperatur	°C		22	22	22	22	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		0,066	0,066	0,065	0,063	0,066	0,064	0,078
cDCE GC 2	mg/L		0,059	0,063	0,065	0,062		0,067	0,075
cDCE	mg/L	0,02	0,062	0,064	0,065	0,063	0,066	0,065	0,076
TCE GC 1	mg/L		0,94	1,01	0,94	0,88	0,97	0,86	0,85
TCE GC 2	mg/L		0,77	0,88	0,95	0,84		0,93	0,80
TCE	mg/L	0,0002	0,85	0,94	0,95	0,86	0,97	0,89	0,83
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L						2,9		2,6
DOC 2	mg/L						3,0		2,7
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	3,0	nb	2,6
Chlorid	mg/L	5,0	109	110	112	113	113	109	110
Nitrit	mg/L	5,0	<BG						
Nitrat	mg/L	5,0	<BG						
Sulfat	mg/L	5,0	247	228	231	252	257	195	237
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb						

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2983 Grundwasser ohne Inokulum (GWM2983-GW)

Parameter	Einheit	BG	0	28	49	56	70	84	92
			TCE-Zugabe				Nährstoffzugabe		
pH	-		6,8	6,5	6,6	nb	6,7	6,7	6,7
O2	mg/L		5,1	3,8	5,6	nb	6,4	7,8	7,9
Temperatur	°C		23	20	21	nb	22	21	21
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG				
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG				
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG				
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG				
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG				
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG				
cDCE GC 1	mg/L		0,066	0,061	0,058	0,048	0,055	0,068	0,058
cDCE GC 2	mg/L		0,070	0,052	0,061	0,047	0,056	0,060	0,055
cDCE	mg/L	0,02	0,068	0,057	0,059	0,048	0,055	0,064	0,057
TCE GC 1	mg/L		0,036	0,033	0,026	0,86	0,78	0,78	0,94
TCE GC 2	mg/L		0,035	0,027	0,031	0,84	0,88	0,59	0,84
TCE	mg/L	0,0002	0,036	0,030	0,028	0,85	0,83	0,69	0,89
PCE GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG				
PCE GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG				
PCE	mg/L	0,0002	< BG	< BG	< BG				
DOC 1	mg/L		4,6						
DOC 2	mg/L		4,5						
DOC	mg/L	0,2	4,6	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	97	106	104	nb	105	107	109
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG
Sulfat	mg/L	2,0	98	52	52	nb	52	54	56
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	< BG

nb: nicht bestimmt

Parameter	Einheit	BG	105	119	132	146	161	210	280
			Nährstoffzugabe						
pH	-		6,7	6,8	6,8	6,7	6,8	6,7	6,7
O2	mg/L		7,7	7,8	7,9	7,9	7,8	8,0	8,2
Temperatur	°C		22	21	22	22	22	22	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 1	mg/L		0,053	0,053	0,055	0,055	0,053	0,055	0,062
cDCE GC 2	mg/L		0,056	0,055	0,055	0,059		0,054	0,062
cDCE	mg/L	0,02	0,054	0,054	0,055	0,057	0,053	0,055	0,062
TCE GC 1	mg/L		0,62	0,80	0,84	0,82	0,82	0,80	0,88
TCE GC 2	mg/L		0,84	0,87	0,80	0,92		0,78	0,83
TCE	mg/L	0,0002	0,73	0,84	0,82	0,87	0,82	0,79	0,86
PCE GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PCE GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PCE	mg/L	0,0002	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
DOC 1	mg/L						4,4	4,4	4,5
DOC 2	mg/L						4,5	4,4	4,4
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	4,4	4,4	4,4
Chlorid	mg/L	2,0	110	113	113	115	114	110	110
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	3,2
Sulfat	mg/L	2,0	56	58	58	57	59	59	58
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb	nb	nb	nb	nb	nb	< BG

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2983 Grundwasser mit Flüssigkultur (GWM2983-FK)

Parameter	Einheit	BG	0	28	49	56	70	84	92
			TCE-Zugabe						
pH	-		6,8	6,6	6,7	nb	6,7	6,8	6,8
O2	mg/L		5,7	4,0	5,6	nb	6,5	8,0	8,1
Temperatur	°C		22	21	22	nb	22	21	21
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		0,050	0,048	0,049	0,048	0,046	0,048	0,045
cDCE GC 2	mg/L		0,048	0,046	0,045	0,047	0,047	0,057	0,045
cDCE	mg/L	0,02	0,049	0,047	0,047	0,048	0,046	0,052	0,045
TCE GC 1	mg/L		0,021	0,015	0,018	0,923	1,0	0,63	0,95
TCE GC 2	mg/L		0,019	0,017	0,015	0,959	1,1	0,76	0,93
TCE	mg/L	0,0002	0,020	0,016	0,016	0,941	1,0	0,69	0,94
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L		4,4						
DOC 2	mg/L		4,4						
DOC	mg/L	0,2	4,4	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	103	103	107	nb	109	112	113
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	15	15	17	nb	17	18	19
Sulfat	mg/L	2,0	47	47	49	nb	50	51	53
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Parameter	Einheit	BG	105	119	132	133	146	161	210	280
			TCE-Zugabe							
pH	-		6,8	6,8	6,9	nb	6,9	6,8	6,9	6,9
O2	mg/L		7,8	8,1	8,0	nb	8,0	7,9	7,8	8,2
Temperatur	°C		22	22	22	nb	22	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG							
Ethen GC 2	mg/L		< BG							
Ethen	mg/L	0,06	< BG							
VC GC 1	mg/L		< BG							
VC GC 2	mg/L		< BG							
VC	mg/L	0,12	< BG							
cDCE GC 1	mg/L		0,023	< BG						
cDCE GC 2	mg/L		0,024	< BG						
cDCE	mg/L	0,02	0,024	< BG						
TCE GC 1	mg/L		0,15	0,0011	0,0017	4,1	3,9	4,8	0,00087	0,00090
TCE GC 2	mg/L		0,19	0,0010	0,0016		3,8		0,00094	0,00080
TCE	mg/L	0,0002	0,17	0,0010	0,0016	4,1	3,8	4,8	0,00091	0,00085
PCE GC 1	mg/L		< BG							
PCE GC 2	mg/L		< BG							
PCE	mg/L	0,0002	< BG							
DOC 1	mg/L							4,4	4,0	4,1
DOC 2	mg/L							4,3	4,0	4,1
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	nb	4,3	4,0	4,1
Chlorid	mg/L	2,0	116	117	119	nb	122	120	120	121
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	19	19	19	nb	19	19	20	20
Sulfat	mg/L	2,0	55	54	54	nb	55	55	56	56
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb	< BG	nb	nb	nb	nb	nb	1,1E+02

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2983 Grundwasser mit Quarzsandkultur (GWM2983-QS)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	56	70	84	92	105
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe							
pH	-		6,8	6,8	6,8	nb	6,8	6,9	6,9	6,9
O2	mg/L		5,5	4,1	5,5	nb	6,5	7,9	8,2	7,9
Temperatur	°C		22	21	22	nb	22	21	21	23
Ethen GC 1	mg/L		< BG							
Ethen GC 2	mg/L		< BG							
Ethen	mg/L	0,06	< BG							
VC GC 1	mg/L		< BG							
VC GC 2	mg/L		< BG							
VC	mg/L	0,12	< BG							
cDCE GC 1	mg/L		0,054	0,035	0,037	0,037	0,032	0,045	0,031	< BG
cDCE GC 2	mg/L		0,054	0,037	0,037	0,039	0,034	0,043	0,033	< BG
cDCE	mg/L	0,02	0,054	0,036	0,037	0,038	0,033	0,044	0,032	< BG
TCE GC 1	mg/L		0,020	0,0075	0,010	1,0	0,85	0,89	0,62	0,044
TCE GC 2	mg/L		0,020	0,011	0,0094	0,95	1,0	0,83	0,81	0,042
TCE	mg/L	0,0002	0,020	0,0092	0,010	1,0	0,93	0,86	0,72	0,043
PCE GC 1	mg/L		< BG							
PCE GC 2	mg/L		< BG							
PCE	mg/L	0,0002	< BG							
DOC 1	mg/L		6,0							
DOC 2	mg/L		5,9							
DOC	mg/L	0,2	5,9	nb						
Chlorid	mg/L	2,0	103	103	107	nb	108	112	113	114
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	6,3	6,2	5,3	nb	5,8	5,9	6,4	5,5
Sulfat	mg/L	2,0	51	51	50	nb	52	55	55	55
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb						

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			119	132	133	146	161	210	280	
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe							
pH	-		6,9	7,0	nb	7,1	7,0	7,0	7,0	
O2	mg/L		8,0	8,0	nb	8,1	8,0	7,9	8,2	
Temperatur	°C		22	22	nb	22	23	23	22	
Ethen GC 1	mg/L		< BG							
Ethen GC 2	mg/L		< BG							
Ethen	mg/L	0,06	< BG							
VC GC 1	mg/L		< BG							
VC GC 2	mg/L		< BG							
VC	mg/L	0,12	< BG							
cDCE GC 1	mg/L		< BG							
cDCE GC 2	mg/L		< BG							
cDCE	mg/L	0,02	< BG							
TCE GC 1	mg/L		< BG	< BG	5,5	5,2	1,6	< BG	< BG	
TCE GC 2	mg/L		< BG	< BG		4,9		< BG	< BG	
TCE	mg/L	0,0002	< BG	< BG	5,5	5,0	1,6	< BG	< BG	
PCE GC 1	mg/L		< BG							
PCE GC 2	mg/L		< BG							
PCE	mg/L	0,0002	< BG							
DOC 1	mg/L						4,5	4,2	4,3	
DOC 2	mg/L						4,4	4,2	4,3	
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	4,4	4,2	4,3	
Chlorid	mg/L	2,0	116	121	nb	123	126	119	119	
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG	
Nitrat	mg/L	2,0	6,4	6,3	nb	6,7	6,8	6,6	6,7	
Sulfat	mg/L	2,0	56	57	nb	56	57	56	57	
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	< BG	

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2984 Sterilikontrolle (GWM2984-St)

Parameter	Einheit	Tag Inkubationszeit	BG	0	28	49	70	84	92	105	119	132	146	161	170	280
pH	-			6,1	5,6	5,4	5,3	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
O2	mg/L			4,3	4,1	4,9	6,3	7,7	7,7	8,0	7,8	7,5	7,8	7,7	7,7	7,8
Temperatur	°C			23	21	22	22	21	22	22	22	22	22	23	23	22
Ethanol GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG*	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethanol GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG*	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06														< BG
VC GC 1	mg/L		0,62	0,60	0,61	0,58*	0,61	0,58*	0,56	0,54	0,50	0,52	0,50	0,49	0,49	0,49
VC GC 2	mg/L		0,64	0,62	0,64	0,59	0,59	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,47	0,47	0,47
VC	mg/L	0,12														< BG
cDCE GC 1	mg/L		3,6	3,6	3,6	3,5	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4
cDCE GC 2	mg/L		3,6	3,8	3,7	3,7	3,8	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
cDCE	mg/L	0,02														< BG
TCE GC 1	mg/L		3,6	3,7	3,7*	3,6	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,5	3,5
TCE GC 2	mg/L		39	39	39	35	35	35	33	33	36	36	36	34	34	34
TCE	mg/L	0,0002														< BG
PCE GC 1	mg/L		40	39	39*	38*	39	37	33	38	35	36	36	35	35	35
PCE GC 2	mg/L		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
PCE	mg/L	0,0002														< BG
DOC 1	mg/L		6,0	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
DOC 2	mg/L		0,2													
DOC	mg/L	0,2														< BG
Chlorid	mg/L	5,0	35	nb	38	nb	38	39	40	41	43	46	44	35	37	
Nitrit	mg/L	5,0	< BG	nb	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Nitrat	mg/L	5,0	< BG	nb	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	
Sulfat	mg/L	5,0	200	nb	312	nb	281	266	216	226	226	226	226	252	252	240
PCR (OTU1) Kopien/mL		nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

