

Innovationen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung - InnoBLA

Konsolidierter Schlussbericht 01.08.2020 – 15.02.2023



Lehrstuhl für Allgemeine und Analytische Chemie



Gefördert von:

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Leoben, 15. Dezember 2023

Impressum

Autorinnen und Autoren: Daniel Vollprecht, Julia Kern, Theresa Sattler, Philipp Sedlazeck, Iris Berrer, Florian Feucht, Harald Raupenstrauch, Christoph Spijker, Robert Scholger, Eva Caspari, Gregor Mori, Jessica Riedl, Andreas Schönberg, Katharina Plessl, Gernot Beutle, Martin Bittens

Gesamtumsetzung: Daniel Vollprecht

Fotonachweis: Cajetan Perwein

Stand: 15. Dezember 2023

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundeskanzleramtes und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Vorwort

Ziel des Forschungsprojekts InnoBLA (gefördert im Rahmen des Programms „Altlastenforschung“ unter der Projektnummer B920029) ist die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Aufheizung von Böden durch elektrisch beheizte Wärmequellen/Heizlanzen (Thermal Conductive Heating, TCH) für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung.

Dieser Endbericht stellt die im Zeitraum 01.08.2020 – 15.02.2023 durchgeführten Tätigkeiten und erzielten Ergebnisse des Projektes InnoBLA dar und konsolidiert die folgenden bereits vorgelegten Berichte:

- 1. Zwischenbericht vom 23.09.2021
- Nachreichung vom 26.11.2022
- 2. Zwischenbericht vom 27.02.2023
- (Vorläufiger) Schlussbericht vom 15.04.2023

Das Projekt wurde von einem Konsortium aus GM Remediation Systems GmbH (GMRS, Koordinator), S-PEC e.U. und Montanuniversität Leoben (MUL, mit den Lehrstühlen für Thermoprozesstechnik (TPT), Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW), Allgemeine und Analytische Chemie (AAC) und Angewandte Geophysik (GEO)) durchgeführt.

Inhalt

Impressum	2
Vorwort.....	3
Inhalt.....	4
1 Projektziel	8
1.1 Ausgangslage	8
1.2 Technisch-wissenschaftliche Fragestellungen.....	8
2 Materialstudien.....	10
2.1 Modellierung des Umfelds der Heizlanzen	10
2.1.1 Laboruntersuchungen der Materialdaten für die Modellierung	10
2.1.2 Detailliertes Modell	18
2.1.3 Modellierung der Versuche - Versuch 1	21
2.1.4 Modellierung der Versuche - Versuch 2	37
2.1.5 Modellierung der Versuche - Versuch 3	45
2.1.6 Modell für das Planungstool	73
2.2 Optimierung des Lanzenmaterials für den Betrieb bei hohen Temperaturen in der ungesättigten Bodenzone	79
2.2.1 Untersuchung eines Hüllrohres aus dem Realbetrieb einer Heizlanze	79
2.2.2 Stereomikroskopische Untersuchung des Oberflächenangriffs	81
2.2.3 Lichtmikroskopische Untersuchung des Oberflächenangriffs	83
2.2.4 Elektronenmikroskopische Untersuchung.....	86
2.2.5 Röntgenfluoreszenzanalyse der Korrosionsprodukte	90
2.2.6 Zusammenfassung.....	91
2.2.7 Materialauswahl.....	92
2.2.8 Anfertigung ausgewählter Materialien aufgrund der Testergebnisse	95
2.3 Verbesserung des Wärmeübergangs im Ringspalt zwischen Heizlanze und Bodenkörper.....	96
2.3.1 Bestimmung des Wärmeübergangs	96
2.3.2 Resultate Laborversuch 1.....	99
2.3.3 Resultate Laborversuch 2.....	106
2.3.4 Resultate Laborversuch 3.....	113
2.3.5 Versuchsaufbau und Resultate Laborversuch 4	119
2.3.6 Anmerkungen zu den Messergebnissen.....	128
2.3.7 Verbesserung des Wärmeübergangs.....	129
2.3.8 Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit von Böden	129

3 Neukonzeption eines Planungstools zur TCH	135
3.1 Entwicklung eines benutzerfreundlichen Planungstools zur Dimensionierung der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung	135
3.1.1 Entwicklung und Vorgehen	135
3.1.2 Aufbau und Struktur des Tools.....	136
3.1.3 Anwendung des Tools und Ergebnisse	141
3.1.4 Berechnung Fallbeispiel "Calculate Case"	148
3.1.5 Berechnungen für optimalen Abstand der Heizlanzen	158
3.1.6 Berechnungen mit dem „2-dim Example“	169
3.2 Erweiterung des Planungstools durch Integration der Simulation von Schadstofftransportprozessen	175
3.2.1 Konzept und Ansatz des Stofftransportes	175
3.2.2 Parameter für den Schadstofftransport	176
3.2.3 Transportmodell für den Schadstofftransport.....	180
3.2.4 Aufbau des Schadstofftransportmodells	181
3.2.5 Beispiel für den Schadstofftransport	183
4 Heizlanzenentwicklung.....	186
4.1 Versuchslanze zur segmentierten Temperatursteuerung.....	186
4.2 Versuchslanze zur Kombination von TCH mit gleichzeitiger Luftinjektion	188
4.3 Versuchslanze für den Schrägverbau	189
4.4 Feldversuche	190
4.4.1 Testfeldbetrieb	195
4.4.2 Temperaturdaten	196
4.4.3 Auswertung der Testfelddaten.....	207
4.5 Modellierung des Feldversuchs mit Luftinjektion	209
4.5.1 Modellbeschreibung	209
4.5.2 Strömung.....	209
4.5.3 Energieerhaltung	210
4.5.4 Stofferhaltung.....	210
4.5.5 Trocknung.....	211
4.5.6 Pyrolyse	211
4.5.7 Geometrie	211
4.5.8 Rechennetz.....	213
4.5.9 Randbedingungen.....	214
4.5.10 Simulationsergebnisse	215

5 Monitoring der Schwermetallmobilität bei der TCH	223
5.1 Mineralogie und Mobilität von Schwermetallen in kontaminierten Böden von Altlasten	223
15.1.1 Anforderungen an Probenahmestandorte	223
15.1.2 Probenahmeplanung	225
15.1.3 Auswahl der Probenahmestandorte	227
15.1.4 Probenahme	249
15.1.5 Untersuchungen zur Chemie, Mineralogie und Schwermetallmobilität.....	255
5.2 Mineralogie und Mobilität von Schwermetallen nach der thermischen Behandlung von Böden	262
15.2.1 Zweck der thermischen Behandlung	262
15.2.2 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung	262
15.2.3 Probencharakterisierung - Versuchsschema	263
5.3 Versuchsergebnisse nach thermischer Behandlung	266
5.4 Modellierung in LeachXS™ zur Vorhersage von Phasen in Böden	276
15.4.1 Zweck der Untersuchung in LeachXSTM.....	276
15.4.2 Modellierung in LeachXSTM	278
5.5 Ergebnisse der pH-abhängigen Eluatkonzentrationen, der Modellierungen in LeachXSTM und der Mikrosondenuntersuchungen.....	280
15.5.1 Altlast K29 BBU Miniumfabrik Saag.....	282
15.5.2 Altlast N82 Glanzstoff – Traisenau	304
15.5.3 Altlast ST30 Lederfabrik Schmidt.....	323
15.5.4 Altlast ST32 Halde Schrems.....	345
15.5.5 Probe Poschacher	364
15.5.6 Diskussion der Ergebnisse der pH-abhängigen Eluatkonzentrationen, der Modellierungen in LeachXS™ und der Mikrosondenuntersuchungen	383
6 Dissemination.....	387
6.1 Dissemination	387
7 Zusammenfassung.....	388
Materialstudien – Modellierung des Umfelds der Heizlanzen	389
Materialstudien – Optimierung des Lanzenmaterials.....	390
Materialstudien – Verbesserung des Wärmeübergangs.....	390
Neukonzeption eines Planungstools	391
Lanzenentwicklung	391
Feldversuche	393
Modellierung des Feldversuchs mit Luftinjektion.....	393
Monitoring der Schwermetallmobilität bei der TCH	394

8 Executive Summary	396
Material Studies - Modeling of the Area Surrounding the Heaters	397
Material Studies - Optimization of the Heater Material	397
Material Studies - Improving the Heat Transfer	398
Novel Concept for a Planning Tool	398
Development of Heaters.....	399
Field Tests.....	400
Modeling of the Field Test with Air Injection.....	400
Monitoring of the Heavy Metal Mobility during TCH.....	401
9 Finding/Ausblick.....	403
Tabellenverzeichnis.....	406
Abbildungsverzeichnis	408
Literaturverzeichnis	420
Abkürzungen.....	423

1 Projektziel

1.1 Ausgangslage

Die Aufheizung von Böden durch elektrisch betriebene Wärmequellen/Heizlanzen (Thermal Conductive Heating, TCH) zur Unterstützung der Bodenluftabsaugung bei der Sanierung von Schadensfällen in der gesättigten und ungesättigten Bodenzone zählt seit mehr als 10 Jahren zu den Standardtechnologien, wenn volatile und semi-volatile Schadstoffe aus dem Bodenkörper zu entfernen sind. Trotz der Vorteile gegenüber anderen Technologien wie bspw. *pump & treat* oder *in-situ* Oxidation im Hinblick auf Effizienz und vergleichsweise kurzen Sanierungszeiten stellt die TCH immer noch eine technologische Nische dar. Die Anzahl der Sanierungsprojekte, in denen die TCH zur Anwendung kam, ist daher gering. Als wesentliches Hemmnis für eine bessere Marktdurchdringung sind wirtschaftliche Aspekte zu nennen, da TCH-Sanierungen in der Regel mit hohen Investitions- und Energiekosten verbunden sind, so dass trotz der technischen Vorteile der TCH in der technisch-ökonomischen Bewertung von Sanierungsprojekten diese Technologie häufig nicht die erste Wahl ist.

1.2 Technisch-wissenschaftliche Fragestellungen

Das Forschungsprojekt "Innovationen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung – InnoBLA" adressiert die folgenden Fragestellungen mit dem Oberziel, die Wirtschaftlichkeit von TCH-Anwendungen zu verbessern.

Technische Ebene:

- Untersuchungen zum Wärmeübergang zwischen Heizlanze und Bodenkörper (Kap. 2);
- Optimierung des Heizlanzenmaterials (Kap. 2);
- Entwicklung von Algorithmen für ein Planungstool zum Wärme- und Stofftransport für die Optimierung des Layouts (Anzahl der Heizlanzen) bei der thermischen Sanierung von gesättigter und ungesättigter Bodenzone (Kap. 2 und 3);

- Entwicklung und Test von drei neuartige Heizlanzentypen (Kap. 4):
 - segmentierte Aufheizung des Bodenkörpers mit unterschiedlichen Temperaturen,
 - Lanzenkombination Wärme/Luftinjektion,
 - Lanze für den Schrägeinbau;
- Untersuchung der Mobilität von Schwermetallen vor und nach einer thermischen Behandlung von Böden (Kap. 5).

Planerische Ebene:

- Neukonzeption eines Planungstools für TCH-Sanierungen (Kap. 3).

Die Bearbeitung der o.g. wissenschaftlich-technischen Fragestellungen erfolgte im Rahmen von Laboruntersuchungen sowie von Technikumsversuchen. Im Rahmen von Feldversuchen wurden die neu entwickelten Lanzentypen auf ihre Funktionalität unter Realbedingungen getestet.

2 Materialstudien

2.1 Modellierung des Umfelds der Heizlanzen

Zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge im Bodenkörper wurden zwei unterschiedliche numerische Modelle verwendet. Das erste Modell basiert auf der Open-Source-Software OpenFOAM 2.4 (The OpenFOAM Foundation Ltd, 2015) und bildet über ein Mehrphasenmodell alle relevanten physikalischen und chemischen Vorgänge ab. Dieses Modell dient in erster Linie dazu, ein Detailverständnis für die Prozesse zu entwickeln. Das zweite Modell wurde als Tool für die Planung zukünftiger Sanierungsprojekte entwickelt. Bei diesem Modell liegt der Fokus auf einfache Handhabung und schnelle Rechenzeiten.

Des Weiteren wurden zwei Laboruntersuchungen durchgeführt, für die nicht kontaminiertes Erdreich der Firma Poschacher Kompost e.U. als Modellboden verwendet wurde:

- Laboruntersuchungen zur Bestimmung der für die Modellierung relevanten Materialdaten (Kap. 2.1.1);
- Laboruntersuchungen, bestehend aus 4 Versuchsreihen, zur Ermittlung des Temperaturverlaufs in einem mit einer Heizlanze erwärmten Bodenkörper für die Validierung der Modellierungsergebnisse. Die detaillierte Beschreibung des apparativen Aufbaus und der Versuchskonzeption mit den gemessenen Temperaturverläufen ist Kap. 2.3 zu entnehmen

2.1.1 Laboruntersuchungen der Materialdaten für die Modellierung

Das Bodenmaterial wurde in folgender Form für die Laborversuche verwendet:

- Feuchter Boden: Der Boden entspricht dem Anlieferungszustand.
- Getrockneter Boden: Dieser wurde bei 105 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

- Rückstand: Die organische Matrix des trockenen Bodens wurde in einem Laborofen in Luftatmosphäre bei 650 °C über 24 Stunden pyrolysiert bzw. oxidiert.

Grundlegende Materialparameter

Im Rahmen der Aufbereitung der Proben wurde die Volumen- und Massenabnahme des Bodenmaterials in jeweils 5 Messungen bestimmt. Auf Basis dieser Daten wurde anschließend die Schüttdichte, der Wasseranteil und der Gehalt an Organik ermittelt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 1 angeführt. Diese Parameter dienen als Startbedingungen für das detaillierte Modell.

Tabelle 1 Ermittelte grundlegende Materialparameter

	Feuchter Boden	Trockener Boden	Rückstand
Massenanteil Wasser	0,213 ± 0,003	0	0
Massenanteil Organik	0,052 ± 0,002	0,067 ± 0,003	0
Massenanteil mineralisch	0,735 ± 0,003	0,933 ± 0,003	1
Schüttdichte	1114 ± 1 kg/m ³	1048 ± 37 kg/m ³	1003 ± 26 kg/m ³
Volumen/Volumen feucht	1	0,82	0,87

Durchströmbarkeit

Zur Bestimmung der Durchströmbarkeit wurde eine bestehende Versuchsanordnung (Abbildung 1) verwendet. Anstelle der dargestellten Glaskugeln wurde der Boden eingebacht. Anschließend wurde ein definierter Volumenstrom an Druckluft vorgegeben und die Druckdifferenz über die Schüttung bestimmt. Diese Druckdifferenz über die Lehrrohrgeschwindigkeit ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Massen und Schütthöhen sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Abbildung 1 Darstellung der Versuchsapparatur zur Bestimmung der Durchströmbarkeit

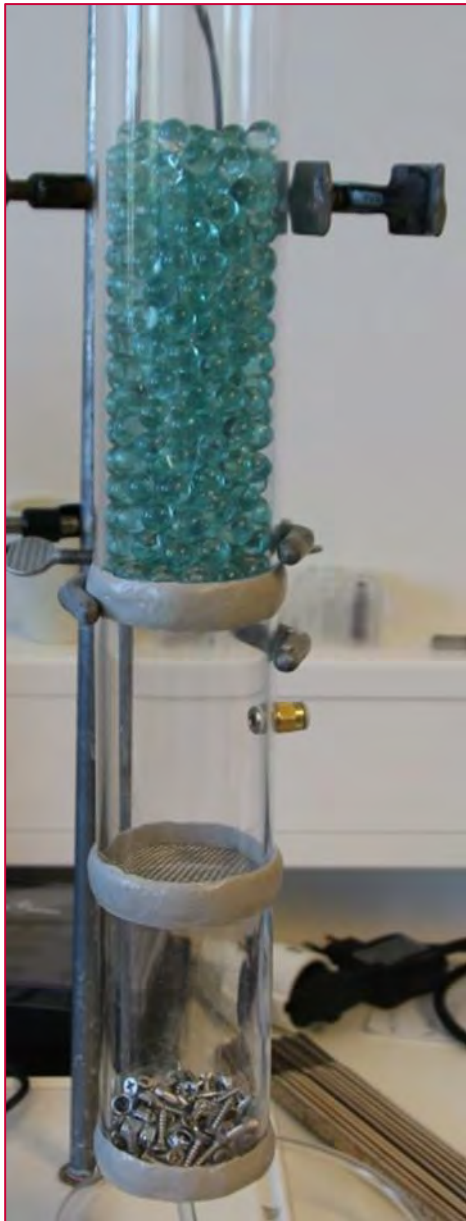
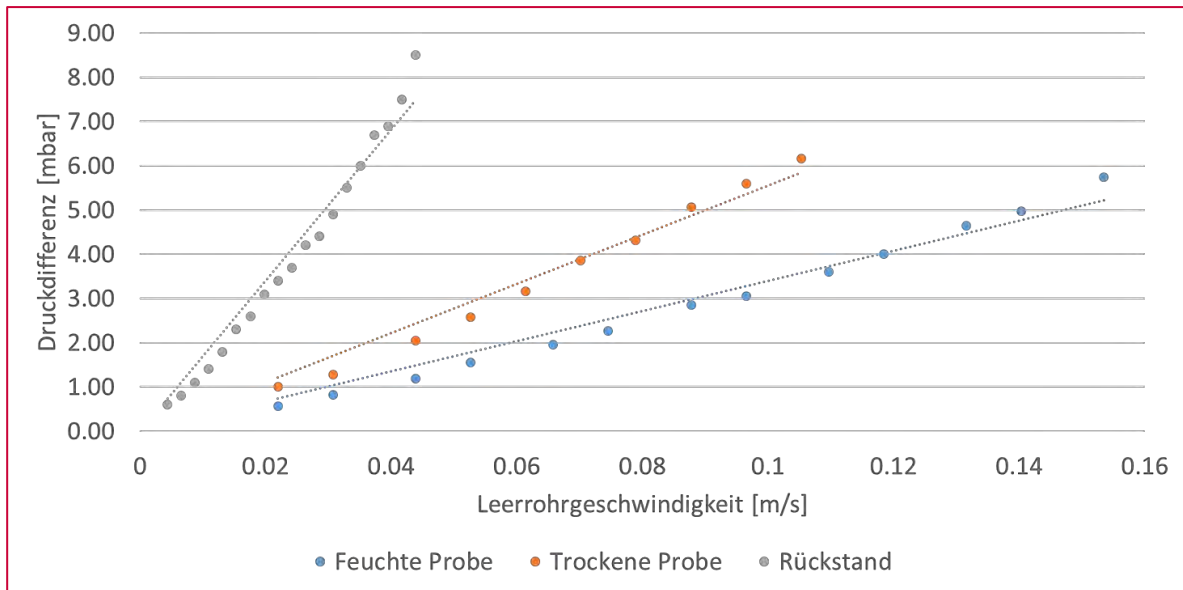


Tabelle 2 Daten der Versuche für die Messung der Durchströmbarkeit

	Einwaage	Schütthöhe	Volumenstrom	Leerrohrgeschwindigkeit
Feuchter Boden	278 g	115 mm	5-35 NL/min	0,02-0,154 m/s
Trockener Boden	238 g	100 mm	5-24 NL/min	0,02-0,105 m/s
Rückstand	256 g	90 mm	1-10 NL/min	0,004-0,044 m/s

Abbildung 2 Darstellung des Druckdifferenz über die Leerrohrgeschwindigkeit



Das detaillierte Modell verwendet einen quasistationären Strömungsansatz, bei welchem der Druckverlust auf der Darcy-Gleichung basiert. Unter der Annahme einer räumlich konstanten 1-dimensionalen Strömung, ohne Einfluss der Schwerkraft, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\eta F U = -\text{grad}(p)$$

Hierbei wurde der Druckverlustparameter F anhand der Steigung in Abbildung 2 bestimmt. Dieser beträgt für den feuchten Boden $1,68 \cdot 10^9 \text{ 1/m}^2$, für den trockenen Boden $3,22 \cdot 10^9 \text{ 1/m}^2$ und für den Rückstand $9,65 \cdot 10^9 \text{ 1/m}^2$. Da nur eine Messung an diesen drei Punkten möglich war, interpoliert das Modell, je nach Feuchte und Organikanteil zwischen den Punkten linear.

Wärmeleitfähigkeit

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde der in Abbildung 3 dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Dieser bestand aus einer Heizplatte, welche konstant mit $40 \text{ }^\circ\text{C}$ betrieben wurde. Auf dieser befand sich ein Metallring mit 200 mm Durchmesser, welcher eine 45 mm hohe Schüttung der Probe beinhaltete. An der Kontaktfläche zwischen Heizplatte und Probe, so wie an der Oberfläche der Probe befand sich je ein Thermoelement des Typs K. Auf der Probe lag eine Metallplatte mit einer Stärke von 10 mm, welche zur Befestigung der Messzelle des Wärmeflussmessgeräts Showa Denko

HFM-MR diene. Um den radial abfließenden Wärmestrom zu minimieren, wurde der Aufbau mit Keramikfasermatten isoliert. Nach Erreichen des stationären Zustands, der sich durch zeitlich konstante Temperaturen der Thermoelemente auszeichnet, kann die Wärmeleitfähigkeit durch folgende Beziehung ermittelt werden:

$$\lambda = \frac{\dot{Q} * h}{T_1 - T_2}$$

Dieser Versuch wurde je Probe dreimal durchgeführt. Hierbei beträgt die Wärmeleitfähigkeit des feuchten Bodens $0,24 \pm 0,05$ W/mK, jene des trockenen Bodens $0,08 \pm 0,03$ W/mK und die des Rückstandes $0,06 \pm 0,02$ W/mK. Diese Werte werden je nach je nach Feuchte und Organikanteil vom detaillierten Modell linear interpoliert.

Abbildung 3 Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit



Pyrolysekinetik

Aufgrund des geringen Massenanteils an organischer Substanz von $0,052 \pm 0,002$ im Boden spielt die Pyrolyse eine untergeordnete Rolle. Dennoch muss diese berücksichtigt werden, um die Änderung der Stoffeigenschaften beschreiben zu können. Kittinger (2021) führt für den im detaillierten Modell betrachteten Boden eine thermogravimetrische Analyse mit einer Aufheizrate von 30K/min durch. Der Verlauf der relativen Trockenmasse ist in Abbildung 4 dargestellt. Hierbei beschreibt der Kurvenverlauf für die relative Trockenmasse > 1 die Trocknung und für die relative Trockenmasse ≤ 1 die Pyrolyse.

Abbildung 4 Relativen Trockenmasse des Bodens als Funktion der Temperatur

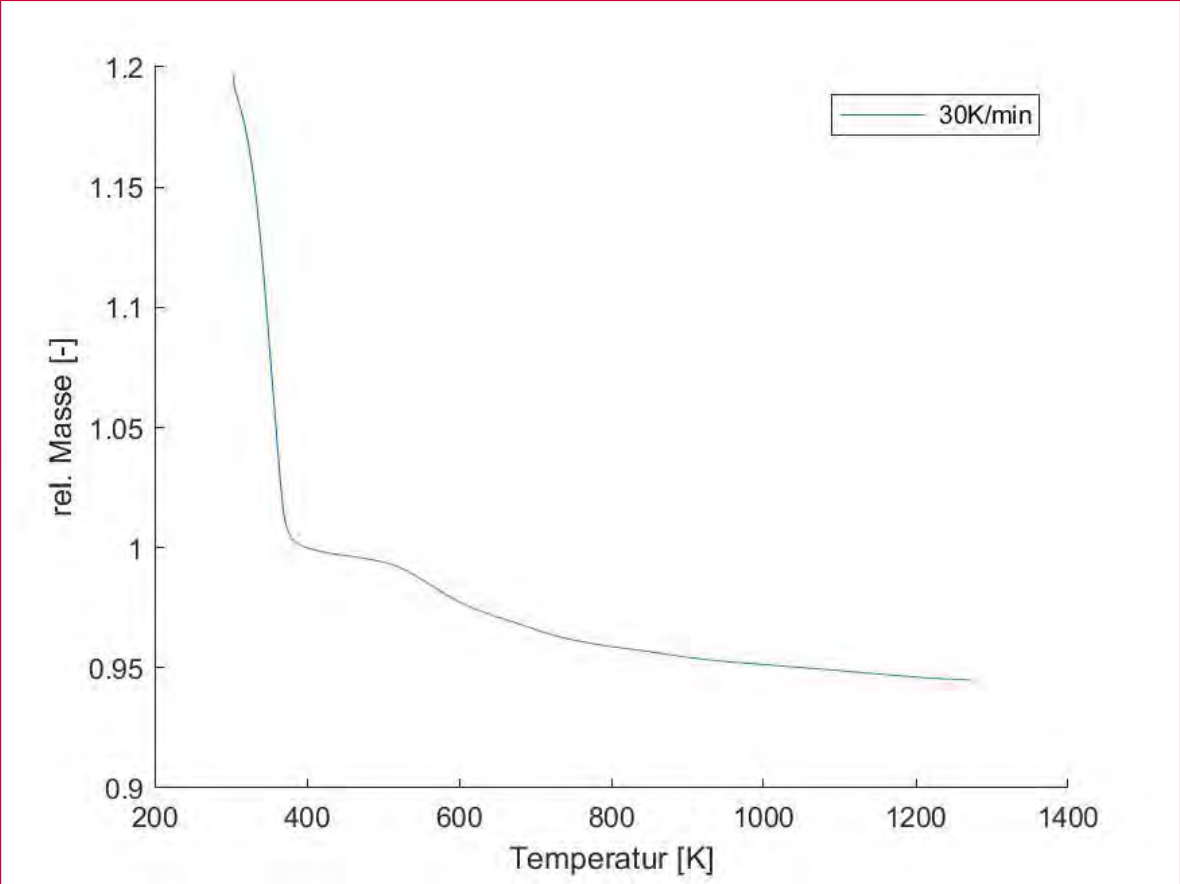
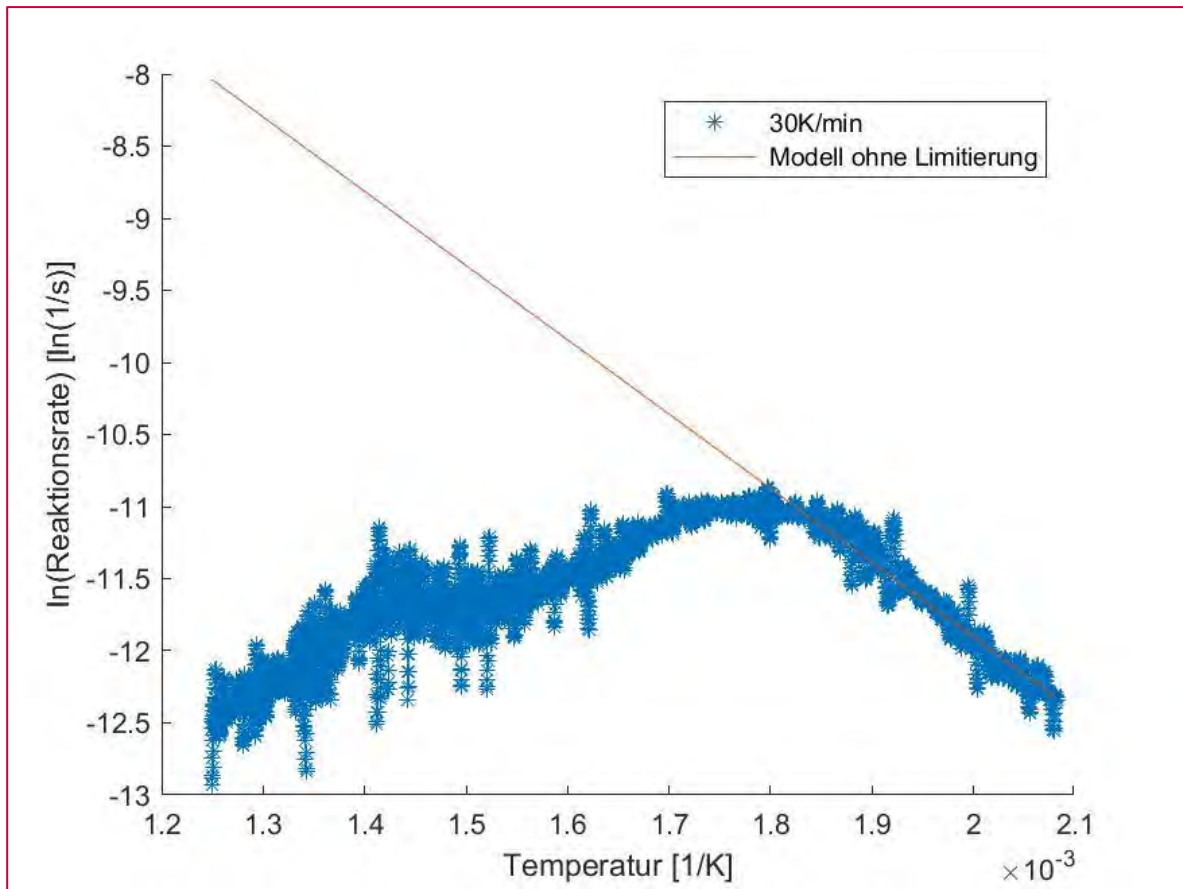