*: kein Vial. Werte gemittelt

Standort 5: GWM2984 Grundwasser ohne Inokulum (GWM2984-GW)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	70	84	92	105
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		6,5	6,3	6,3	6,2	6,4	6,4	6,4
O2	mg/L		4,9	4,3	5,3	6,8	7,9	7,9	7,2
Temperatur	°C		23	21	22	22	22	21	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		3,7	3,4	3,4	3,5	3,6	3,2	3,1
cDCE GC 2	mg/L		3,5	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	3,4
cDCE	mg/L	0,02	3,6	3,4	3,4	3,4	3,4	3,2	3,2
TCE GC 1	mg/L		42	34	31	37	30	27	25
TCE GC 2	mg/L		40	38	34	34	31	33	26
TCE	mg/L	0,0002	41	36	33	36	31	30	26
PCE GC 1	mg/L		1,3	0,90	0,74	1,0	0,93	0,80	1,0
PCE GC 2	mg/L		1,2	1,1	0,92	0,90	1,0	1,1	1,0
PCE	mg/L	0,0002	1,3	1,0	0,83	1,0	1,0	0,92	1,0
DOC 1	mg/L		11						
DOC 2	mg/L		11						
DOC	mg/L	0,2	11	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	31	38	38	38	41	43	49
Nitrit	mg/L	2,0	< BG						
Nitrat	mg/L	2,0	< BG						
Sulfat	mg/L	2,0	49	46	45	46	47	49	50
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			119	132	146	161	210	216	280
Parameter	Einheit	BG					TCE-Zugabe		
pH	-		6,3	6,2	6,5	6,2	6,2	nb	6,2
O2	mg/L		7,4	6,8	7,5	7,5	7,6	nb	7,6
Temperatur	°C		22	22	22	22	23	nb	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		3,0	2,8	2,3	2,3	2,1	1,9	1,9
cDCE GC 2	mg/L		3,1	2,8	2,3		1,3	2,0	1,9
cDCE	mg/L	0,02	3,1	2,8	2,3	2,3	2,1	2,0	1,9
TCE GC 1	mg/L		13	2,6	0,28	0,28	0,23	45	36
TCE GC 2	mg/L		16	2,6	0,27		0,11	45	35
TCE	mg/L	0,0002	14	2,6	0,28	0,28	0,23	45	36
PCE GC 1	mg/L		0,86	1,0	0,98	0,96	0,52	0,91	0,89
PCE GC 2	mg/L		1,0	1,0	0,93		0,23	0,92	0,84
PCE	mg/L	0,0002	0,92	1,0	0,96	0,96	0,52	0,91	0,87
DOC 1	mg/L					9,4	9,4		8,8
DOC 2	mg/L					10	9,3		8,8
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	9,8	9,4	nb	8,8
Chlorid	mg/L	2,0	57	70	75	74	71	nb	71
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	nb	< BG				
Nitrat	mg/L	2,0	< BG	nb	< BG				
Sulfat	mg/L	2,0	50	51	52	51	54	nb	53
PCR (OTU1)	Kopien/mL		7,2E+01	nb	nb	nb	nb	nb	1,8E+03

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2984 Grundwasser ohne Inokulum mit Nährstoffen (GWM2984-NS)

Parameter	Einheit	BG	0	28	70	84	92	105
pH	-		6,7	6,4	6,4	6,5	6,5	6,5
O2	mg/L		4,3	4,3	6,6	7,7	7,5	7,4
Temperatur	°C		23	21	22	22	21	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG					
Ethen GC 2	mg/L		< BG					
Ethen	mg/L	0,06	< BG					
VC GC 1	mg/L		< BG					
VC GC 2	mg/L		< BG					
VC	mg/L	0,12	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		3,4	3,4	3,0	3,1	3,3	3,1
cDCE GC 2	mg/L		3,5	3,5	3,3	3,1	3,2	3,0
cDCE	mg/L	0,02	3,5	3,4	3,1	3,1	3,3	3,0
TCE GC 1	mg/L		34	38	30	30	29	21
TCE GC 2	mg/L		36	39	38	30	29	16
TCE	mg/L	0,0002	35	38	34	30	29	18
PCE GC 1	mg/L		1,0	1,1	0,80	0,97	1,03	0,96
PCE GC 2	mg/L		1,1	1,2	1,1	0,96	1,04	0,38
PCE	mg/L	0,0002	1,1	1,1	0,96	0,97	1,03	0,96
DOC 1	mg/L		11					
DOC 2	mg/L		11					
DOC	mg/L	0,2	11	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	30	30	42	45	49	58
Nitrit	mg/L	2,0	< BG					
Nitrat	mg/L	2,0	4,0	4,1	4,1	4,1	4,3	3,9
Sulfat	mg/L	2,0	44	44	47	49	50	51
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Parameter	Einheit	BG	119	132	146	161	210	216	280
pH	-		6,3	6,3	6,4	6,3	6,4	nb	6,2
O2	mg/L		6,3	7,5	7,5	7,5	7,6	nb	7,5
Temperatur	°C		22	22	22	22	23	nb	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		2,1	2,1	2,1	2,1	1,9	2,2	1,7
cDCE GC 2	mg/L		2,0		2,1		2,0	2,1	1,8
cDCE	mg/L	0,02	2,1	2,1	2,1	2,1	1,9	2,2	1,7
TCE GC 1	mg/L		0,24	0,25	0,02	0,24	0,19	43	34
TCE GC 2	mg/L		0,22		0,24		0,24	40	37
TCE	mg/L	0,0002	0,23	0,25	0,24	0,24	0,21	42	36
PCE GC 1	mg/L		0,98	0,94	0,95	0,94	0,43	0,94	0,82
PCE GC 2	mg/L		0,85		0,95		0,88	0,88	0,90
PCE	mg/L	0,0002	0,91	0,94	0,95	0,94	0,88	0,91	0,86
DOC 1	mg/L					10	9,3		9,3
DOC 2	mg/L					10	9,2		9,3
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	10	9,2	nb	9,3
Chlorid	mg/L	2,0	78	81	86	83	72	nb	74
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	nb	< BG				
Nitrat	mg/L	2,0	4,3	3,9	4,0	4,1	4,9	nb	15
Sulfat	mg/L	2,0	51	52	52	54	53	nb	52
PCR (OTU1)	Kopien/mL		2,6E+05	nb	nb	nb	nb	nb	8,9E+01

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2984 Grundwasser mit Flüssigkultur (GWM2984-FK)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	70	84	92	105
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		6,5	6,3	6,1	6,1	6,2	6,3	6,2
O2	mg/L		5,4	4,4	5,1	6,0	7,2	7,9	7,6
Temperatur	°C		23	21	22	22	22	21	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		0,53	< BG					
VC GC 2	mg/L		0,48	< BG					
VC	mg/L	0,12	0,51	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		3,1	2,8	2,5	1,3	1,6	1,3	1,2
cDCE GC 2	mg/L		3,0	2,8	2,6	1,4	1,3	1,3	1,2
cDCE	mg/L	0,02	3,0	2,8	2,6	1,4	1,5	1,3	1,2
TCE GC 1	mg/L		33	26	12	0,59	0,47	0,34	0,24
TCE GC 2	mg/L		30	25	15	0,63	0,41	0,35	0,23
TCE	mg/L	0,0002	32	25	13	0,61	0,44	0,34	0,24
PCE GC 1	mg/L		1,1	0,98	0,46	0,57	0,88	0,88	0,83
PCE GC 2	mg/L		0,97	0,90	0,94	0,70	0,81	0,94	0,79
PCE	mg/L	0,0002	1,0	0,94	0,94	0,64	0,84	0,91	0,81
DOC 1	mg/L		10						
DOC 2	mg/L		10						
DOC	mg/L	0,2	10	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L		41	46	61	74	71	77	79
Nitrit	mg/L		2,0	< BG					
Nitrat	mg/L		2,0	16	16	17	17	23	19
Sulfat	mg/L		2,0	43	44	45	46	48	51
PCR (OTU1)	Kopien/mL		<BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			119	120	132	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe						
pH	-		6,2	nb	6,2	6,1	6,1	6,0	6,0
O2	mg/L		7,8	nb	7,6	7,2	7,5	7,5	7,6
Temperatur	°C		22	nb	22	22	23	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		1,2	1,2	1,2	0,54	0,50	0,47	< BG
cDCE GC 2	mg/L		1,2	1,2	1,2	0,53		0,48	< BG
cDCE	mg/L	0,02	1,2	1,2	1,2	0,54	0,50	0,48	< BG
TCE GC 1	mg/L		0,16	28	26		0,080	0,089	0,038
TCE GC 2	mg/L		0,19	26	26	0,13		0,090	0,036
TCE	mg/L	0,0002	0,18	27	26	0,13	0,080	0,089	0,037
PCE GC 1	mg/L		0,83	0,80	0,83	0,83	0,76	0,75	0,76
PCE GC 2	mg/L		0,84	0,76	0,84	0,76		0,74	0,67
PCE	mg/L	0,0002	0,83	0,78	0,84	0,80	0,76	0,74	0,72
DOC 1	mg/L						10	9,1	9,3
DOC 2	mg/L						9,7	9,0	9,1
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	10	9,0	9,2
Chlorid	mg/L		2,0	78	nb	81	104	105	106
Nitrit	mg/L		2,0	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L		2,0	19	nb	19	19	19	25
Sulfat	mg/L		2,0	50	nb	49	50	51	49
PCR (OTU1)	Kopien/mL		<BG	nb	nb	nb	nb	nb	4,5E+02

nb: nicht bestimmt

Standort 5: GWM2984 Grundwasser mit Quarzsandkultur (GWM2984-QS)

Tag Inkubationszeit			0	28	49	56	70	84	92
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe						
pH	-		6,5	7,1	6,9	nb	6,2	6,6	7,5
O2	mg/L		4,6	5,1	6,1	nb	7,0	7,8	8,7
Temperatur	°C		23	21	22	nb	22	22	21
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		0,59	< BG					
VC GC 2	mg/L		0,60	< BG					
VC	mg/L	0,12	0,60	< BG					
cDCE GC 1	mg/L		3,5	0,59	0,40	0,44	0,39	0,39	0,44
cDCE GC 2	mg/L		2,8	0,66	0,39	0,45	0,40	0,39	0,46
cDCE	mg/L	0,02	3,2	0,62	0,39	0,45	0,39	0,39	0,45
TCE GC 1	mg/L		38	0,56	0,20	32	30	27	31
TCE GC 2	mg/L		26	0,81	0,22	30	33	28	33
TCE	mg/L	0,0002	32	0,69	0,21	31	31	28	32
PCE GC 1	mg/L		1,2	0,18	0,12	0,14	0,14	0,12	0,14
PCE GC 2	mg/L		0,76	0,26	0,14	0,15	0,15	0,12	0,15
PCE	mg/L	0,0002	1,2	0,22	0,13	0,14	0,14	0,12	0,14
DOC 1	mg/L		10						
DOC 2	mg/L		10						
DOC	mg/L	0,2	10	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L		2,0	31	50	60	nb	61	62
Nitrit	mg/L		2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG
Nitrat	mg/L		2,0	5,4	5,5	5,1	nb	5,7	5,9
Sulfat	mg/L		2,0	42	42	46	nb	47	48
PCR (OTU1)	Kopien/mL		<BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Tag Inkubationszeit			105	119	132	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG	Nährstoffzugabe						
pH	-		7,5	7,5	7,5	7,3	7,2	7,2	6,6
O2	mg/L		8,6	8,6	8,4	8,4	8,0	8,1	8,2
Temperatur	°C		22	21	22	22	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L		< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 1	mg/L		0,43	0,36	0,41	0,39	0,42	0,38	0,020
cDCE GC 2	mg/L		0,44	0,36	0,40	0,36		0,36	0,020
cDCE	mg/L	0,02	0,44	0,36	0,41	0,38	0,42	0,37	0,020
TCE GC 1	mg/L		29	23	27	27	28	26	0,0033
TCE GC 2	mg/L		31	25	25	25		23	0,0034
TCE	mg/L	0,0002	30	24	26	26	28	25	0,0033
PCE GC 1	mg/L		0,10	0,061	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14
PCE GC 2	mg/L		0,14	0,069	0,13			0,076	0,14
PCE	mg/L	0,0002	0,12	0,065	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14
DOC 1	mg/L						9,7	9,1	9,1
DOC 2	mg/L						9,7	9,0	9,1
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	9,7	9,1	9,1
Chlorid	mg/L		2,0	64	64	66	68	68	62
Nitrit	mg/L		2,0	< BG					
Nitrat	mg/L		2,0	6,4	6,7	7,5	9,4	14	16
Sulfat	mg/L		2,0	51	51	50	50	51	52
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb	< BG	nb	nb	nb	nb	5,29E+01

nb: nicht bestimmt

Standort 6: B44M Sterilkontrolle (B44M-St)