Abbildung 5 Arrhenius Diagramm der Pyrolyse.



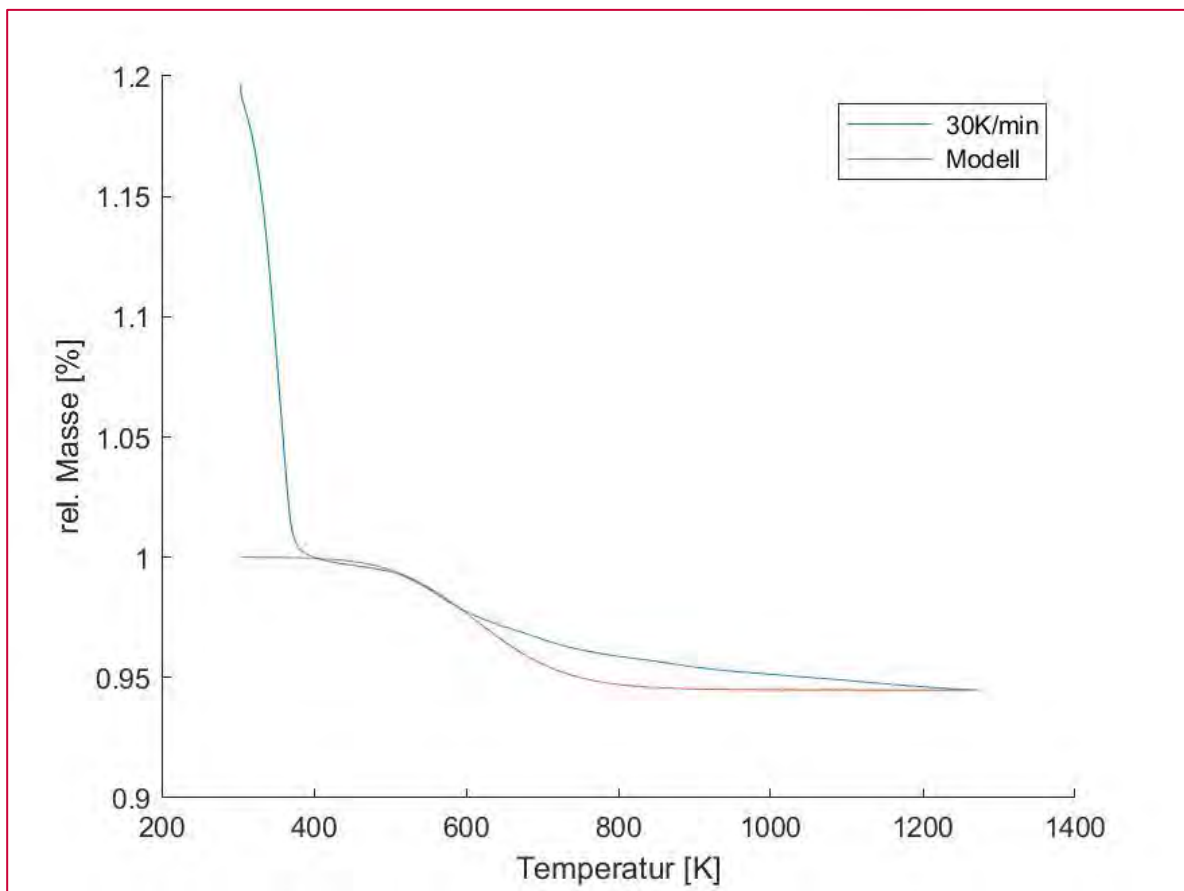
Die Regression wurde zwischen 470 K und 530 K durchgeführt, um den Einfluss der Umsatzlimitierung zu minimieren

Durch eine symmetrische lokale Polynomapproximation, welche 5 Messwerte beinhaltet, wurde die erste zeitliche numerische Ableitung gebildet, welche die Reaktionsrate rr darstellt. Auf Basis dieser wurde ein Arrhenius-Diagramm erstellt (Abbildung 5). Dieses stellt den Logarithmus der Reaktionsrate über den Kehrwert der Temperatur da. Für die linear ansteigenden Werte zwischen 470 K und 530 K wurde eine lineare Regression vorgenommen. Hieraus ergibt sich der Frequenzfaktor A mit 213 1/s und die Aktivierungstemperatur T_b mit 4.383 K. Um das Abnehmen der Reaktionsrate mit zunehmendem Reaktionsumsatz zu beschreiben, wurde der Arrheniusansatz wie folgt erweitert:

$$rr = A e^{-\frac{T_b}{T}} \left(\frac{m - m_{max}}{1 - m_{max}} \right)^n$$

Hierbei stellt m die aktuelle relative Masse und m_{\max} die relative Masse bei vollständiger Pyrolyse mit 0,945 da. Der Exponent n wurde mittels der Gesamtheit der Messdaten durch eine numerische Ausgleichsrechnung mit 1,298 bestimmt. Zur Verifikation dieser Daten wurde ein 0-dimensionales Reaktormodell erstellt. Abbildung 6 zeigt die Gegenüberstellung der Masseabnahme zwischen der Messung und dem Reaktormodell, ohne Trocknung. Das Modell beschreibt den Abbau der Organik etwas schneller als die Messung, ist jedoch für das Detailmodell ausreichend.

Abbildung 6 Vergleich der Abnahme der relativen Masse zwischen der Messung und dem Kinetikmodell



2.1.2 Detailliertes Modell

Modellbeschreibung Boden

Das detaillierte Modell wurde auf Basis von OpenFOAM 2.4 (The OpenFOAM Foundation Ltd., 2015) erstellt. Hierbei dient das Einzelpartikelmodell von Spijker (2015) als Grundlage. Dieses beschreibt ein reaktives Festbett mittels einer Euler Fluidphase und einer Euler Feststoffphase. Im Gegensatz zum Modell von Spijker (2015) kommt jedoch eine Energieerhaltungsgleichung pro Phase zum Einsatz. Das Strömungsfeld wird quasistationär über den SIMPLE Algorithmus (Caretto et al., 1972) beschrieben. Auch erfolgt eine Anpassung sämtlicher Submodelle für die Stoffeigenschaften.

Strömung

Um die Rechenzeit maßgeblich zu reduzieren, wurde für die Strömung ein quasistationärer Ansatz gewählt. Dieser ermöglicht an sich beliebig große Zeitschritte des Strömungsfeldes, jedoch limitieren die konvektiven Terme anderer Gleichungen (Energieerhaltung, Stoffhaltung) die Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl. Diese ist jedoch um den Faktor 6 höher und resultiert in einem Sechstel der Rechenzeit. Der Nachteil dieses Ansatzes ist, dass transiente Beschleunigungseffekte ignoriert werden, die jedoch für die Betrachtung des Bodens vernachlässigbar klein sind. Die Impulserhaltungsgleichung basiert auf dem Widerstandsterm nach Darcy (1856) und beinhaltet Schwerkrafteffekte, sodass sich folgende Formulierung ergibt:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \rho \vec{u} \vec{u}) + \mu_{mix} F \vec{u} - \varepsilon \rho g = -\operatorname{grad}(p) \varepsilon$$

Die Kontinuitätsgleichung der Gasphase beinhaltet neben der Korrektur für das Lückenvolumen ε einen Quellterm für den Massentransport der heterogenen Reaktionen Q_{mass} .

$$\operatorname{div}(\varepsilon \rho \vec{u}) = Q_{mass}$$

Der Abgleich zwischen der Impulserhaltung und der Kontinuitätsgleichung erfolgt semiimplizit über den SIMPLE Algorithmus (Caretto et al., 1972).

Energieerhaltung

Die Energieerhaltung für beide Phasen erfolgt transient, wobei die Wärme der Trocknung und Kondensation der Festphase zugerechnet wird. Zugleich erfolgt ein Wärmeübertrag zwischen den beiden Phasen. Dieser wird durch den Wärmeübergangskoeffizient nach Gunn (1978) $\alpha_{g,D}$ sowie der volumenspezifischen Fläche A_V beschrieben. Hierdurch ergibt sich folgende Gleichung für die Energieerhaltung der Festphase:

$$\frac{\partial(\rho_s T_s c p_s)}{\partial t} - \operatorname{div} \left[\frac{\lambda_b}{\rho c p_g} \operatorname{grad}(T_b) \right] = \alpha_{g,p} A_V (T_g - T_s) + r r_{H_2O} H_{Verd}$$

Für die Gasphase wird des Weiteren der konvektive Wärmetransport berücksichtigt. Damit ergibt sich folgende Gleichung:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho T_g c p_g)}{\partial t} + \operatorname{div}(\varepsilon \rho \vec{u} T_g c p_g) - \operatorname{div} \left[\varepsilon \frac{\lambda_{Eff}}{\rho c p_g} \operatorname{grad}(T_g) \right] = +\alpha_{g,D} A_V (T_s - T_g)$$

Stoffhaltung

Die Stoffhaltungsgleichung der Gasphase wird transient unter Berücksichtigung des Lückenvolumens gelöst. Diese beinhaltet den konvektiven und diffusiven Transport sowie die Quellterme für die heterogenen Reaktionen.

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_g Y_i)}{\partial t} = -\operatorname{div}(\varepsilon \vec{u} \rho_g Y_i) + \operatorname{div}[\varepsilon \rho_g D(T)^{Eff}_{mix,i} \operatorname{grad}(Y_i)] + r r_i$$

Diese Gleichung wird für Sauerstoff, Wasserdampf, Methan und Kohlendioxide gelöst. Der Massenanteil an Stickstoff ergibt sich durch die Kontinuitätsgleichung. Für die Festphase wird nur der Stoffhalt von flüssigem Wasser und der Organik berücksichtigt.

$$\frac{\partial(X_i)}{\partial t} = -r r_i$$

Trocknung

Um die Reaktionsrate der Trocknung und Kondensation zu beschreiben, wurde der Ansatz über die die Abweichung vom Sättigungsdampfdruck gewählt, welcher über die

Antoinegleichung beschrieben wird. Die Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten β erfolgt nach der Beziehung von Obot (2010):

$$rr_{H_2O} = A_v \beta \left(\frac{p^* M_{H_2O}}{RT} - Y_{H_2O} \rho_g \right)$$

Pyrolyse

Die Berechnung der Reaktionsraten der Pyrolyse basiert auf dem erweiterten Arrhenius-Ansatz der thermogravimetrischen Analyse. Jedoch erfolgt die Limitierung direkt über den Massenanteil der Organik. Als Bezugstemperatur wird die Temperatur der Festphase T_s verwendet.

$$rr = A e^{-\frac{T_b}{T_s}} \left(\frac{X_{org}}{X_{org,start}} \right)^n$$

Beim ersten Versuch wurde in der Abgasmessung Kohlendioxid und Methan detektiert, jedoch kein Kohlenmonoxid. Dies entspricht der Gleichgewichtszusammensetzung, welche aus 0,753 Massenprozent Kohlenmonoxid und 0,247 Massenprozent Methan besteht.

Modellbeschreibung Zustellung

Um die Feuerfestzustellung zu beschreiben, wurde das Model des Bodens mit den Feststoffgleichungen des OpenFOAM Solver (OpenFOAM, 2015) kombiniert, welches die transiente Wärmeleitungsgleichung löst. Daraus ergibt sich ein Mehrzonenmodell, wobei jede Zone einen unterschiedlichen physikalischen Vorgang beschreibt. Diese sind lediglich über die Temperatur an den Grenzflächen gekoppelt. Die verwendeten Stoffwerte sind in Tabelle 3 angeführt.

Tabelle 3 Daten für die Wärmeleitung

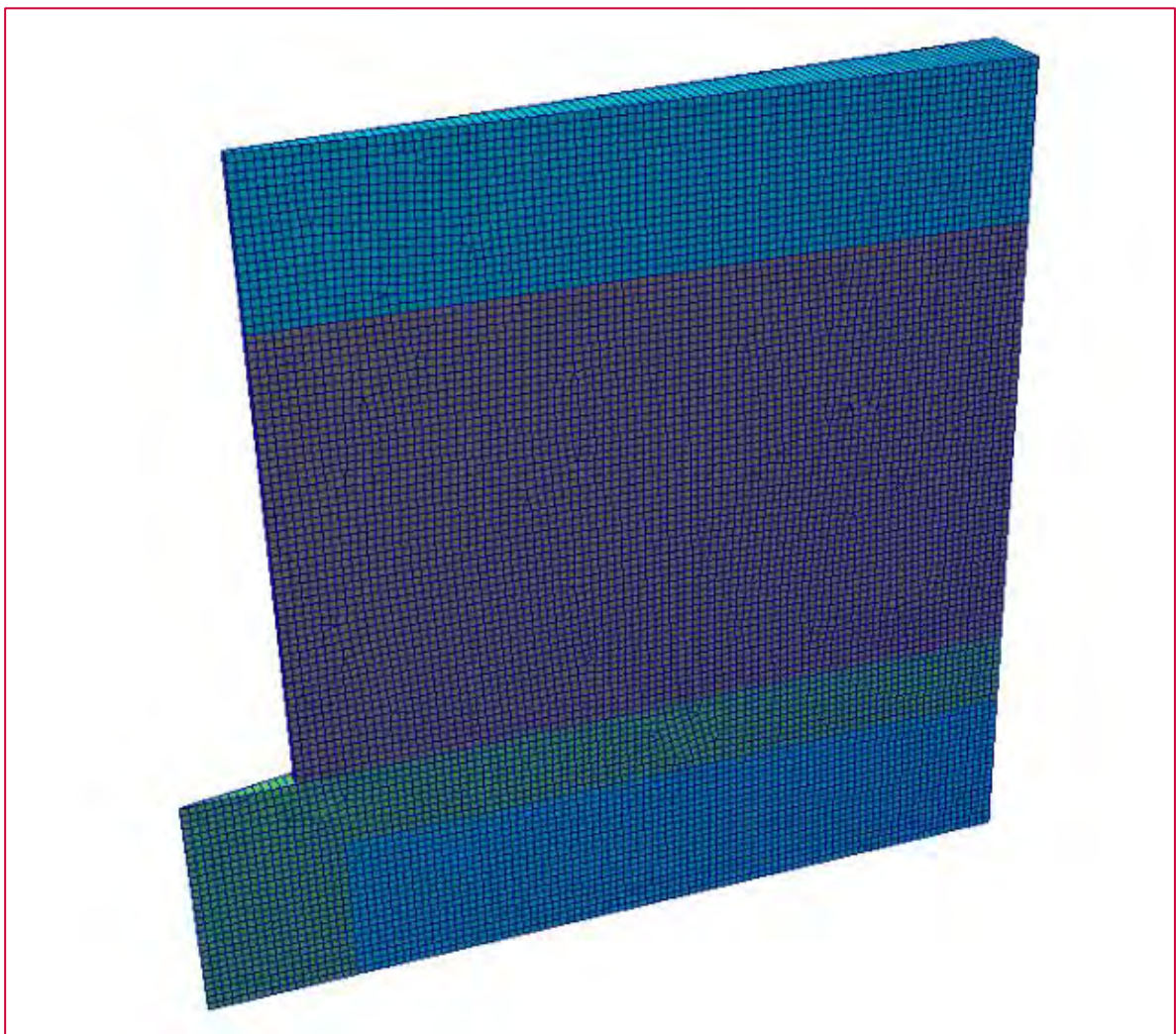
	Wärmeleitfähigkeit	Wärmekapazität	Dichte
Leichtzustellung	0,14 W/mK g	1.001 J/kgK	2.100 kg/m ³
Gussmasse	1,73 W/mK g	1.140 J/kgK	15 kg/m ³

2.1.3 Modellierung der Versuche - Versuch 1

Das Rechnetz für die Modellierung (Abbildung 7) beschreibt den Versuch radialsymmetrisch über einen „Wedge“. Dieses besteht aus drei Regionen:

- 1.) dem Boden, in Abbildung 7 braun dargestellt. Dieser wurde mit 5.482 Hexaeder Volumen aufgelöst,
- 2.) der feuerfeste Beton, grün dargestellt, der über 1.556 Hexaeder abgebildet wird,
- 3.) der Leichtzustellung, die aus 3.684 Hexaedern besteht und blau dargestellt ist.

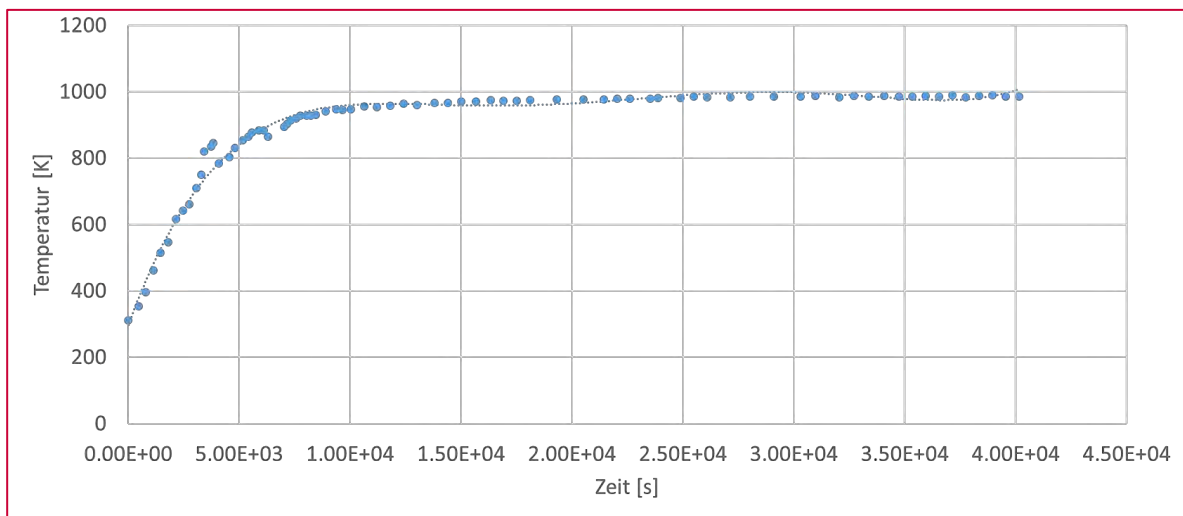
Abbildung 7 Struktur des Rechnetzes



Die Regionen sind farblich gekennzeichnet: Boden = braun, feuerfester Beton= grün, Leichtzustellung = blau.

Die Temperatur der Lanze wurde im Modell durch ein Polynom vorgegeben, welches auf den Messdaten des Versuchs basiert (Abbildung 8). Der äußere Stahlmantel im Versuch ist wassergekühlt, daher wurde dessen Temperatur mit 283 K (10°C) fixiert. Die einzelnen Regionen sind thermisch gekoppelt, dies bedeutet, dass die Wärmestromdichte und die Temperatur an der Grenzfläche ident sind. Als Auslass für die Gase wurde die Zellreihe neben der Lanze an der Oberseite gewählt, da hier die Gase durch die Leichtzustellung austreten können.

Abbildung 8 Temperaturverlauf der Heizlanze, Versuch 1, sowie das Polynom, welches als Randbedingung für das Modell dient

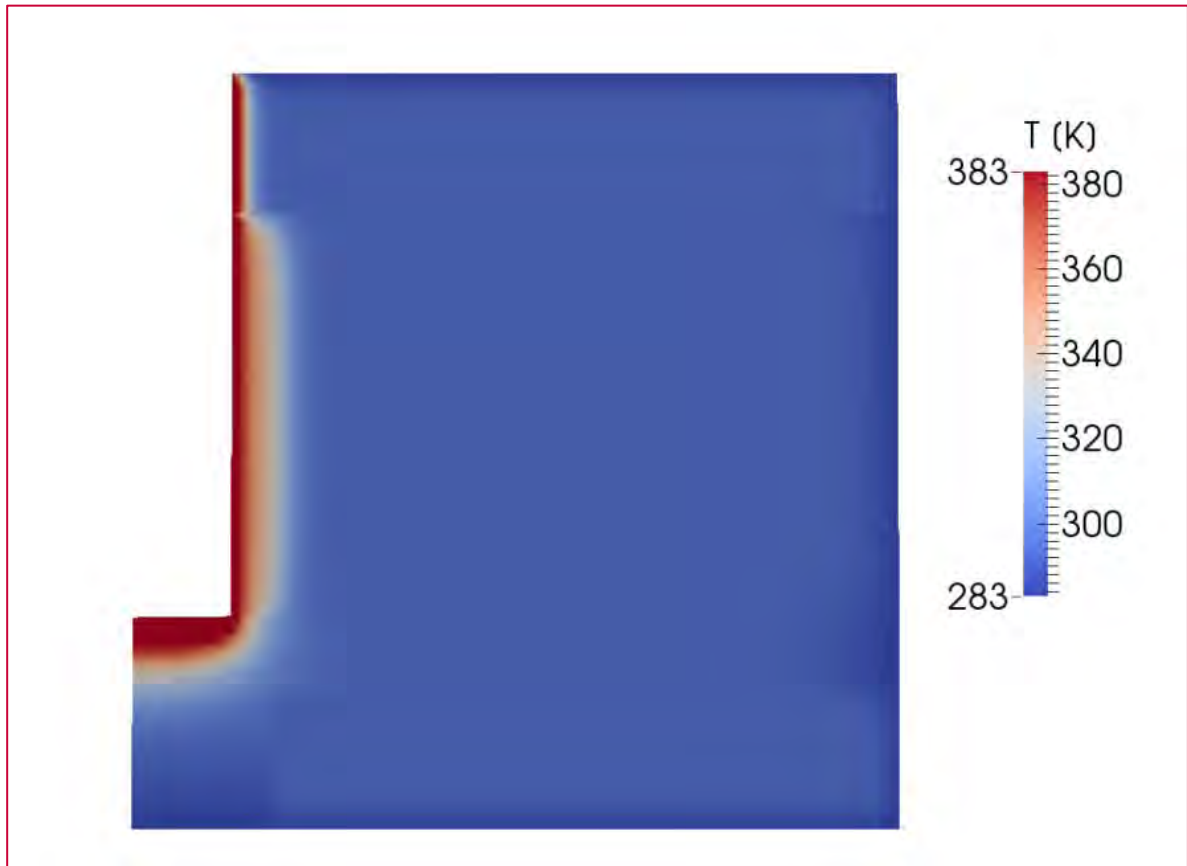


In den Abbildungen 9, 12 und 16 ist das Temperaturprofil zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Zu Beginn erwärmt sich der lanzennahe Bereich schnell, wobei die Verdunstung des Wassers diesen Prozess bremst. Da der trockene Boden im Modell eine Wärmeleitfähigkeit von lediglich 0,08 W/mK besitzt, wirkt dieser isolierend und verringert die Wärmestromdichte (Abbildung 11, Abbildung 15). Dies stellt den zuvor beobachteten Effekt des „Wärmeübergangs im Ringspalt“ dar. Diese isolierte Schicht nimmt mit zunehmender Trocknung zu, sodass der Prozess nur sehr langsam fortschreitet. Der Feuerfestbeton im Boden so wie die Leichtzustellung besitzen höhere Wärmeleitfähigkeiten als der trockene bzw. pyrolysierte Boden. Daher bilden sich an der Oberfläche und am Boden größere trockene Regionen aus (Abbildungen 10, 13, 17). Analog verhält sich der pyrolysierte Bereich (Abbildung 14, Abbildung 18). Durch die Pyrolyse fällt die Wärmeleitfähigkeit weiter auf 0,06 W/mK.

Der Durchmesser des getrockneten Bereichs im Modell beträgt 405 mm an der Oberfläche, während in den Laborversuchen (Kap. 2.3) 420 mm ermittelt wurden. Der

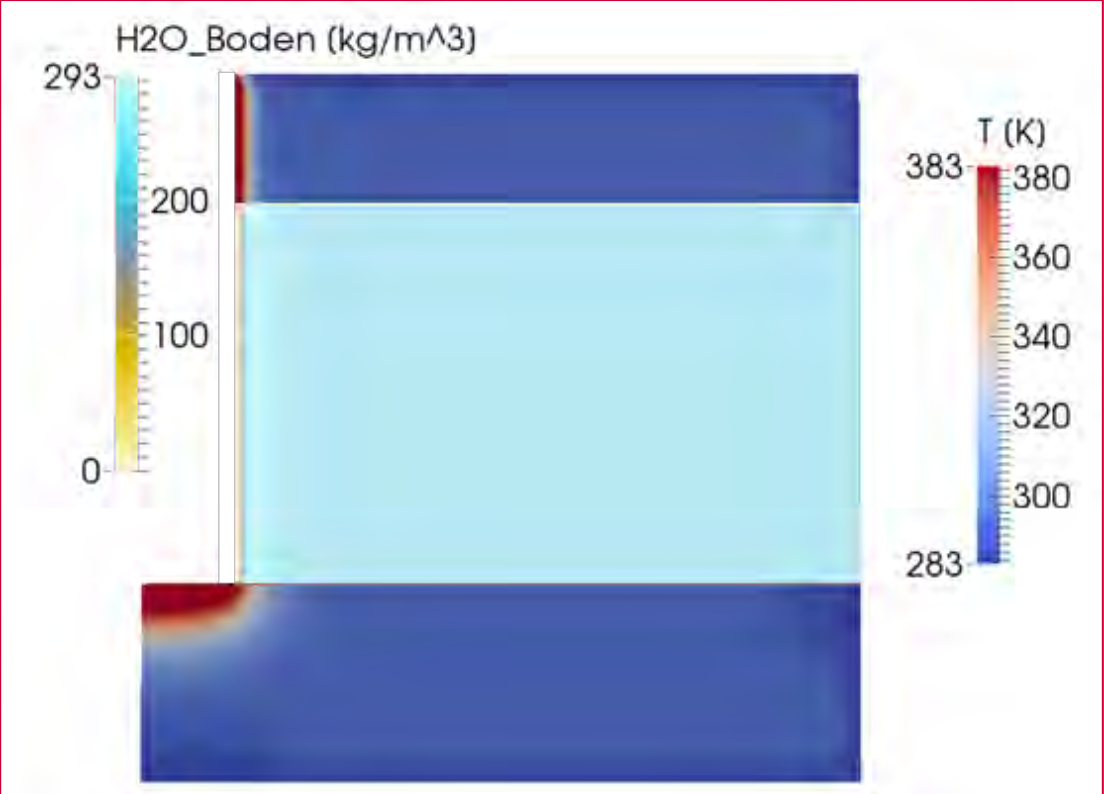
Bereich des Organik-Abbaus beginnt im Modell bei einem Durchmesser von 160 mm und bei einem Durchmesser von 390 mm liegt kein Abbau der Organik vor. Dieses Verhalten zeigt sich visuell auch in den Laborversuchen.