Parameter	Einheit	BG	0	28	49	70	84	92	105	119	132	146	161
pH	-	mg/L											
O2	mg/L		5,5	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,2	5,2	5,1	5,1
Temperatur	°C		4,6	5,4	5,6	6,7	8,3	8,8	8,1	8,5	8,1	8,1	8,1
Ethen GC 1	mg/L		< BG										
Ethen GC 2	mg/L		< BG										
Ethen	mg/L	0,06	< BG										
VC GC 1	mg/L		0,62	0,60	0,58	0,53	0,35	0,52	0,50	0,84	0,46	0,47	0,46
VC GC 2	mg/L		0,64	0,61	0,55	0,59	0,37	0,57	0,49	0,85	0,49	0,47	0,47
VC	mg/L	0,12	0,63	0,61	0,57	0,56	0,36	0,54	0,50	0,84	0,48	0,47	0,46
cDCE GC 1	mg/L		0,061	0,058	0,060	0,059	0,055	0,057	0,052	0,051	0,056	0,056	0,053
cDCE GC 2	mg/L		0,062	0,058	0,061	0,068	0,058	0,054	0,053	0,056	0,054	0,053	0,053
cDCE	mg/L	0,02	0,062	0,058	0,061	0,068	0,058	0,054	0,053	0,056	0,054	0,053	0,053
TCE GC 1	mg/L		0,49	0,25	0,27	0,27	0,20	0,26	0,19	0,19	0,25	0,24	0,22
TCE GC 2	mg/L		0,47	0,27	0,26	0,24	0,31	0,28	0,23	0,24	0,23	0,23	0,23
TCE	mg/L	0,0002	0,48	0,26	0,26	0,26	0,31	0,27	0,21	0,25	0,23	0,22	0,22
PCP GC 1	mg/L		0,042	0,030	0,033	0,029	0,031	0,016	0,017	0,028	0,026	0,026	0,025
PCP GC 2	mg/L		0,040	0,032	0,027	0,026	0,034	0,027	0,028	0,028	0,026	0,026	0,025
PCP	mg/L	0,0002	0,041	0,031	0,029	0,030	0,046	0,033	0,027	0,028	0,026	0,026	0,025
DOC1	mg/L		1,1										
DOC2	mg/L		1,1										
DOC	mg/L	0,2	1,1	nb	1,2								
Chlорid	mg/L		52	nb	51	51	52	53	52	52	50	51	51
Nitrit	mg/L		5,0	< BG	nb	< BG							
Nitrat	mg/L		5,0	36	nb	29	28	30	29	29	27	28	28
Sulfat	mg/L		5,0	440	nb	250	202	185	93	127	147	174	166
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb										

nb: nicht bestimmt

Standort 6: B44M Grundwasser ohne Inokulum (B44M-GW)

Parameter	Einheit	BG	0	28	49	70	84	92	105	119	132	146	161
pH	-	mg/L	6,6	6,4	6,5	6,6	6,6	6,7	6,8	6,7	6,7	6,7	6,7
O2	mg/L	4,6	5,1	6,2	6,9	8,5	8,4	8,2	8,7	8,4	8,3	8,2	8,2
Temperatur	°C	23	20	21	22	21	22	21	22	21	22	22	23
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG										
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	< BG										
cDCE GC 1	mg/L	0,060	0,059	0,062	0,064	0,061	0,057	0,059	0,058	0,059	0,058	0,052	0,051
cDCE GC 2	mg/L	0,062	0,060	0,060	0,062	0,062	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,055	0,052
cDCE	mg/L	0,02	0,027	0,026	0,026								
TCE GC 1	mg/L	0,32	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,25	0,19
TCE GC 2	mg/L	0,32	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,24	0,19
TCE	mg/L	0,0002	0,27	0,27	0,25	0,27	0,26	0,28	0,28	0,28	0,28	0,21	0,19
PCP GC 1	mg/L	0,042	0,033	0,042	0,042	0,031	0,032	0,029	0,035	0,031	0,037	0,016	0,017
PCP GC 2	mg/L	0,042	0,032	0,042	0,042	0,031	0,030	0,032	0,034	0,033	0,034	0,023	0,016
PCP	mg/L	0,0002	0,032	0,042	0,042	0,031	0,030	0,034	0,032	0,036	0,032	0,020	0,028
DOC1	mg/L	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3
DOC2	mg/L	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,3
DOC	mg/L	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,17	0,017
Chlорid	mg/L	2,0	51	56	53	54	54	54	55	56	59	60	59
Nitrit	mg/L	2,0	< BG										
Nitrat	mg/L	2,0	27	28	27	27	27	27	29	29	28	26	27
Sulfat	mg/L	2,0	154	149	148	149	152	155	156	155	154	149	151
PCR (OTU1)	Kopien/mL	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Standort 6: B44M Grundwasser ohne Inokulum mit Nährstoffen (B44M-NS)

Tag Inkulationszeit		B44M-NS																					
Parameter	Einheit	BG		0		28		49		70		84		92		105		119		132		146	
pH	-	6,7	6,6	6,7	6,8	6,9	6,9	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	7,0	7,0	7,0		
O2	mg/L	4,7	5,2	6,2	7,0	8,6	8,5	8,5	8,2	8,7	8,7	8,4	8,4	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,1	8,1	8,1		
Temperatur	°C	23	21	21	22	21	22	21	22	21	22	21	22	21	22	21	22	21	22	22	23		
Ethen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG			
Ethen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG		
Ethen	mg/L	0,06	< BG																				
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG		
VC GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG		
VC	mg/L	0,12	< BG																				
cDCE GC 1	mg/L	0,060	0,058	0,062	0,062	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055		
cDCE GC 2	mg/L	0,032	0,060	0,059	0,060	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055		
cDCE	mg/L	0,02	0,060	0,059	0,060	0,055																	
TCE GC 1	mg/L	0,32	0,28	0,31	0,25	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28		
TCE GC 2	mg/L	0,33	0,31	0,27	0,27	0,31	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27		
TCE	mg/L	0,0002	0,32	0,30	0,29	0,29	0,26	0,26	0,29														
PCE GC 1	mg/L	0,040	0,032	0,036	0,025	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034		
PCE GC 2	mg/L	0,041	0,035	0,026	0,030	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042		
PCE	mg/L	0,0002	0,040	0,033	0,031	0,028	0,038	0,037	0,038	0,037													
DOC1	mg/L	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
DOC2	mg/L	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
DOC	mg/L	0,2	1,5																				
Chlорid	mg/L	2,0	56	56	53	53	54	54	55	55	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56		
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	31	28	28	28	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31		
Nitrat	mg/L	2,0	157	157	148	148	148	148	153	153	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155		
Sulfat	mg/L	2,0	nb																				
PCR (OTU1)	Kopien/mL																						

nb: nicht bestimmt

Standort 6: B44M Grundwasser mit Flüssigkultur (B44M-FK)

Parameter	Einheit	Tag Inkubationszeit	BG	TCE-Zugabe												TCE-Zugabe	161
				0	28	49	56	70	84	92	105	119	120	132	146		
pH	-			6,6	6,5	6,6	6,6	6,7	6,8	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9
O ₂	mg/L			5,0	5,3	3,2	nb	6,9	8,5	8,3	8,7	8,6	8,4	8,3	8,2	8,2	8,2
Temperatur	°C			23	21	21	nb	22	21	22	21	21	nb	22	22	22	22
Ethilen GC 1	mg/L			< BG													
Ethilen GC 2	mg/L			< BG													
Ethen	mg/L	0,06		< BG													
VC GC 1	mg/L			< BG													
VC GC 2	mg/L			< BG													
VC	mg/L	0,12		< BG													
cDCE GC 1	mg/L			0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
cDCE GC 2	mg/L			0,050	< BG												
cDCE	mg/L	0,02		0,28	0,0042	0,0062	1,26	1,15	0,034	0,0036	0,0017	0,0017	3,4	3,9	3,3	3,3	3,0
TCE GC 1	mg/L			0,28	0,0061	0,0056	1,18	1,28	0,038	0,0035	0,0020	0,0021	3,3	3,3	2,4	2,4	
TCE GC 2	mg/L			0,28	0,0051	0,0059	1,22	1,21	0,036	0,0035	0,0019	0,0019	3,4	3,9	2,8	2,8	1,0
TCE	mg/L	0,0002		0,032	0,017	0,028	0,029	0,023	0,033	0,024	0,014	0,016	0,021	0,018	0,018	0,018	
PCE GC 1	mg/L			0,037	0,028	0,025	0,026	0,027	0,031	0,023	0,021	0,022	0,020	0,013	0,013	0,013	
PCE	mg/L	0,0002		0,035	0,028	0,027	0,027	0,025	0,032	0,023	0,018	0,019	0,021	0,016	0,018		
DOC 1	mg/L			1,1													
DOC 2	mg/L			1,4													
DOC	mg/L	0,2		1,3	nb	1,3											
Chlорid	mg/L	2,0		62	63	65	nb	64	66	61	67	68	nb	64	63	63	63
Nitrit	mg/L	2,0		< BG	< BG	< BG	nb	42	47	41	44	42	nb	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0		42	42	47	nb	135	141	133	136	141	133	47	47	47	47
Sulfat	mg/L	2,0		141	141	nb											
PCR (OTU1)	Kopien/mL			nb													

nb: nicht bestimmt

Standort 6: B44M Grundwasser mit Quarzsandkulturl (B44M-QS)

Parameter	Einheit	BG	Tage Inkubationszeit										TCE-Zugabe	132	146
			0	28	49	56	70	84	92	105	119	120			
pH	-	6,7	6,7	6,7	6,7	6,8	6,9	6,9	6,9	7,0	7,0	7,1	6,9	7,1	6,9
O ₂	mg/L	4,8	5,5	6,1	7,0	8,5	8,6	8,5	8,6	8,6	8,6	8,3	8,1	8,3	8,1
Temperatur	°C	23	21	21	21	22	21	21	21	21	21	21	23	23	23
Ethilen GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethilen GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Ethen	mg/L	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 1	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC GC 2	mg/L	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
VC	mg/L	0,12	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 1	mg/L	0,056	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE GC 2	mg/L	0,057	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
cDCE	mg/L	0,02	0,057	< BG											
TCE GC 1	mg/L	0,30	0,0022	0,0017	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
TCE GC 2	mg/L	0,29	0,0022	0,0016	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
TCE	mg/L	0,0002	0,29	0,0022	0,0016	1,2	1,4	1,1	1,4	1,1	0,45	0,0026	0,0033	3,7	3,6
PCE GC 1	mg/L	0,041	0,024	0,026	0,026	0,033	0,028	0,036	0,029	0,025	0,021	0,025	0,023	0,023	0,023
PCE GC 2	mg/L	0,040	0,026	0,026	0,023	0,035	0,028	0,036	0,028	0,022	0,019	0,024	0,022	0,022	0,022
PCE	mg/L	0,0002	0,040	0,025	0,024	0,034	0,031	0,036	0,028	0,018	0,022	0,023	0,023	0,021	0,014
DOC 1	mg/L	1,3	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
DOC 2	mg/L	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
DOC	mg/L	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Chlорid	mg/L	2,0	58	59	58	58	59	61	61	61	61	62	62	62	62
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	34	34	31	31	30	32	34	33	33	32	32	32	33
Sulfat	mg/L	2,0	154	155	145	147	150	152	152	152	152	151	147	147	149
PCR (OTU1)	Kopien/mL	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Standort 7: PZ13 Sterilkontrolle (PZ13-St)