Abbildung 9 Temperaturfeld, Versuch 1 nach 22 Minuten



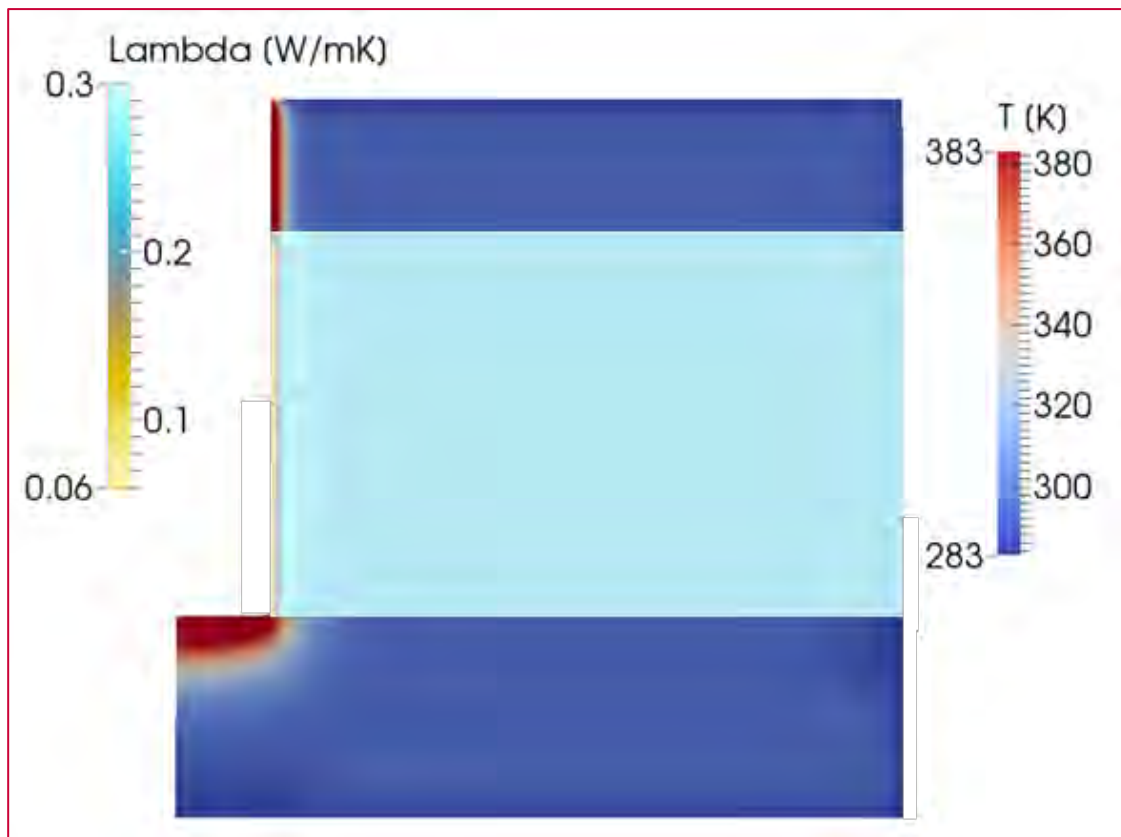
Die Temperatur hat die 100 °C-Marke in der ersten Zellreihe überschritten.

Abbildung 10 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 1 nach 22 Minuten



Die ersten Zellreihe ist komplett trocken.

Abbildung 11 Wärmeleitfähigkeit des Bodens, Versuch 1 nach 22 Minuten



Aufgrund des trockenen Bodens sinkt die Wärmeleitfähigkeit und eine Isolationsschicht baut sich auf.

Abbildung 12 Temperaturfeld, Versuch 1 nach 333 Minuten

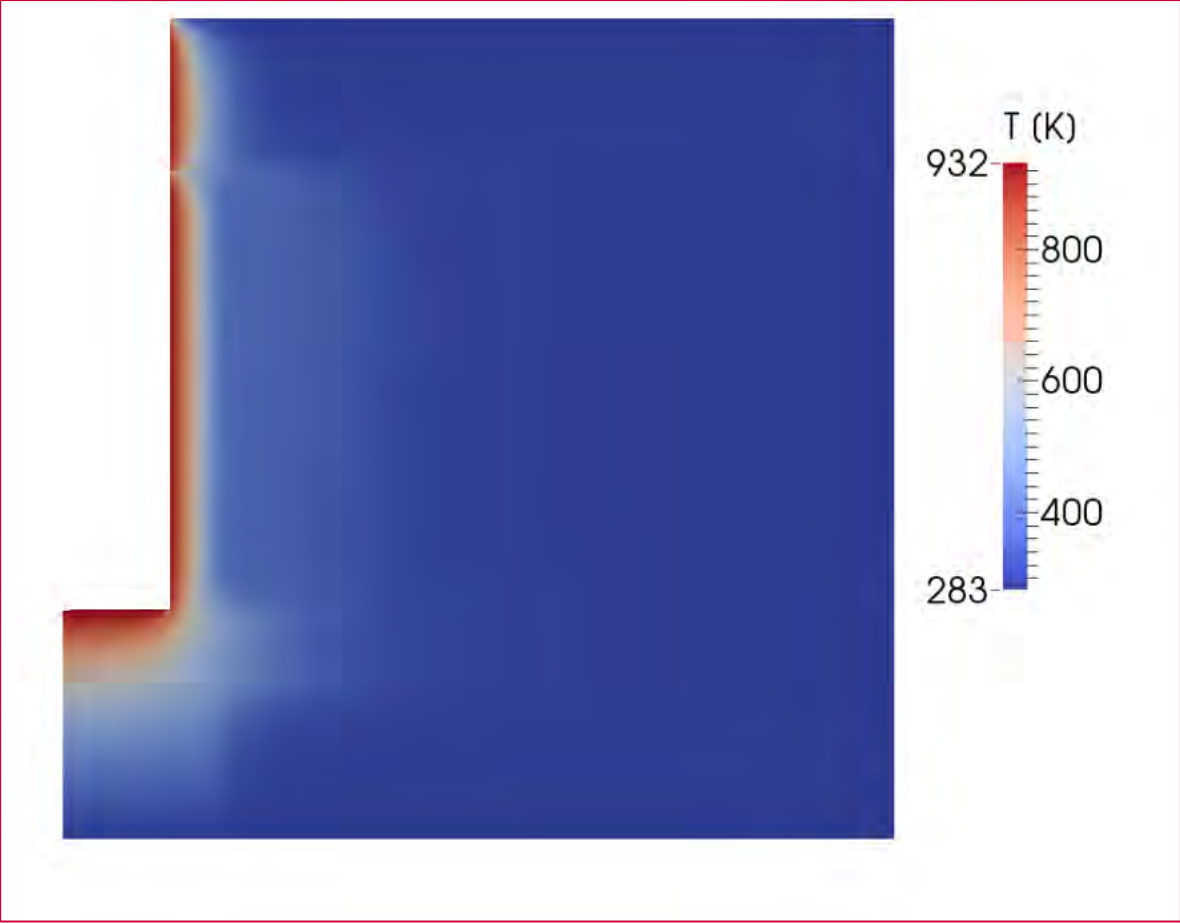
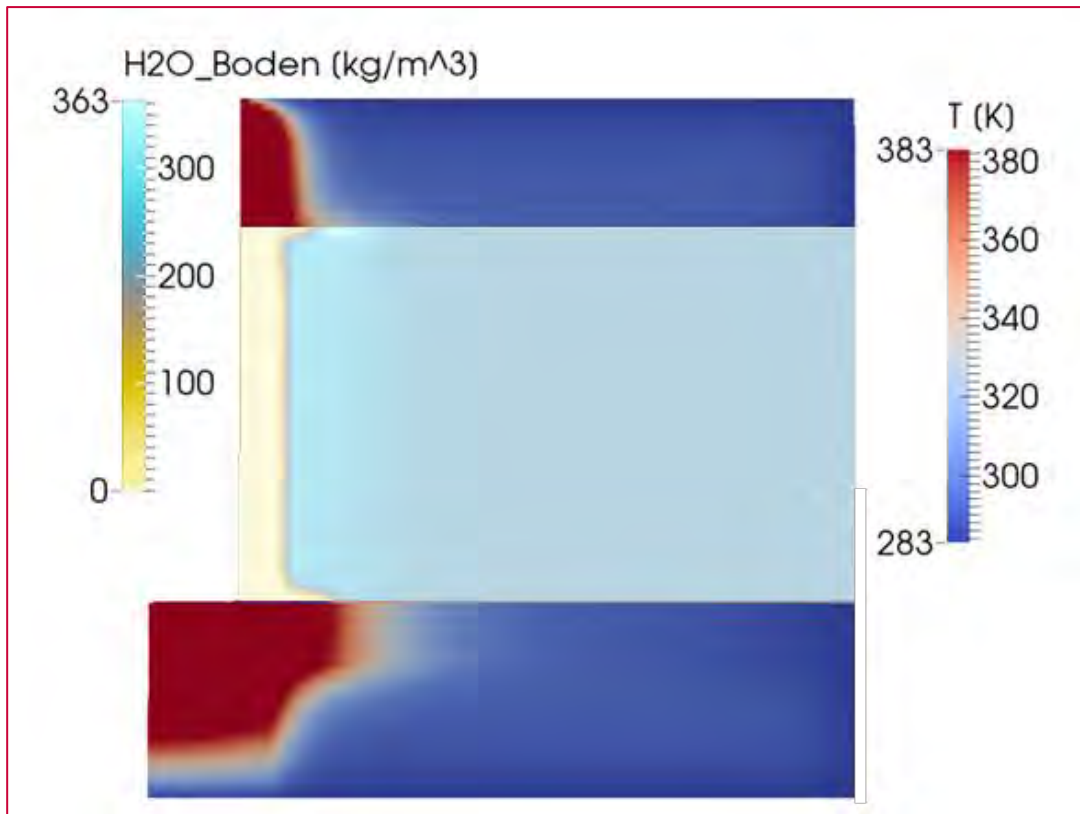
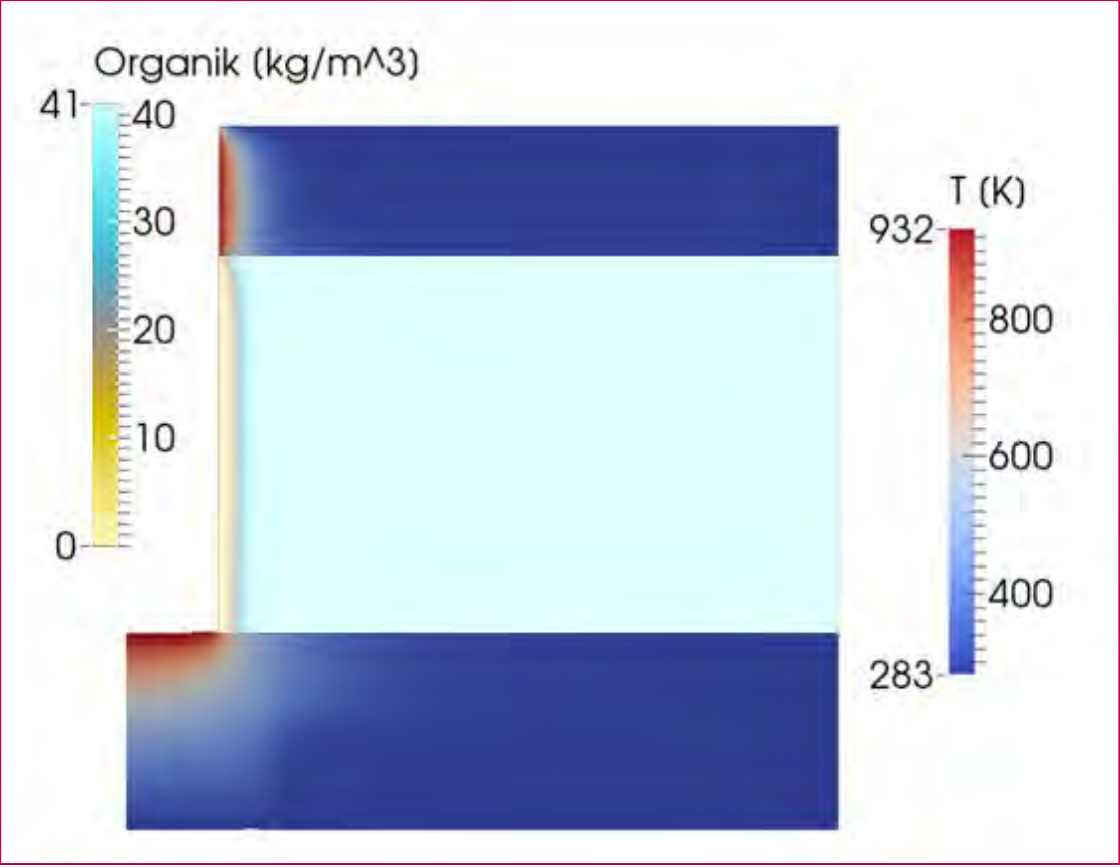


Abbildung 13 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 1 nach 333 Minuten



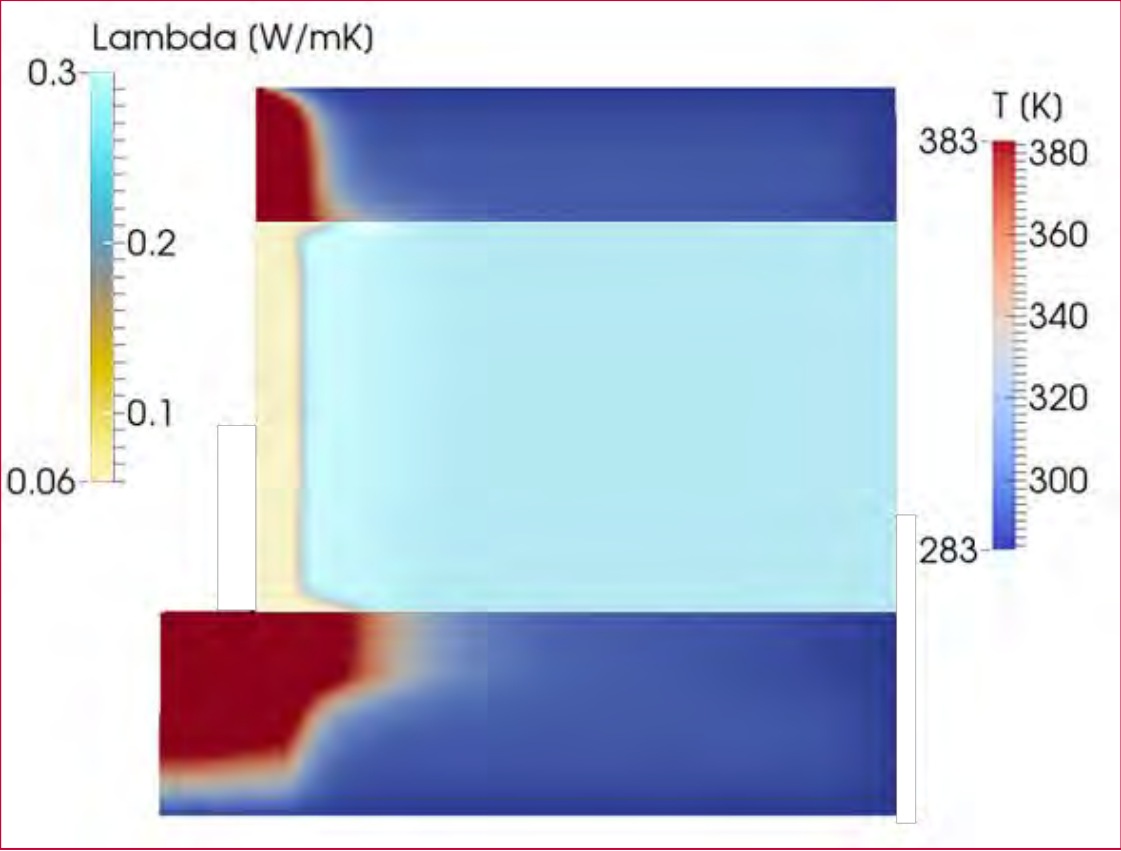
Die trockene Schicht hat an Stärke gewonnen. Zudem treten Konationszonen an Boden und Deckel auf.

Abbildung 14 Spezifische Masse Organik, Versuch 1 nach 333 Minuten



Die Pyrolyse der Organik in den ersten Zellen ist abschlossen.

Abbildung 15 Wärmeleitfähigkeit des Bodens, Versuch 1 nach 333 Minuten



Durch die zunehmende Stärke der trockenen Schicht nimmt die Isolierung zu. Der Einfluss der Pyrolyse ist kaum ersichtlich.

Abbildung 16 Temperaturfeld, Versuch 1 bei Versuchsende (700 Minuten)

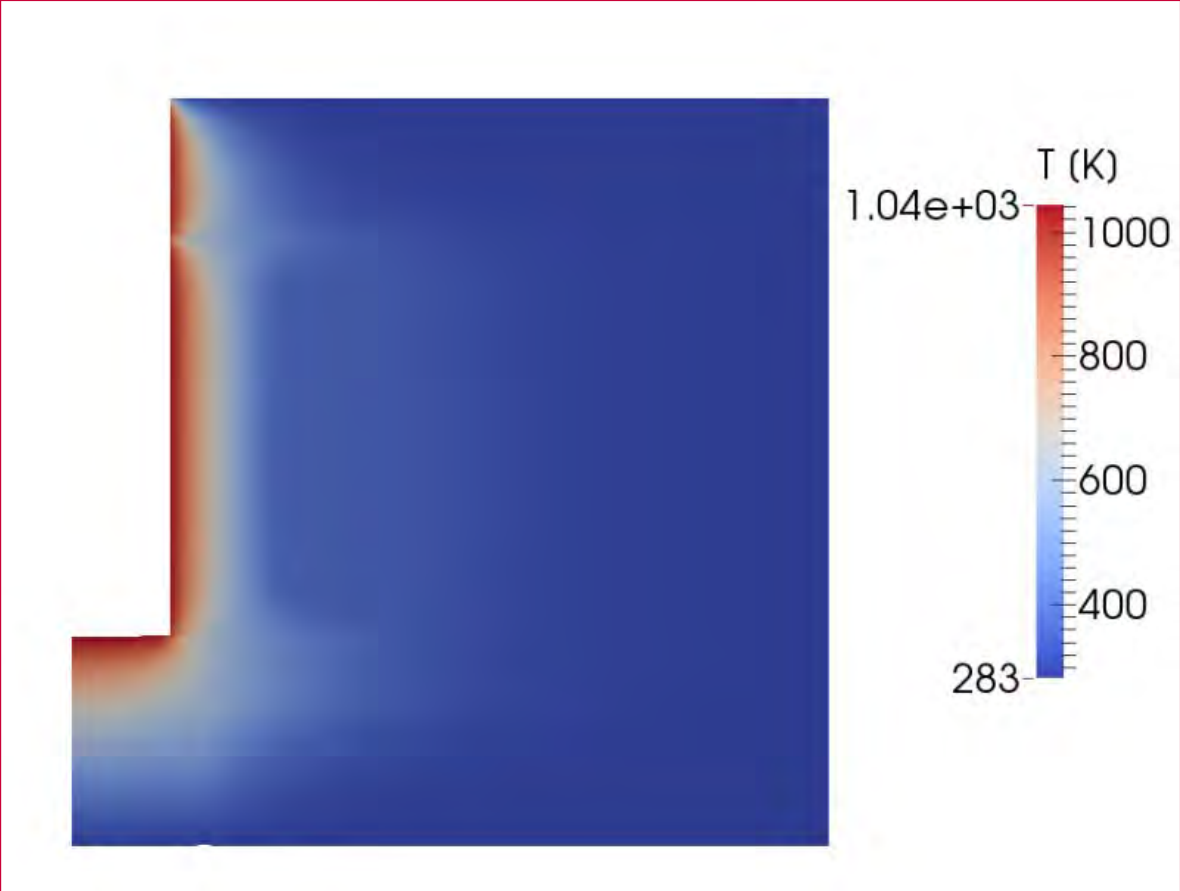


Abbildung 17 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 1 bei Versuchsende (700 Minuten)

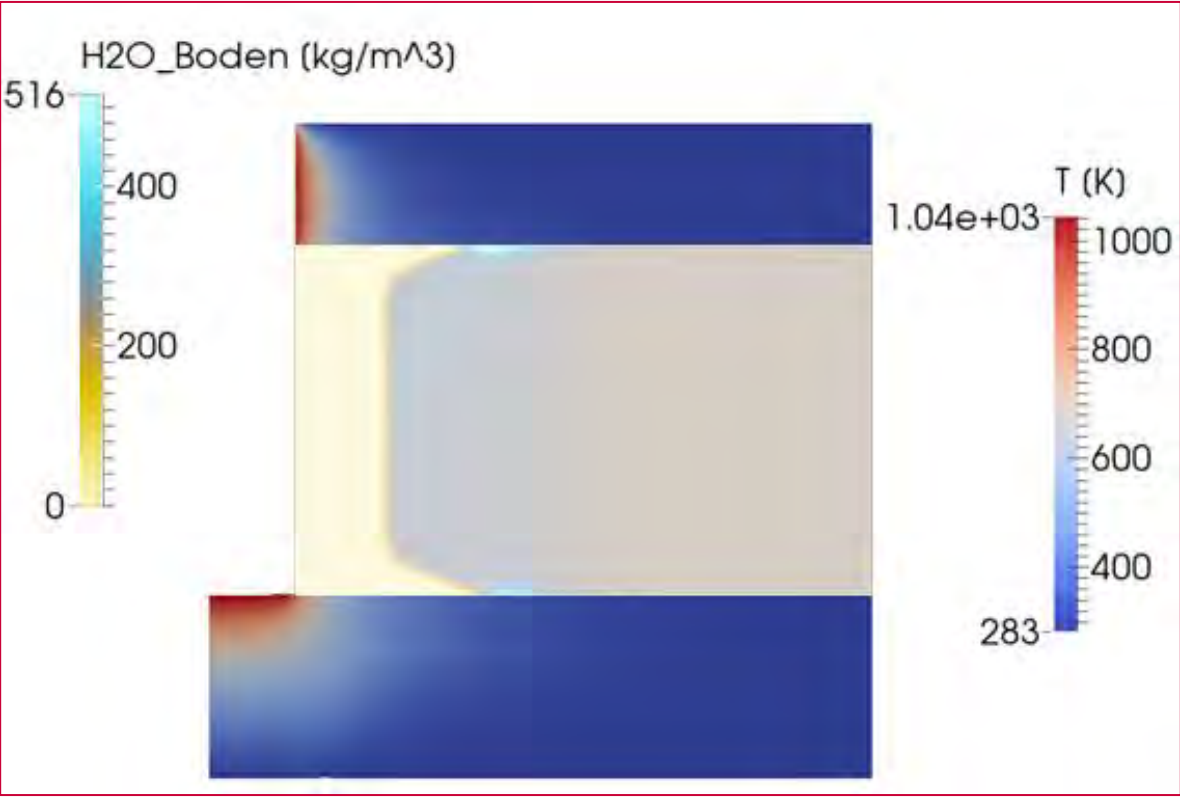
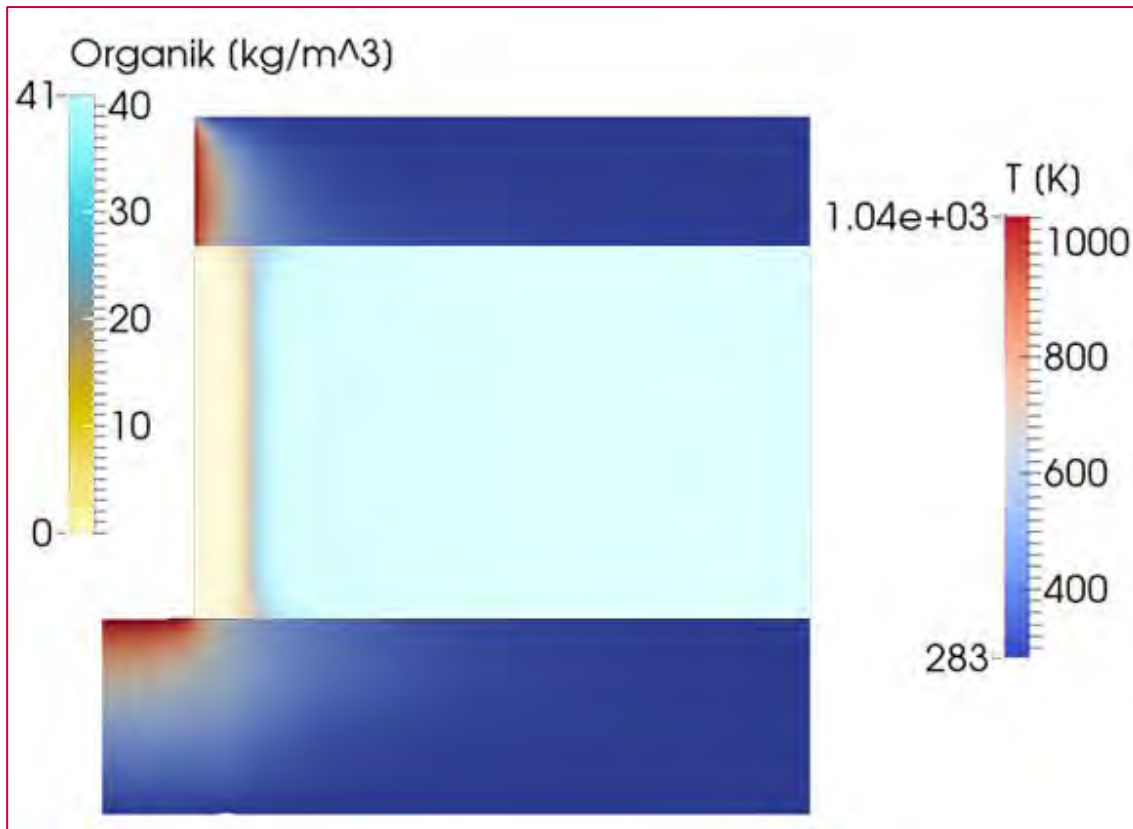


Abbildung 18 Spezifische Masse Organik, Versuch 1 bei Versuchsende (700 Minuten)



In den Abbildungen 19, 20, 21 und 22 ist ein zeitlicher Vergleich der Temperaturen der Messstellen aus dem Laborversuch und des Modells abgebildet. Hierbei wurden die Messstellen mit identischem Abstand zur Lanze in einem Diagramm dargestellt. Es ist eine starke Abweichung der Messungen untereinander zu beobachten. Dies lässt sich durch die Inhomogenität des Bodens erklären. Die Messungen der ersten und zweiten Messstelle (Abbildung 19, Abbildung 20) sind sehr gut durch das Modell abzubilden. Bei den äußeren Messstellen (Abbildung 21, Abbildung 22) kann der Temperaturverlauf bis 417 Minuten gut wiedergegeben werden. Anschließend wird die Wärmeabfuhr zum Kühlmantel im Modell größer als jene in der Messung und es werden zu niedrige Temperaturen modelliert. Dies könnte durch die Implementierung eines Wärmeübergangs zwischen Mantel und Boden korrigiert werden, jedoch ist dieser messtechnisch schwer zu bestimmen.