nb: nicht bestimmt

Standort 7: PZ13 Grundwasser ohne Inokulum (PZ13-GW)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	70	84	92	105
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		6,4	6,1	6,3	6,3	6,4	6,4	6,4
O2	mg/L		5,0	5,8	6,0	7,1	8,3	8,4	8,2
Temperatur	°C		24	21	21	21	22	21	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		0,044	0,048	0,044	0,046	0,050	0,047	0,044
cDCE GC 2	mg/L		0,046	0,047	0,049	0,049	0,068	0,047	0,045
cDCE	mg/L	0,02	0,045	0,047	0,046	0,047	0,059	0,047	0,045
TCE GC 1	mg/L		1,0	1,1	0,83	1,0	0,64	0,90	0,47
TCE GC 2	mg/L		1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	0,88	0,47
TCE	mg/L	0,0002	1,0	1,1	0,94	1,0	1,1	0,89	0,47
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L		1,4						
DOC 2	mg/L		1,3						
DOC	mg/L	0,2	1,3	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	84	88	87	88	89	90	91
Nitrit	mg/L	2,0	<BG						
Nitrat	mg/L	2,0	14	16	16	16	17	18	18
Sulfat	mg/L	2,0	130	64	6	65	68	72	71
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			119	132	133	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		6,5	6,5	nb	6,4	6,4	6,5	6,4
O2	mg/L		8,6	8,2	nb	8,1	8,0	8,0	8,1
Temperatur	°C		21	22	nb	22	22	22	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		0,030	0,029	0,031	0,030	0,028	0,031	0,036
cDCE GC 2	mg/L		0,029	0,030		0,031		0,031	0,036
cDCE	mg/L	0,02	0,030	0,029	0,031	0,031	0,028	0,031	0,036
TCE GC 1	mg/L		0,0057	0,0058	4,3	4,5	4,0	4,9	4,1
TCE GC 2	mg/L		0,0054	0,0056		4,9		4,7	4,0
TCE	mg/L	0,0002	0,0055	0,0057	4,3	4,7	4,0	4,8	4,0
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L						1,2	1,7	1,5
DOC 2	mg/L						1,2	1,7	1,5
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	1,2	1,7	1,5
Chlorid	mg/L	2,0	90	90	nb	88	89	97	95
Nitrit	mg/L	2,0	<BG	<BG	nb	<BG	<BG	<BG	<BG
Nitrat	mg/L	2,0	18	18	nb	20	19	16	16
Sulfat	mg/L	2,0	73	75	nb	79	77	59	59
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	< BG

nb: nicht bestimmt

Standort 7: PZ13 Grundwasser ohne Inokulum mit Nährstoffen (PZ13-NS)

Parameter	Einheit	BG	0	28	49	70	84	92	105
pH	-		6,6	6,5	6,5	6,5	6,4	6,6	6,6
O2	mg/L		4,7	5,9	6,0	7,1	8,4	8,2	8,4
Temperatur	°C		24	21	22	22	22	21	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		0,045	0,044	0,047	0,044	0,060	0,045	0,041
cDCE GC 2	mg/L		0,045	0,044	0,044	0,043	0,110	0,046	0,042
cDCE	mg/L	0,02	0,045	0,044	0,045	0,043	0,110	0,045	0,041
TCE GC 1	mg/L		1,1	1,0	0,95	0,90	0,85	0,91	0,49
TCE GC 2	mg/L		1,1	1,0	0,93	0,83	1,8	1,0	0,53
TCE	mg/L	0,0002	1,1	1,0	0,94	0,87	1,8	0,93	0,51
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L		1,3						
DOC 2	mg/L								
DOC	mg/L	0,2	1,3	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	90	91	87	87	88	89	90
Nitrit	mg/L	2,0	< BG						
Nitrat	mg/L	2,0	15	15	17	17	18	19	19
Sulfat	mg/L	2,0	53	53	64	65	67	71	71
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Parameter	Einheit	BG	119	132	133	146	161	210	280
pH	-		6,6	6,7	nb	6,8	6,7	6,7	6,6
O2	mg/L		8,6	8,2	nb	7,9	8,2	8,0	8,2
Temperatur	°C		21	22	nb	22	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		0,042	0,031	0,031	0,029	0,029	0,029	< BG
cDCE GC 2	mg/L		0,043	0,031		0,029		0,030	< BG
cDCE	mg/L	0,02	0,042	0,031	0,031	0,029	0,029	0,030	< BG
TCE GC 1	mg/L		0,36	0,0049	4,3	4,0	3,5	1,9	0,012
TCE GC 2	mg/L		0,37	0,0051		4,3		2,1	0,011
TCE	mg/L	0,0002	0,37	0,0050	4,3	4,1	3,5	2,0	0,012
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L						1,9	1,1	1,4
DOC 2	mg/L						1,2	1,2	1,5
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	1,5	1,2	1,5
Chlorid	mg/L	2,0	90	89	nb	88	89	100	100
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	19	19	nb	20	20	17	17
Sulfat	mg/L	2,0	73	75	nb	79	79	59	59
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	< BG

nb: nicht bestimmt

Standort 7: PZ13 Grundwasser mit Flüssigkultur (PZ13-FK)

Tage Inkubationszeit			0	28	49	56	70	84	92
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe						
pH	-		6,5	6,3	6,3	nb	6,4	6,5	6,5
O2	mg/L		5,3	6,1	6,7	nb	7,1	8,6	8,4
Temperatur	°C		23	21	22	nb	22	22	21
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		0,040	< BG	< BG	< BG	< BG	0,066	< BG
cDCE GC 2	mg/L		0,039	< BG	< BG	< BG	< BG	0,035	< BG
cDCE	mg/L	0,02	0,040	< BG	< BG	< BG	< BG	0,066	< BG
TCE GC 1	mg/L		0,94	0,020	0,025	0,98	1,0	1,9	1,1
TCE GC 2	mg/L		0,92	0,021	0,023	1,0	0,96	1,0	0,96
TCE	mg/L	0,0002	0,93	0,021	0,024	1,0	0,99	1,9	1,0
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L		1,2						
DOC 2	mg/L								
DOC	mg/L	0,2	1,2	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	93	93	91	nb	91	93	94
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	28	28	30	nb	31	32	34
Sulfat	mg/L	2,0	49	50	61	nb	63	64	66
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

nb: nicht bestimmt

Tage Inkubationszeit			105	119	132	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		6,4	6,6	6,6	6,6	7,0	6,6	6,6
O2	mg/L		8,4	8,6	8,3	7,9	8,2	8,0	8,2
Temperatur	°C		22	22	22	22	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		< BG						
cDCE GC 2	mg/L		< BG						
cDCE	mg/L	0,02	< BG						
TCE GC 1	mg/L		0,98	0,99	0,96	0,98	0,91	0,0054	0,0032
TCE GC 2	mg/L		0,83	1,0		0,92		0,0054	0,0033
TCE	mg/L	0,0002	0,90	1,0	0,96	0,95	0,91	0,0054	0,0033
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L						1,4	1,2	1,4
DOC 2	mg/L						1,4	1,2	1,4
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	1,4	1,2	1,4
Chlorid	mg/L	2,0	95	94	94	91	94	94	100
Nitrit	mg/L	2,0	< BG						
Nitrat	mg/L	2,0	35	34	35	35	35	29	33
Sulfat	mg/L	2,0	69	69	72	75	73	52	57
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb	< BG	nb	nb	nb	nb	< BG

nb: nicht bestimmt

Standort 7: PZ13 Grundwasser mit Quarzsandkultur (PZ13-QS)

Tag Inkubationszeit			0	28	49	56	70	84	92
Parameter	Einheit	BG	TCE-Zugabe						
pH	-		6,5	6,5	6,4	nb	6,5	6,6	6,7
O2	mg/L		6,3	6,1	6,2	nb	7,1	8,6	8,4
Temperatur	°C		23	21	22	nb	22	22	21
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		< BG						
cDCE GC 2	mg/L		< BG						
cDCE	mg/L	0,02	< BG						
TCE GC 1	mg/L		0,78	0,030	0,027	1,0	1,1	2,1	0,86
TCE GC 2	mg/L		0,91	0,031	0,030	0,92	1,2	2,1	0,89
TCE	mg/L	0,0002	0,85	0,030	0,029	0,97	1,1	2,1	0,87
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L		1,1						
DOC 2	mg/L								
DOC	mg/L	0,2	1,1	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Chlorid	mg/L	2,0	92	93	89	nb	89	91	92
Nitrit	mg/L	2,0	< BG	< BG	< BG	nb	< BG	< BG	< BG
Nitrat	mg/L	2,0	19	19	20	nb	20	21	22
Sulfat	mg/L	2,0	54	53	63	nb	65	67	69
PCR (OTU1)	Kopien/mL		< BG	nb	nb	nb	nb	nb	nb

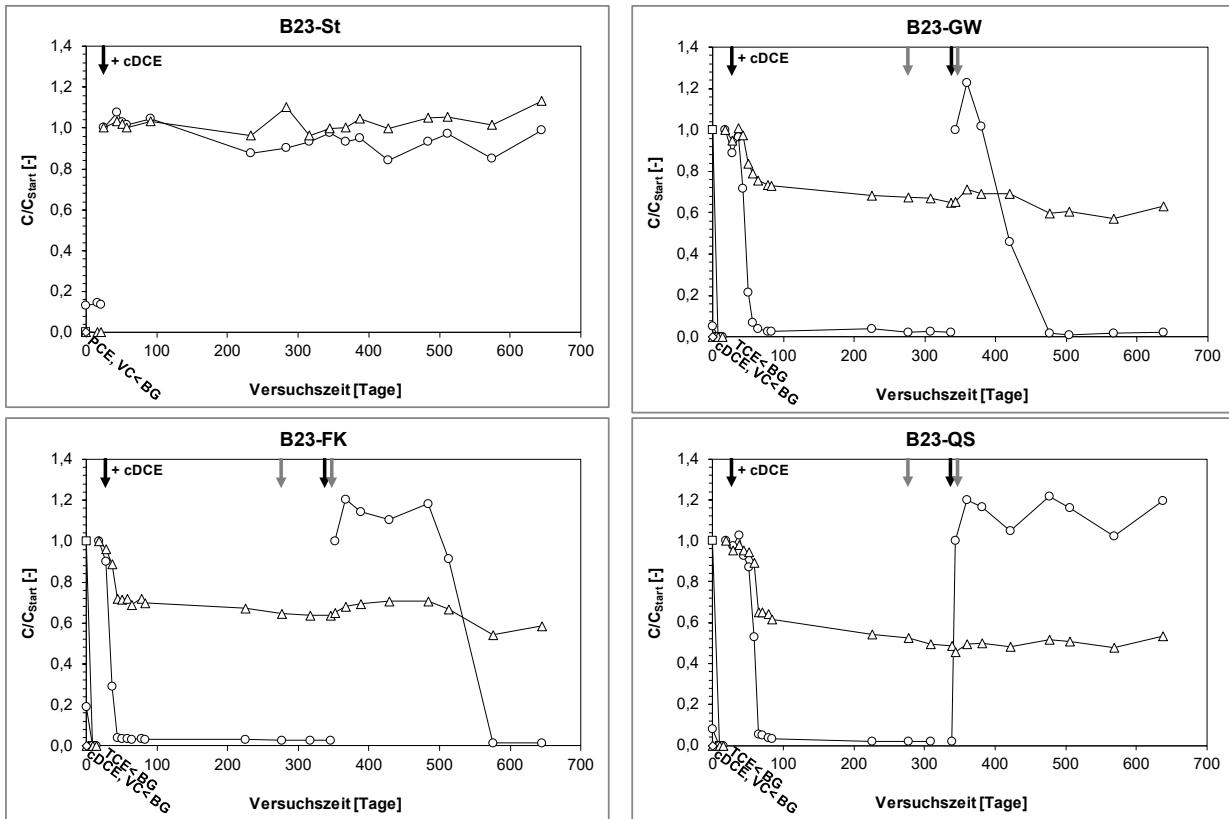
nb: nicht bestimmt

Tag Inkubationszeit			105	119	132	146	161	210	280
Parameter	Einheit	BG							
pH	-		6,6	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
O2	mg/L		8,4	8,5	8,3	8,3	8,1	8,2	8,1
Temperatur	°C		22	22	22	22	22	23	22
Ethen GC 1	mg/L		< BG						
Ethen GC 2	mg/L		< BG						
Ethen	mg/L	0,06	< BG						
VC GC 1	mg/L		< BG						
VC GC 2	mg/L		< BG						
VC	mg/L	0,12	< BG						
cDCE GC 1	mg/L		< BG						
cDCE GC 2	mg/L		< BG						
cDCE	mg/L	0,02	< BG						
TCE GC 1	mg/L		1,0	1,0	0,76	0,065	0,0025	0,0020	0,0023
TCE GC 2	mg/L		0,82	1,0		0,063		0,0024	0,0023
TCE	mg/L	0,0002	0,92	1,0	0,76	0,064	0,0025	0,0022	0,0023
PCE GC 1	mg/L		< BG						
PCE GC 2	mg/L		< BG						
PCE	mg/L	0,0002	< BG						
DOC 1	mg/L						2,0	1,1	1,3
DOC 2	mg/L						1,2	1,2	1,3
DOC	mg/L	0,2	nb	nb	nb	nb	1,6	1,1	1,3
Chlorid	mg/L	2,0	93	92	91	90	93	99	99
Nitrit	mg/L	2,0	< BG						
Nitrat	mg/L	2,0	23	23	23	24	23	21	21
Sulfat	mg/L	2,0	72	73	75	78	76	59	59
PCR (OTU1)	Kopien/mL		nb	< BG	nb	nb	nb	nb	< BG

nb: nicht bestimmt

Anhang 2: Diagramme der Mikrokosmenversuche

Standort 1:

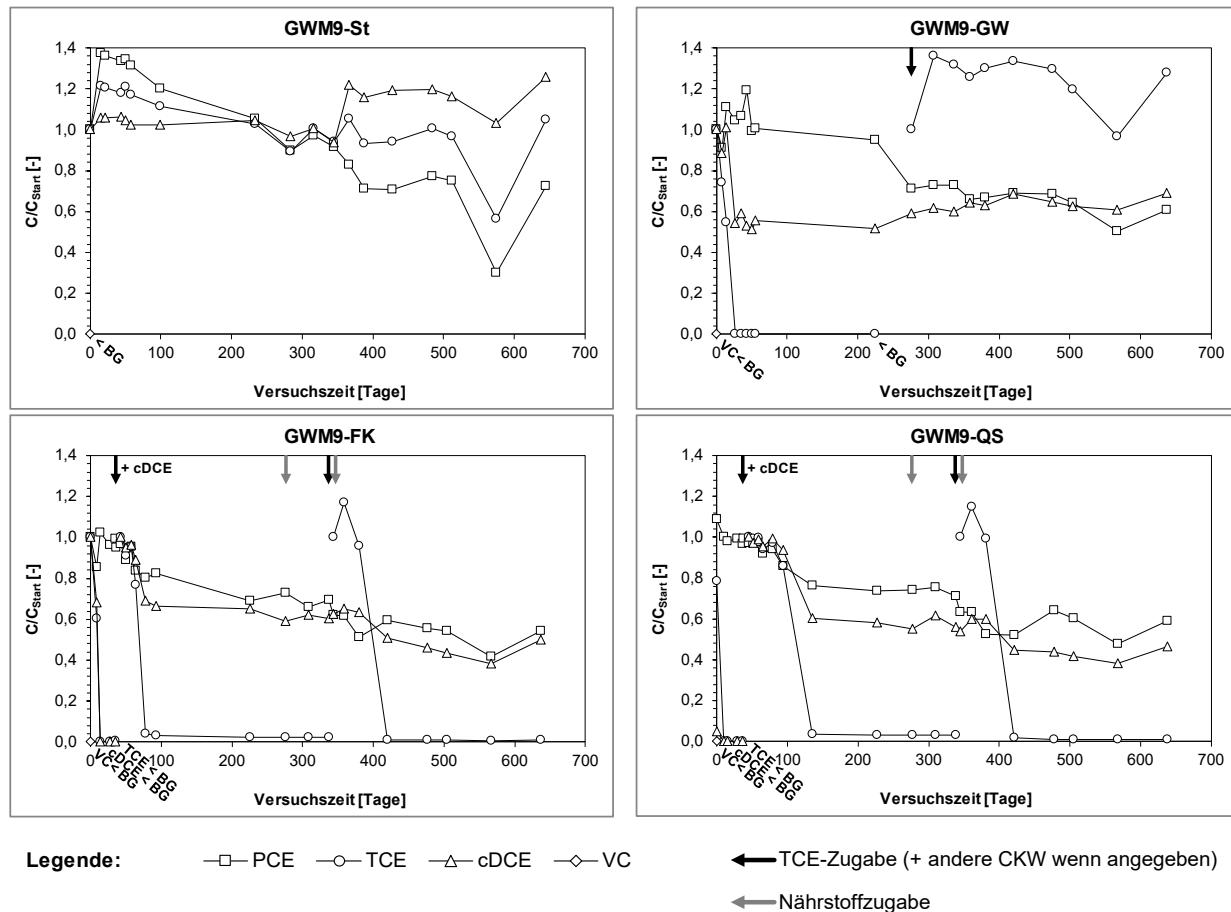


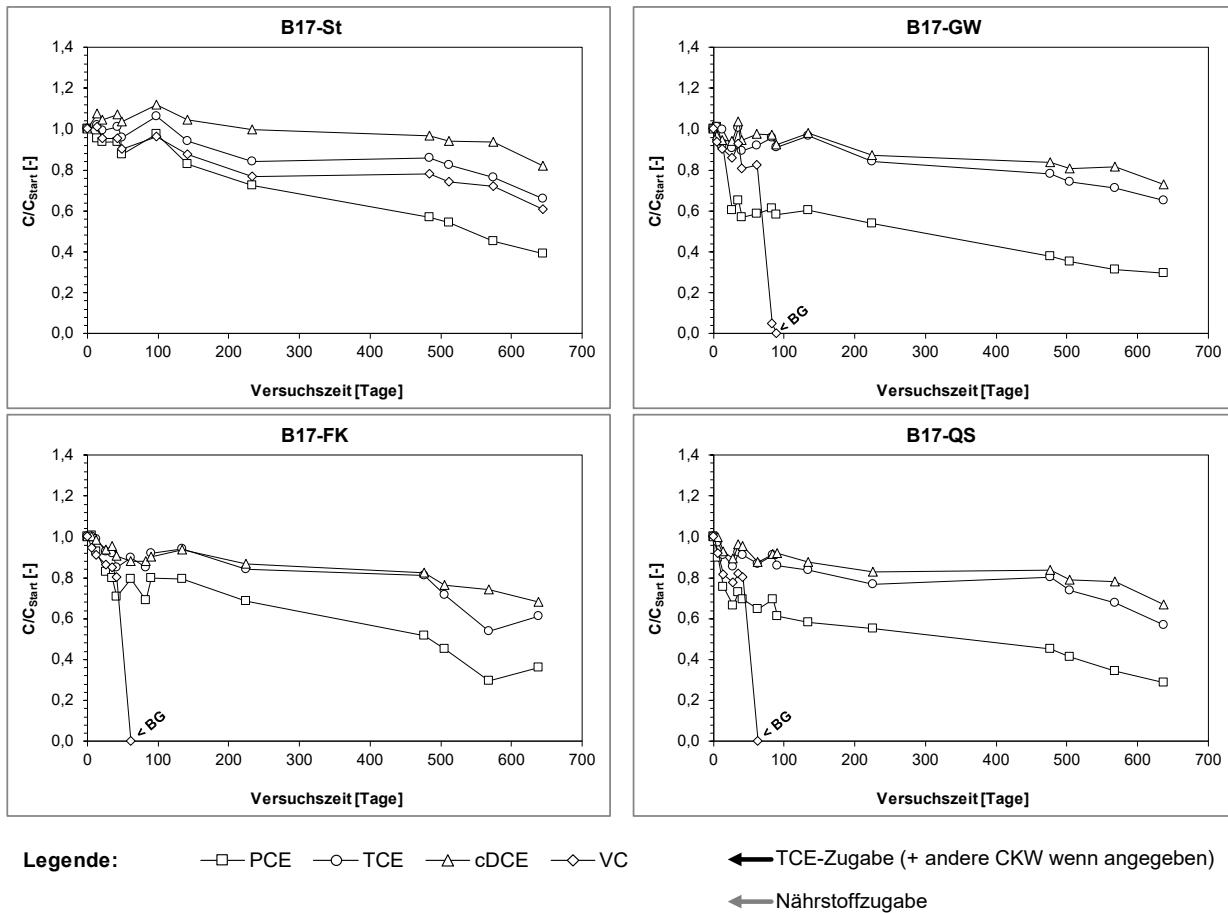
Legende: —□— PCE —○— TCE —△— cDCE —◇— VC

← TCE-Zugabe (+ andere CKW wenn angegeben)

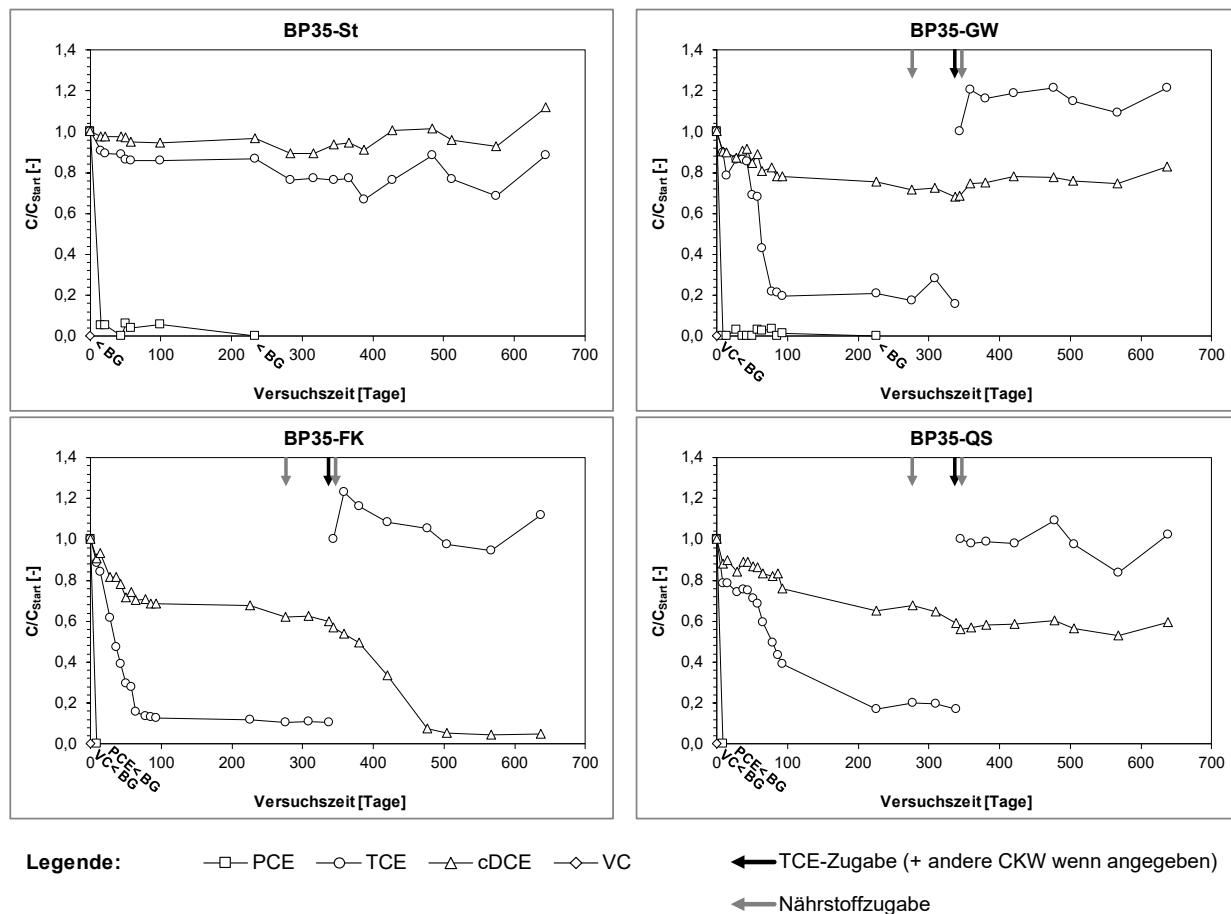
← Nährstoffzugabe

Standort 2:



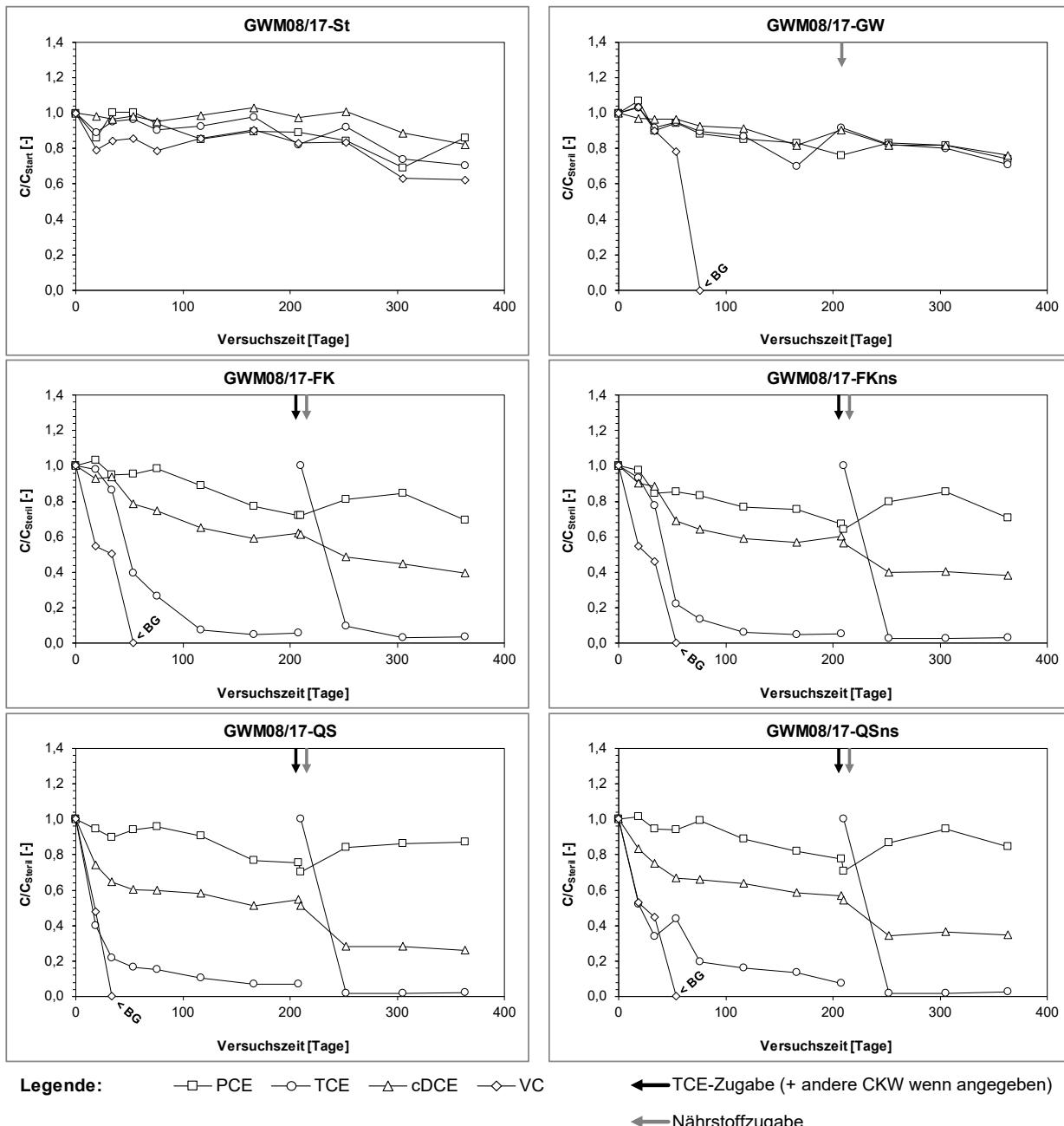


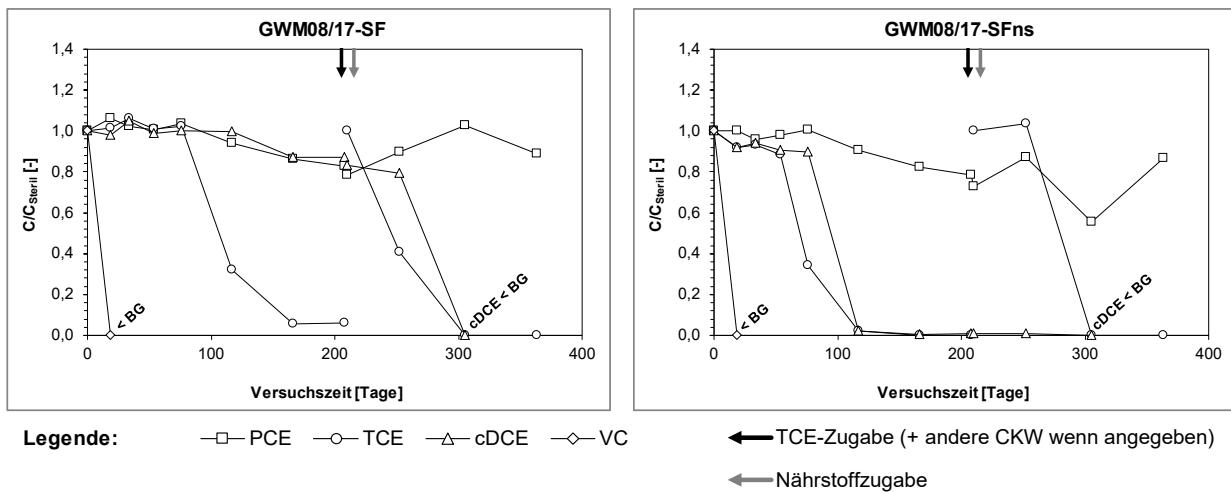
Standort 3:

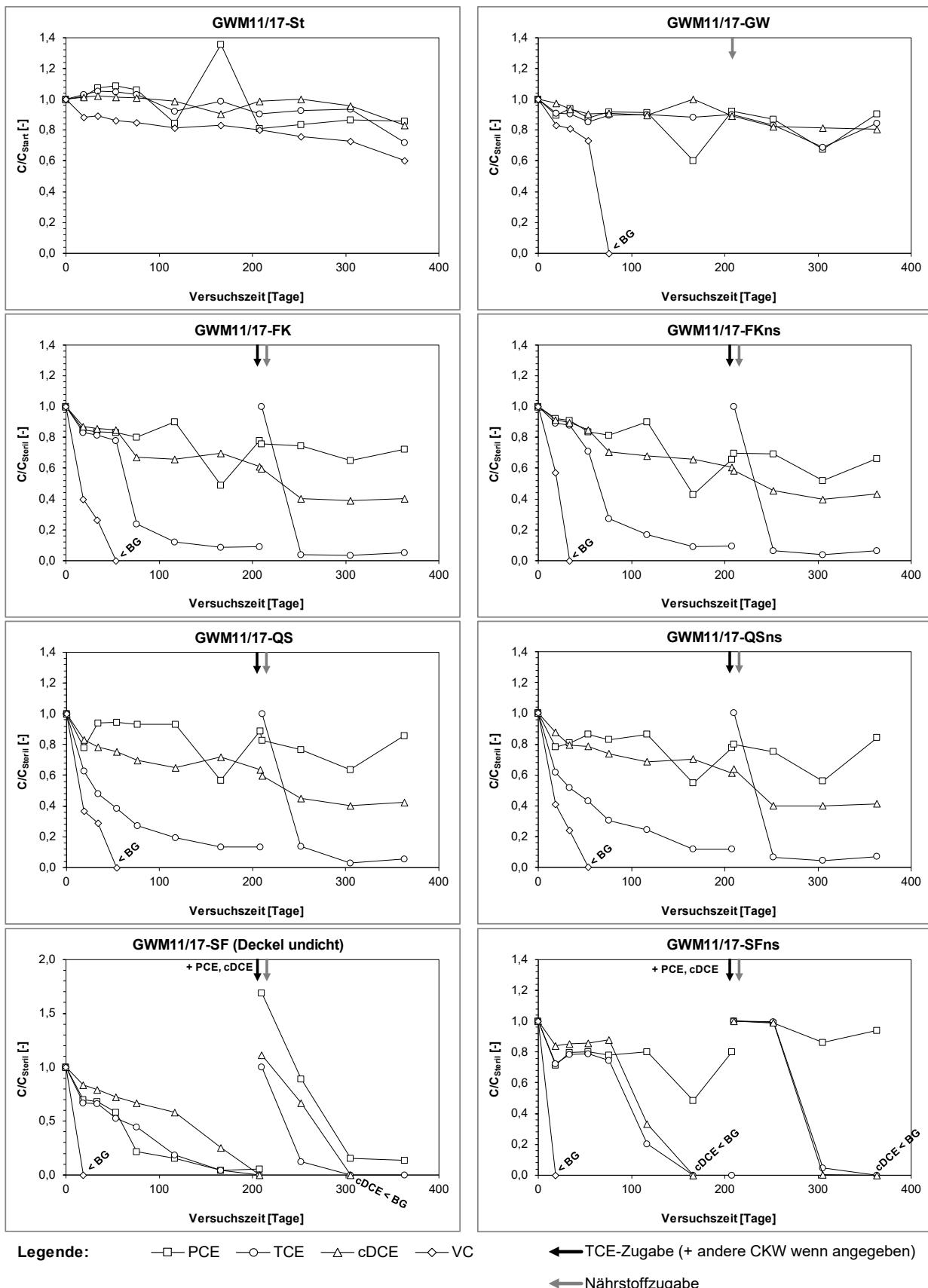


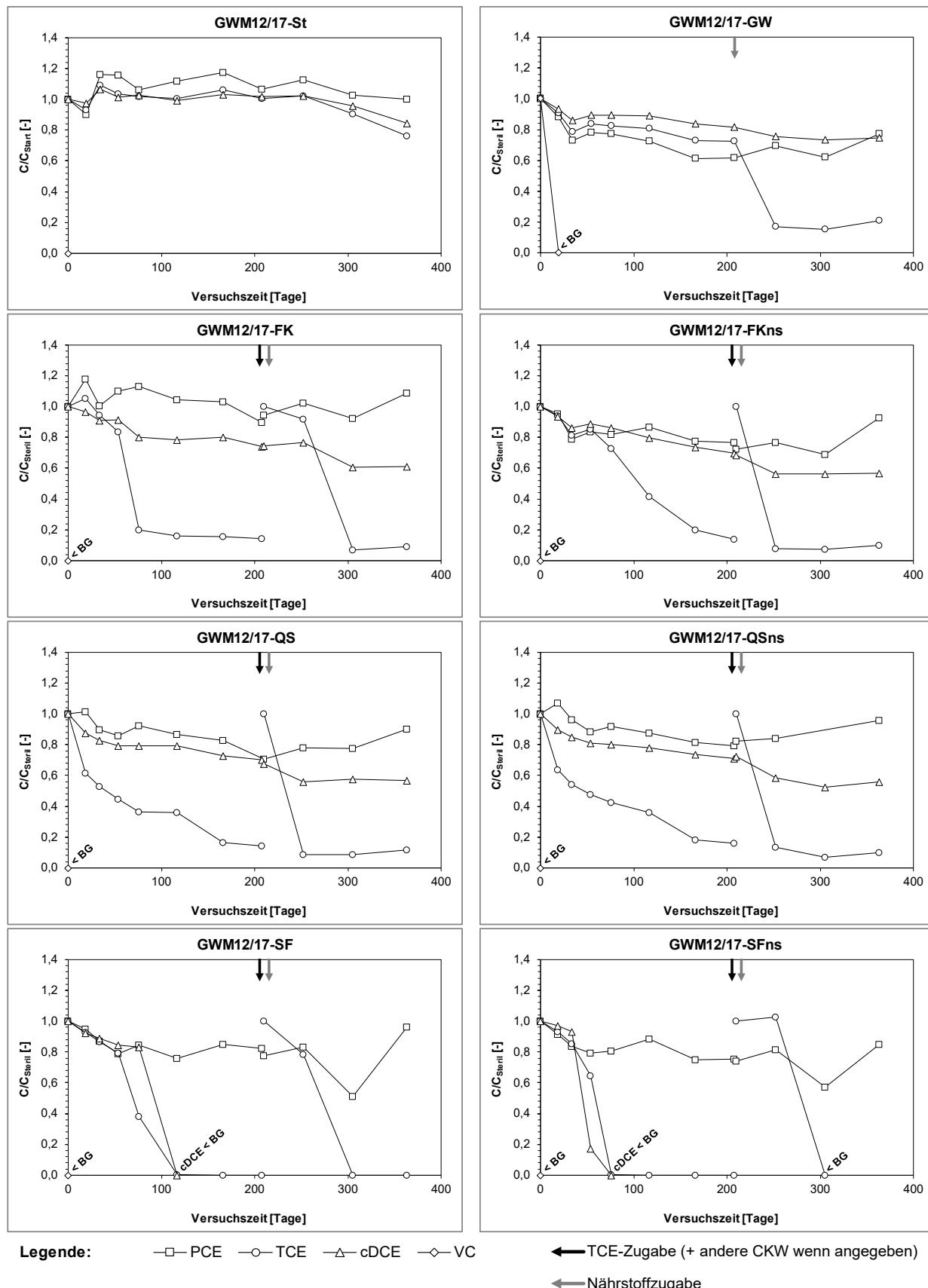
Legende: \square PCE \circ TCE \triangle cDCE \diamond VC \blackleftarrow TCE-Zugabe (+ andere CKW wenn angegeben)
 \blackleftarrow Nährstoffzugabe