Abbildung 19 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 1 an der ersten Messstelle (\varnothing 320 mm).

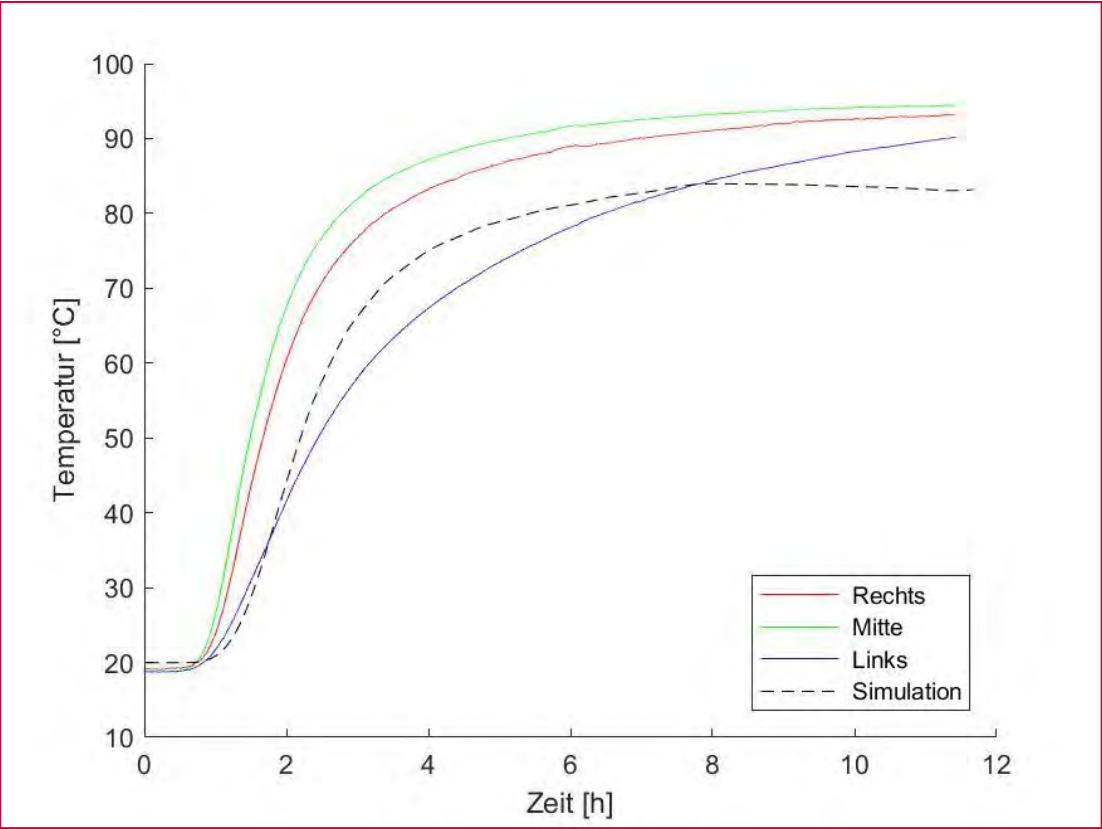


Abbildung 20 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 1 an der zweiten Messstelle (\varnothing 520 mm).

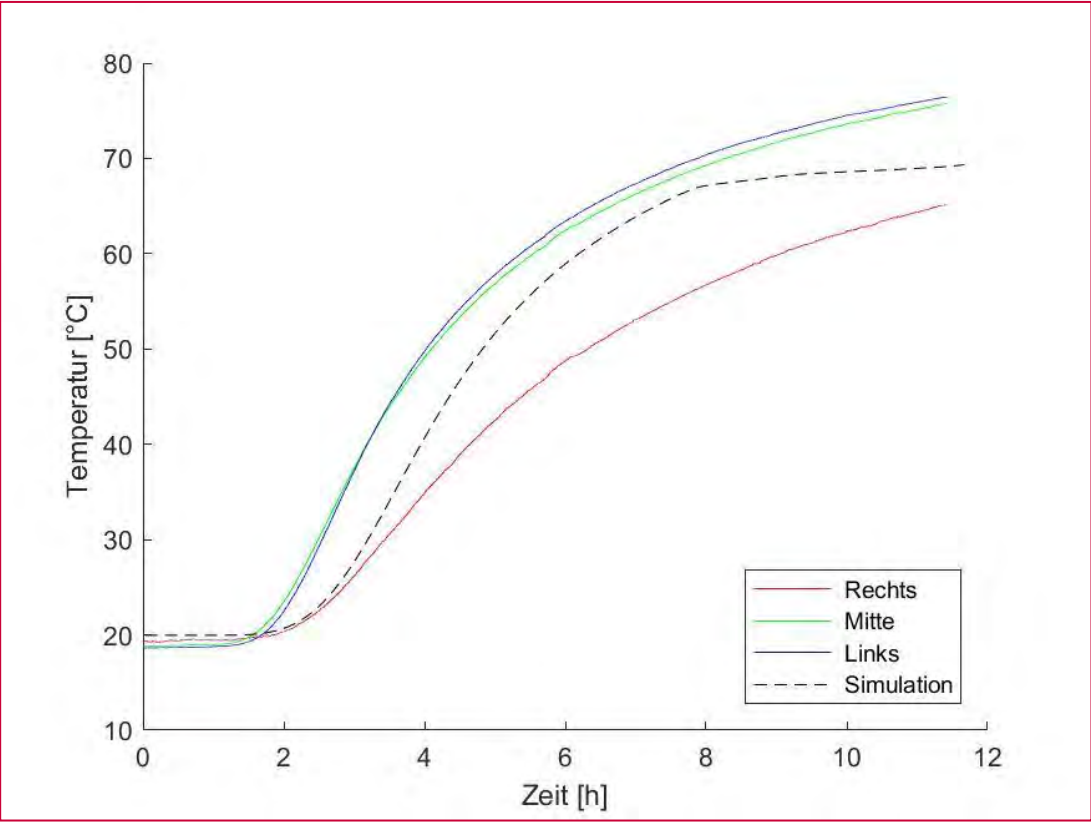


Abbildung 21 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 1 an der dritten Messstelle (\varnothing 720 mm).

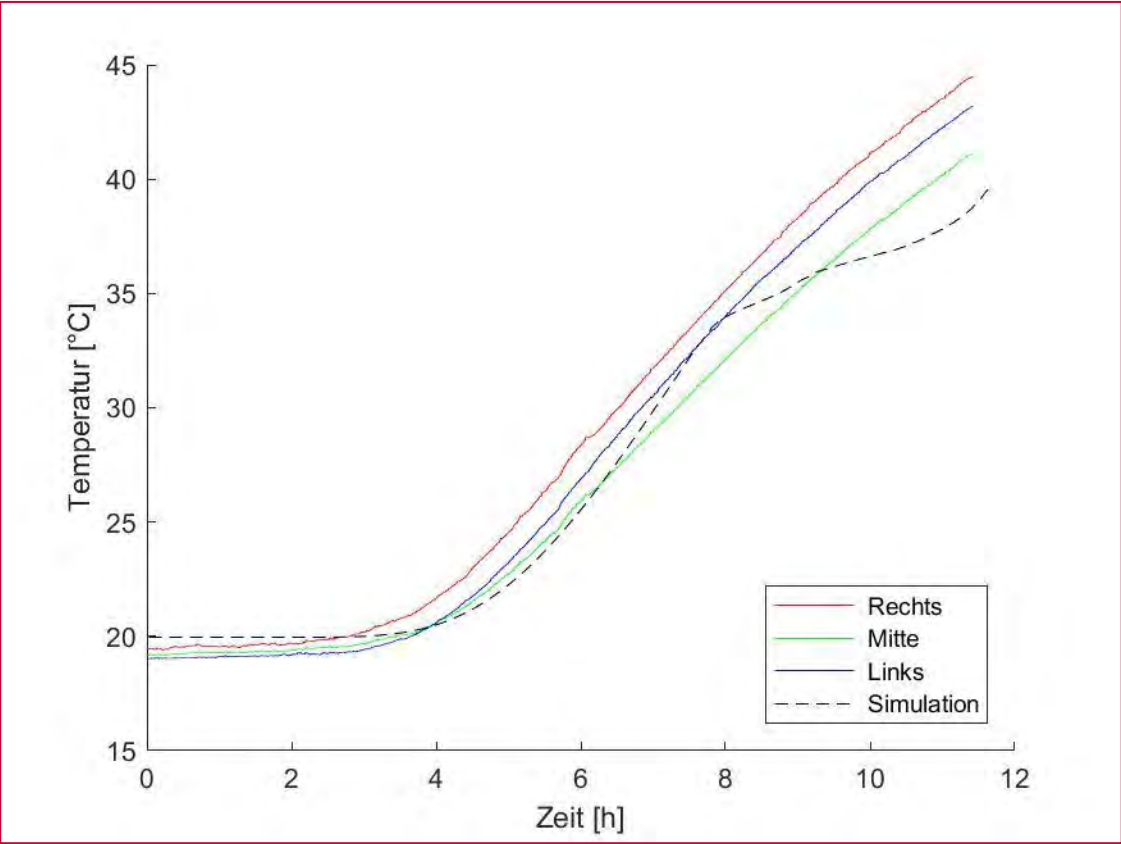
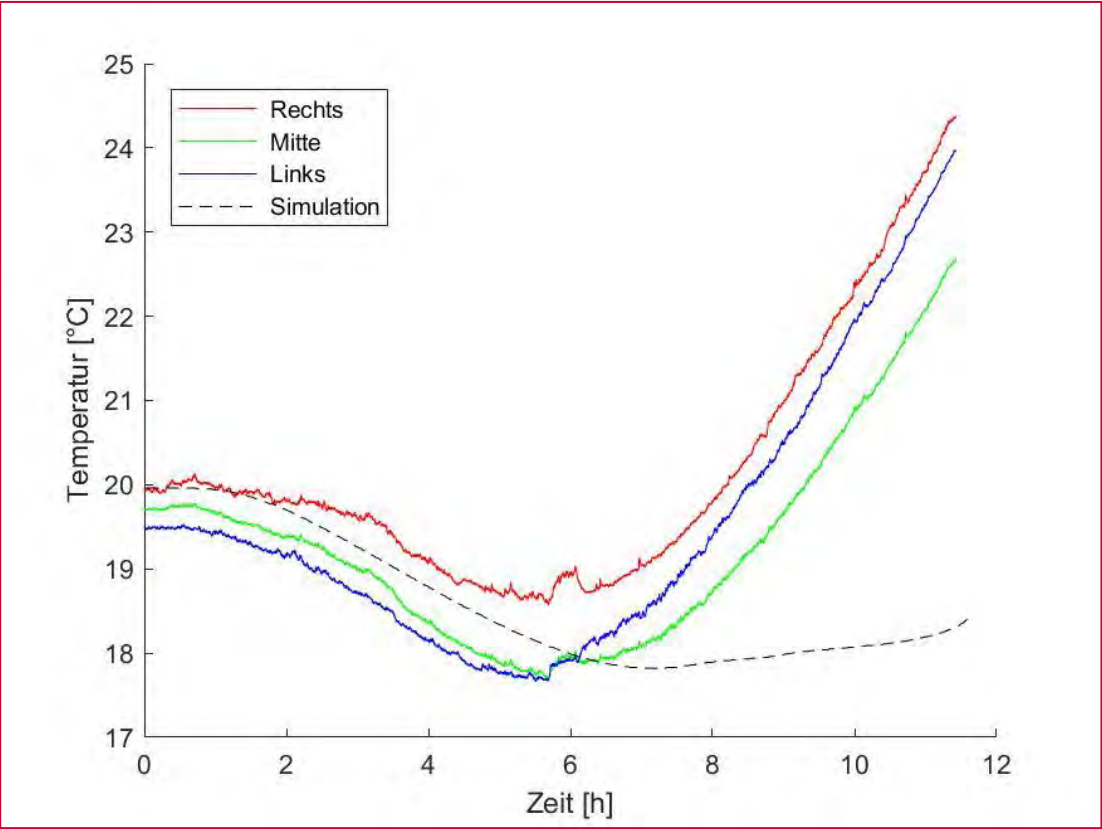