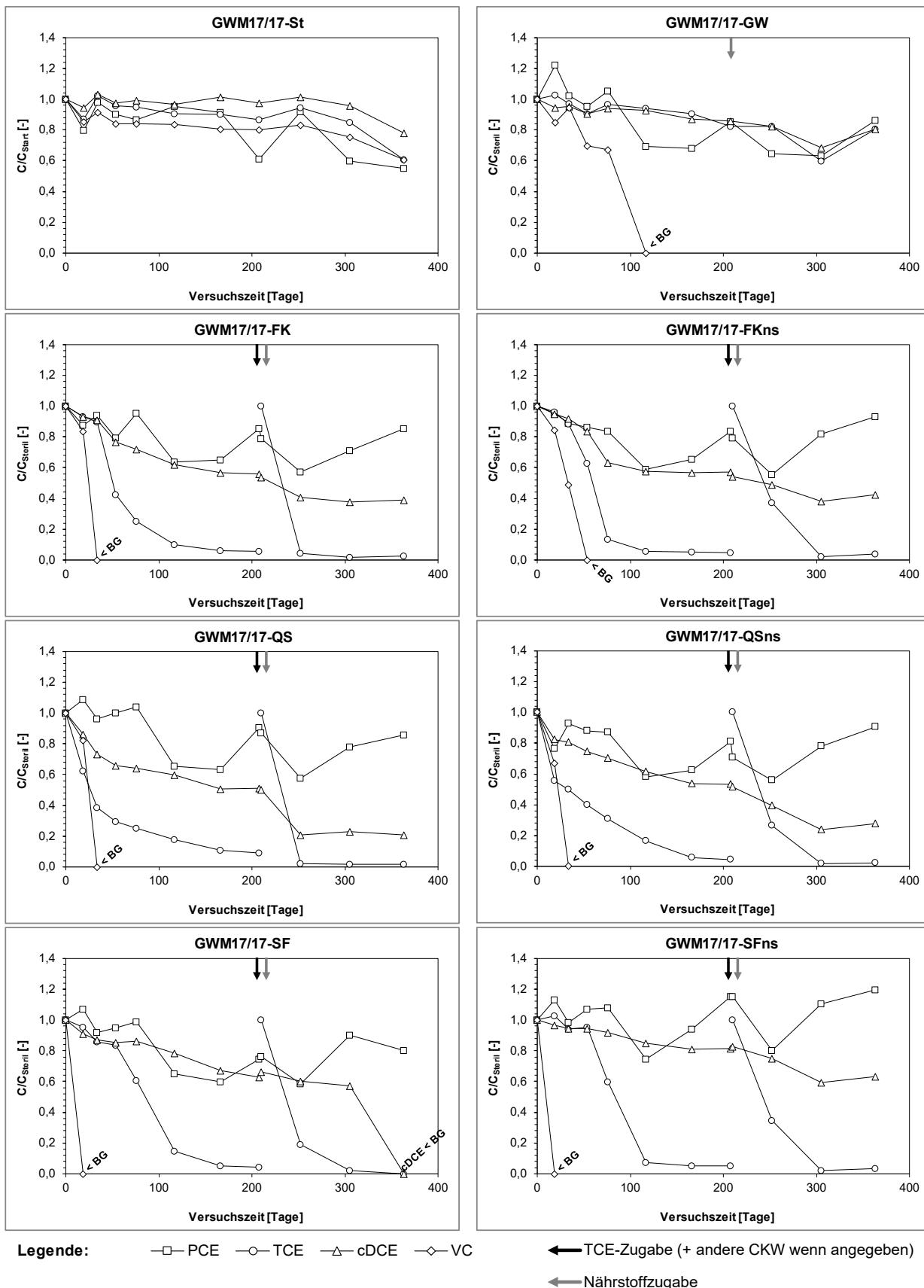
Standort 4:



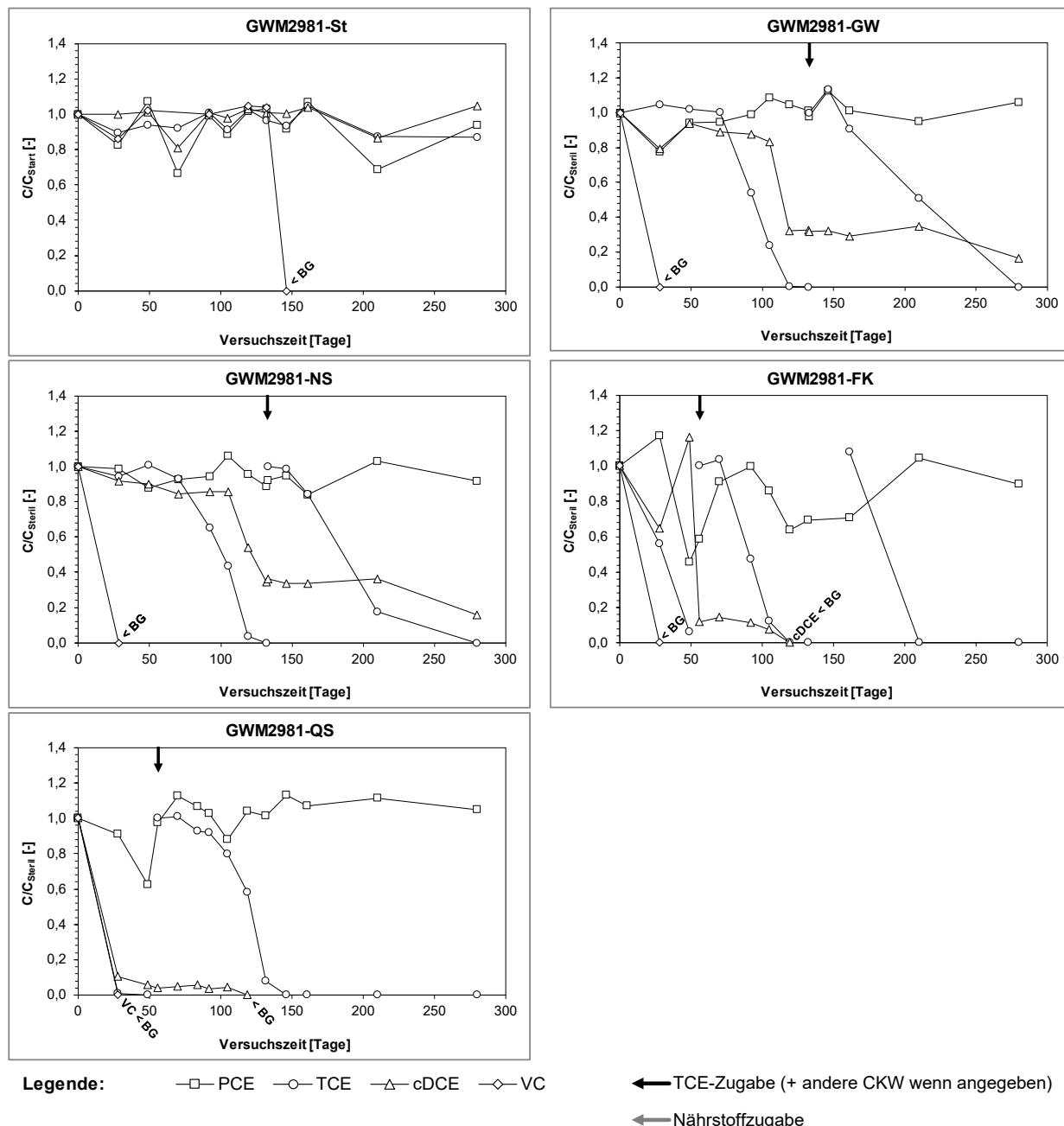


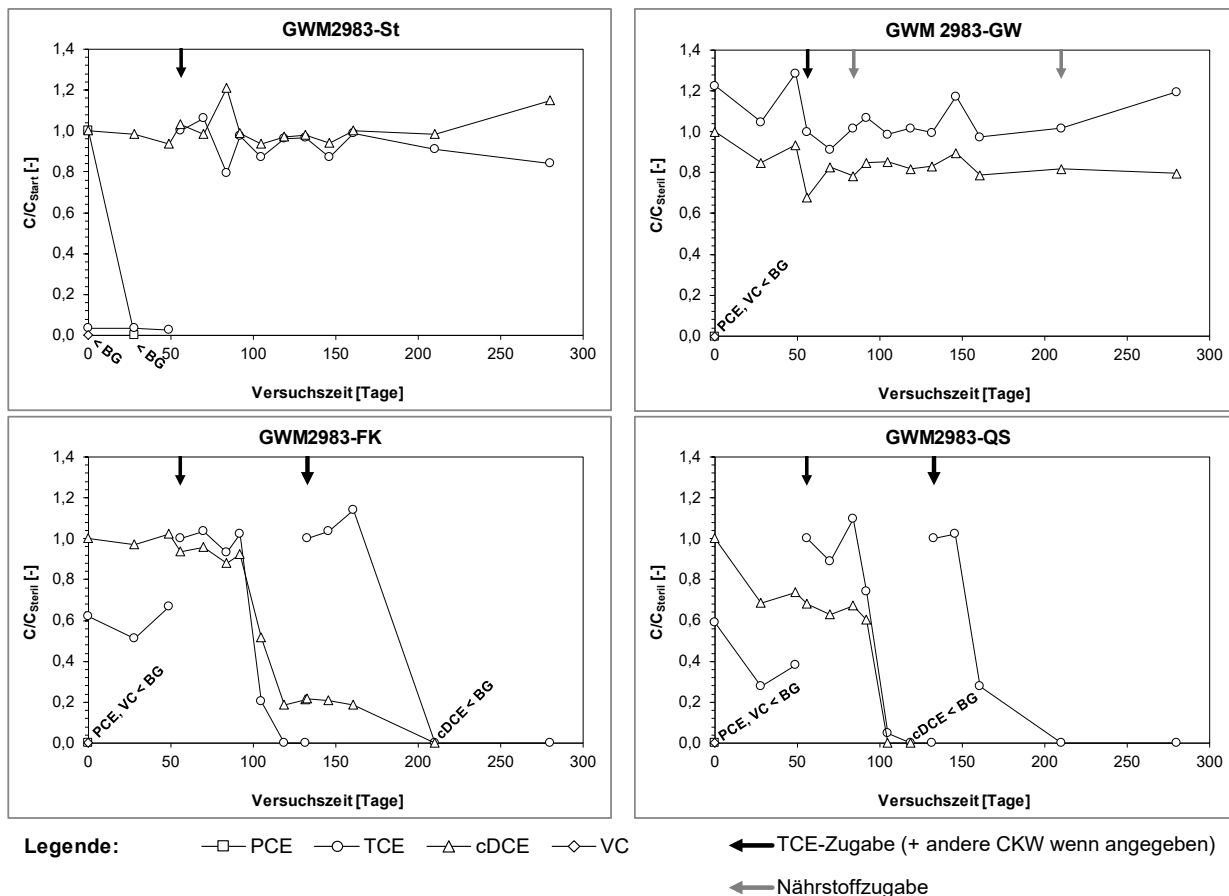


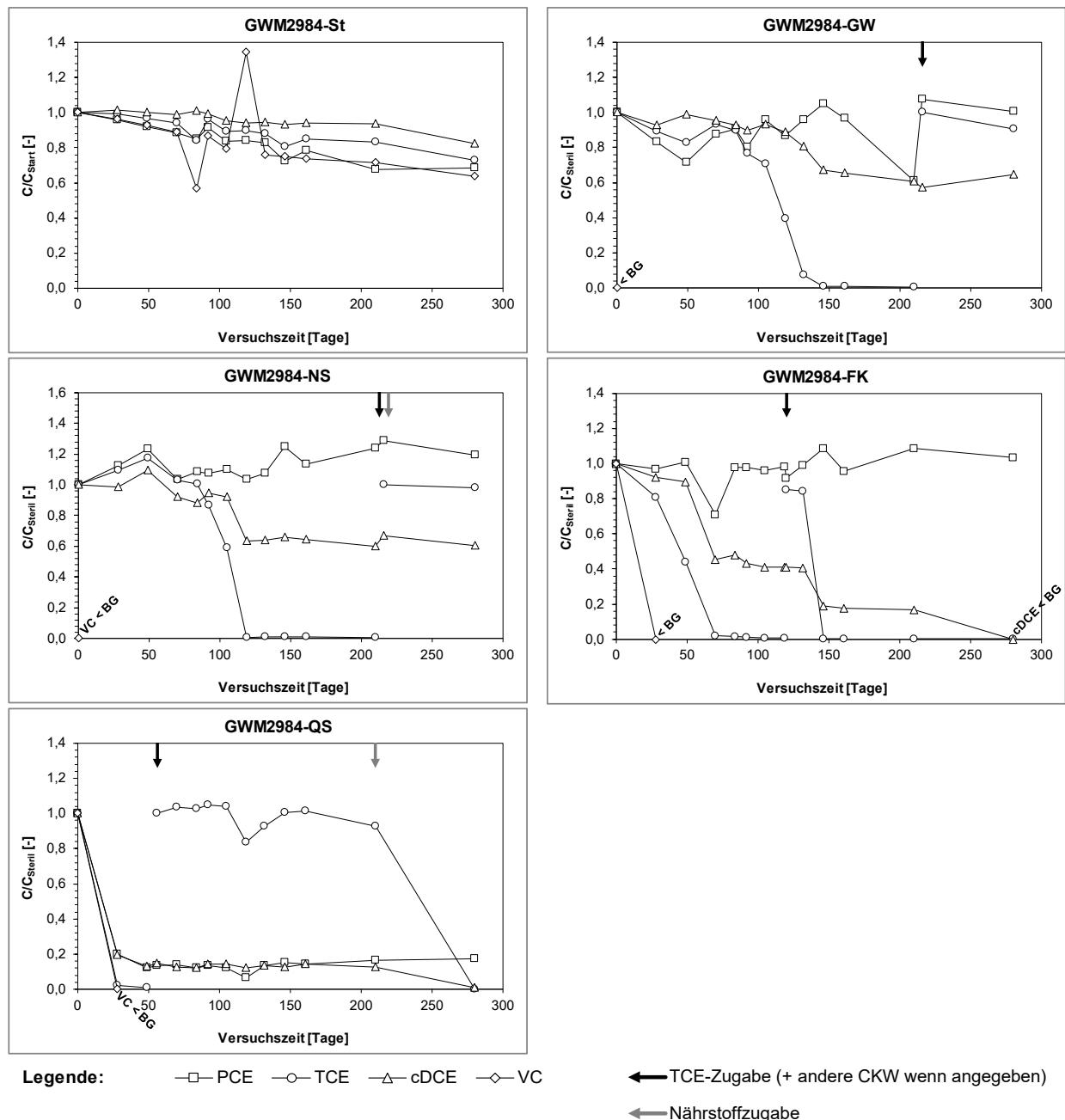


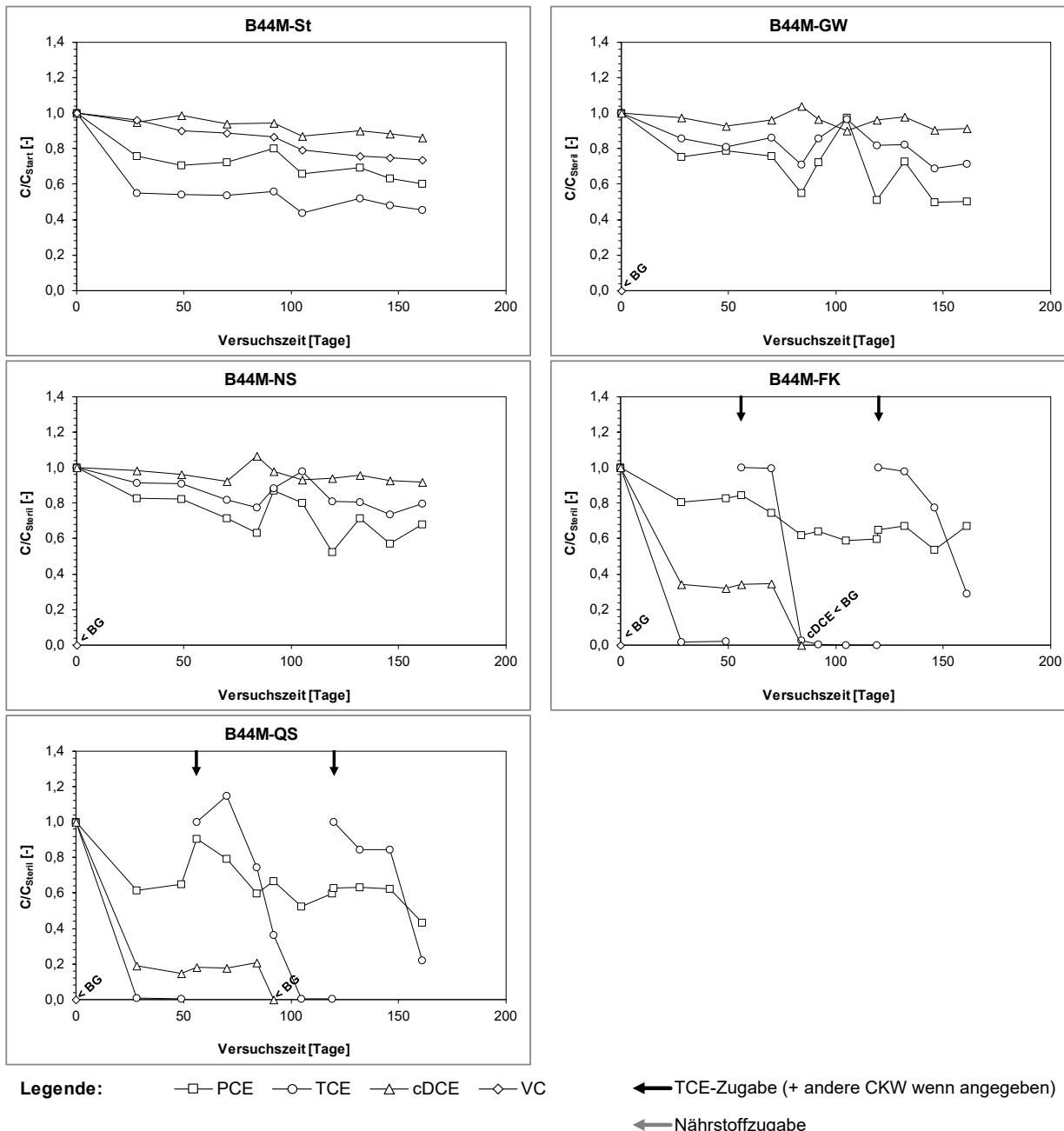


Standort 5:

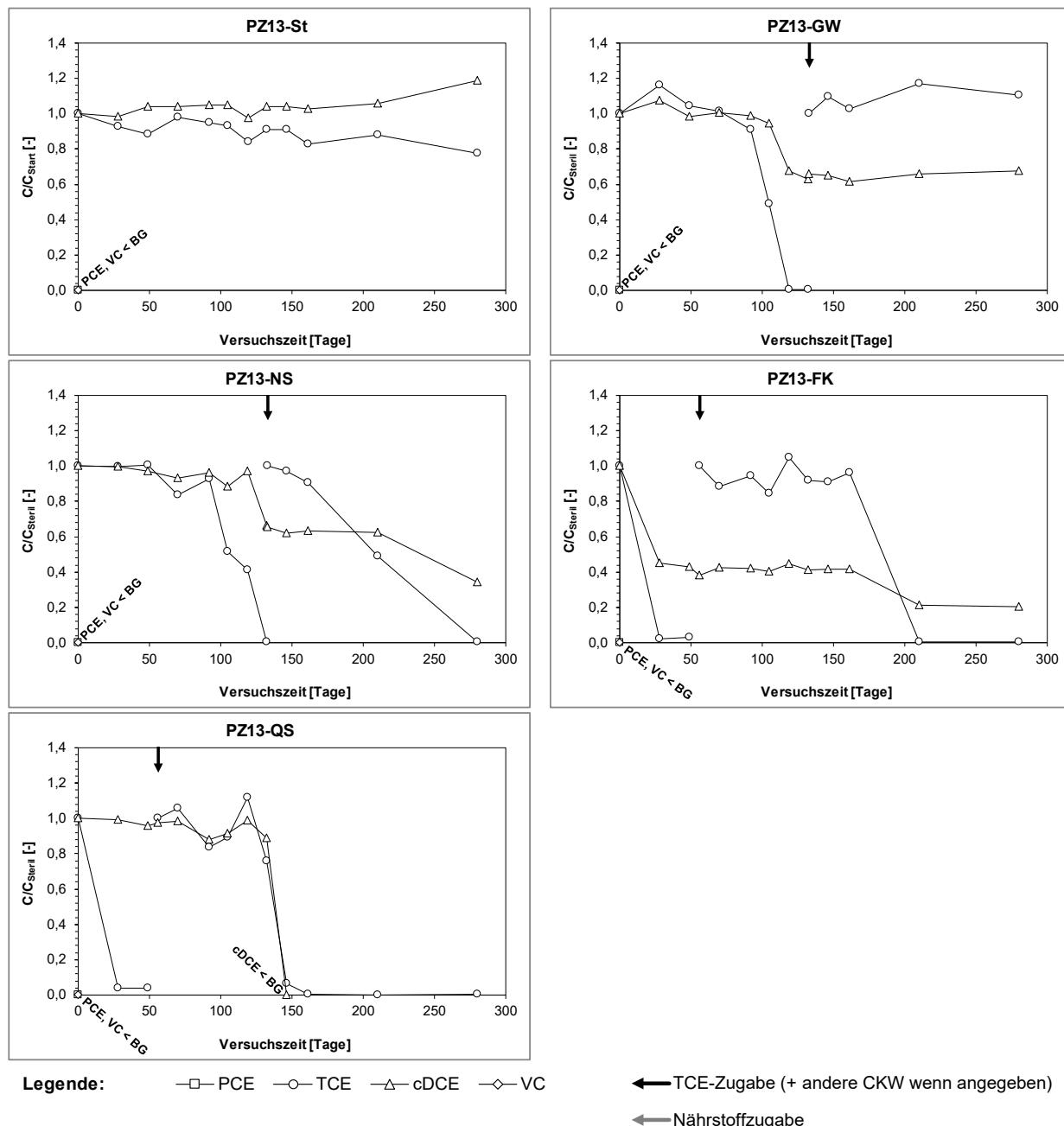






Standort 6:

Standort 7:



Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich vorliegende Dissertation selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die wörtlich und inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Dies gilt auch für bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Karlsruhe,

Ort und Datum

Unterschrift (Anna Willmann)