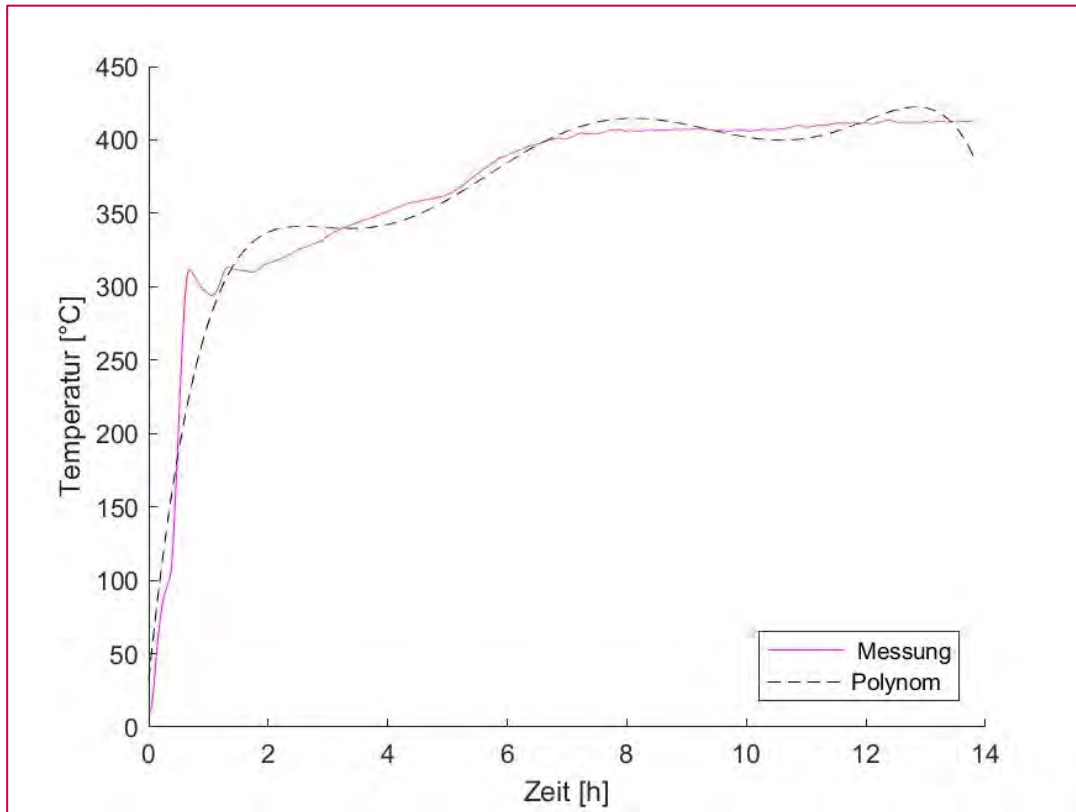
Abbildung 22 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 1 an der vierten Messstelle (\varnothing 920 mm).



2.1.4 Modellierung der Versuche - Versuch 2

Die Simulation des zweiten Versuchs unterscheidet sich durch den zeitlichen Temperaturverlauf der Lanze (Abbildung 23) vom Versuch 1. Alle anderen Parameter wurden übernommen.

Abbildung 23 Temperaturverlauf der Heizlanze, Versuch 2, sowie das Polynom, welches als Randbedingung für das Modell dient.



Grundsätzlich zeigt das Modell des zweiten Versuchs ein identisches Verhalten zum Versuch 1. Jedoch ist die trockene Zone (Abbildung 25) und der Bereich des Organikabbaus (Abbildung 26) aufgrund der niedrigen Lanzentemperatur wesentlich geringer. So beträgt der Durchmesser des getrockneten Bereichs an der Oberfläche 315 mm. Dem gegenüber steht der Laborversuch mit 330 mm. Ein Abbau der Organik an der Oberfläche ist weder im Modell noch im Laborversuch zu erkennen.

Abbildung 24 Temperaturfeld, Versuch 2 bei Versuchsende (700 Minuten)

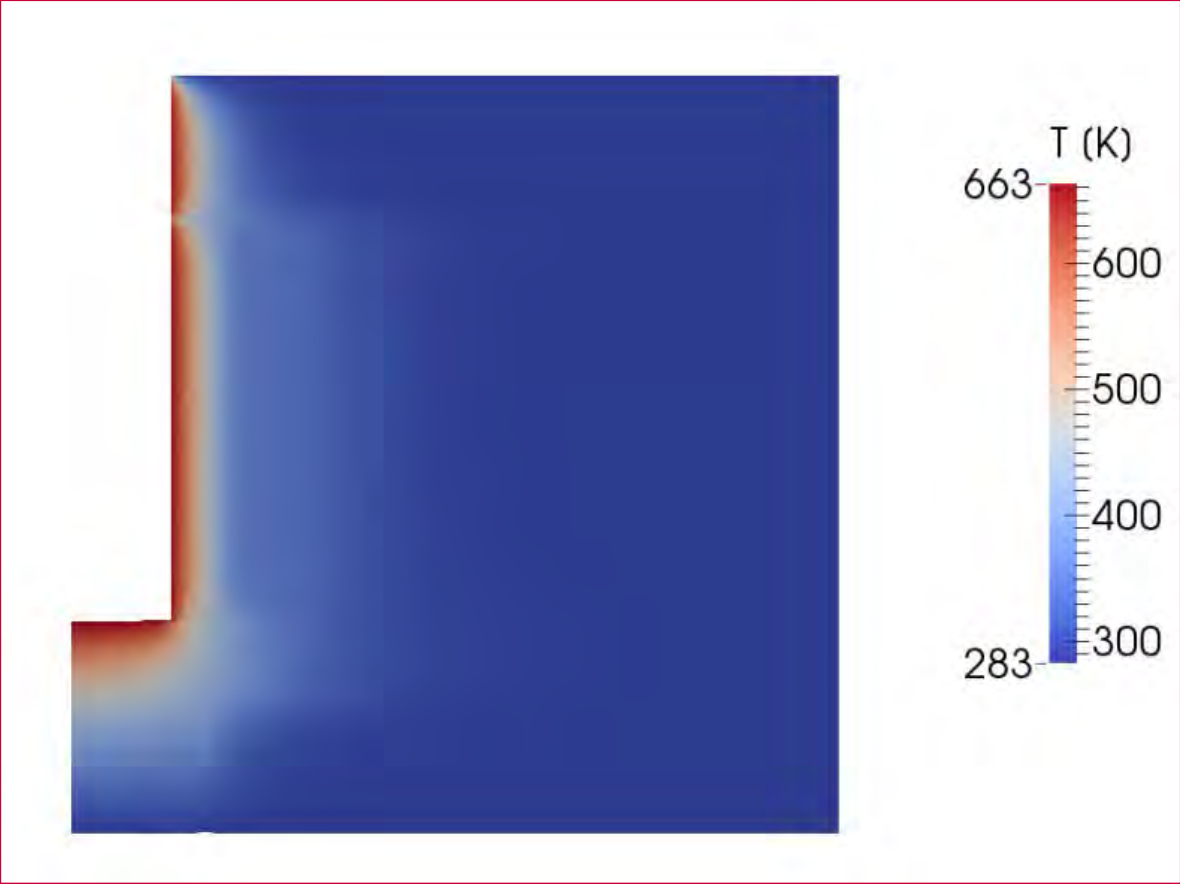


Abbildung 25 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 2 bei Versuchsende (700 Minuten).

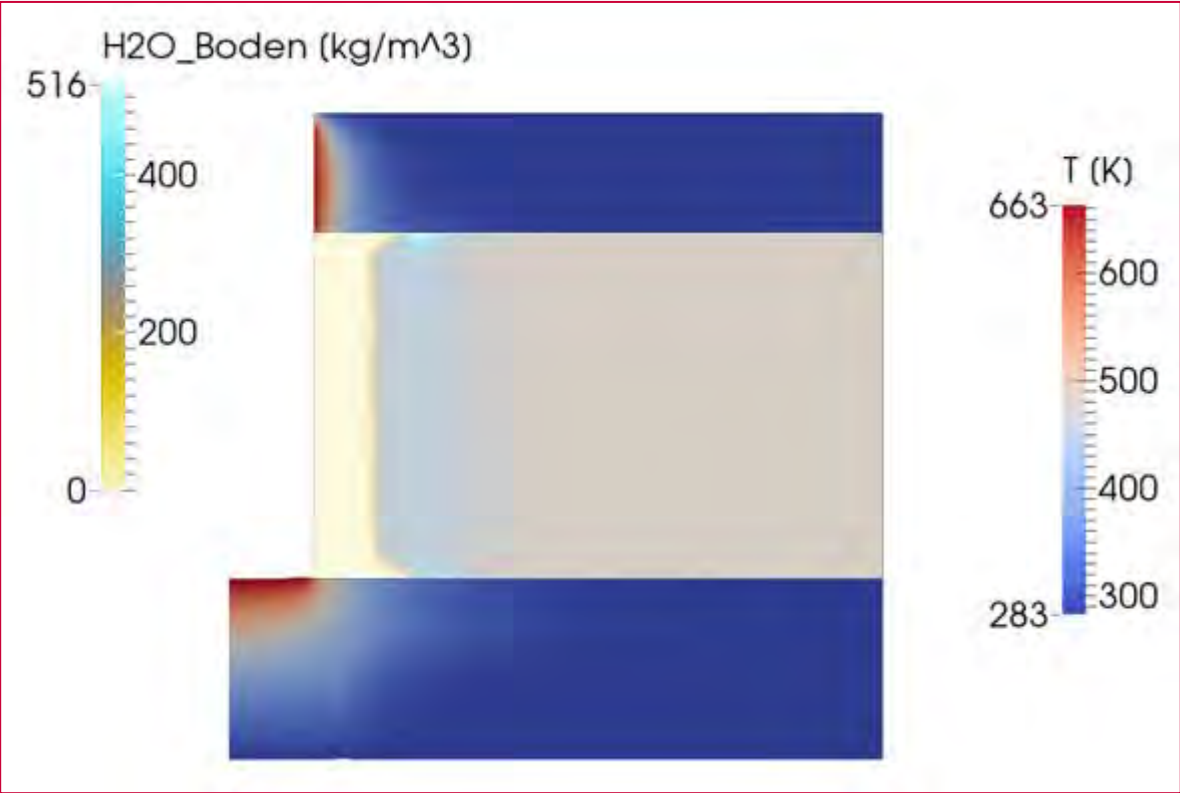
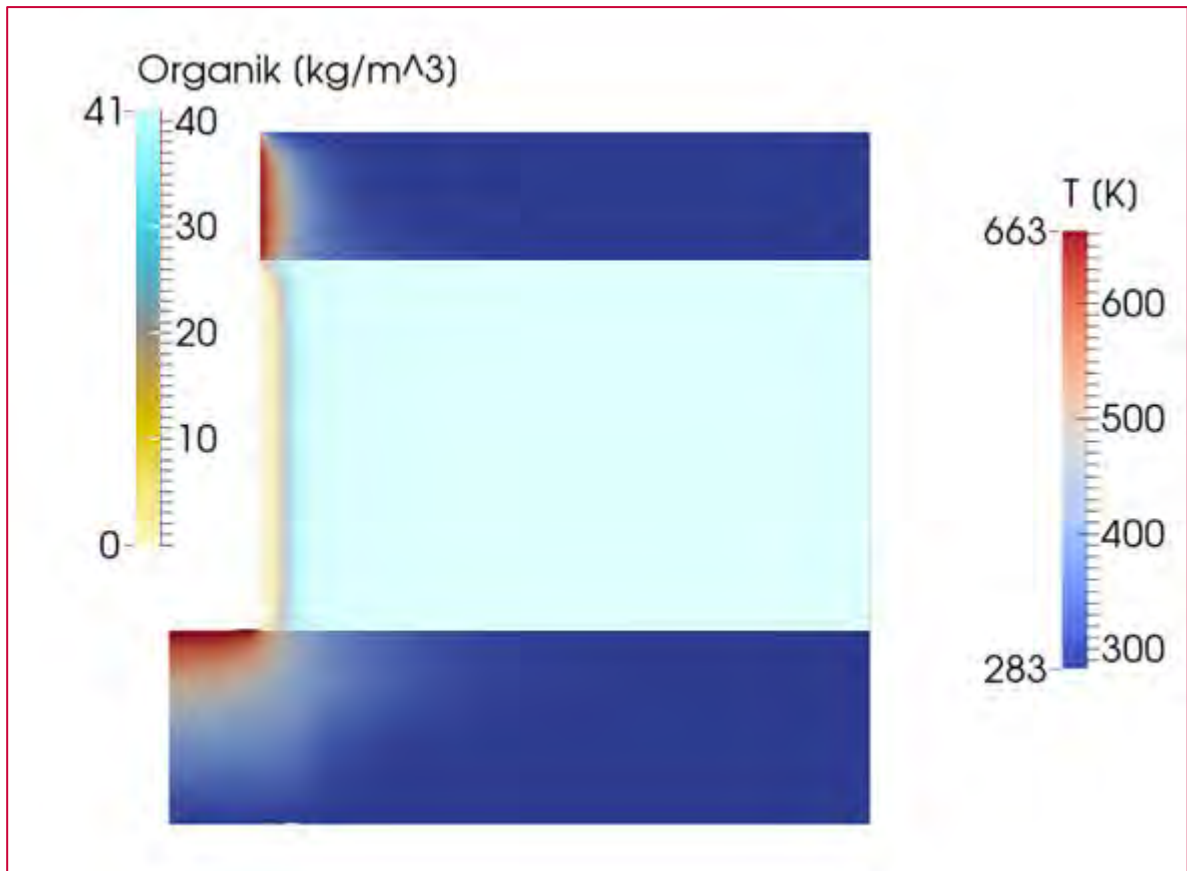


Abbildung 26 Spezifische Masse Organik, Versuch 2 bei Versuchsende (700 Minuten)



In den Abbildungen 27, 28, 29 und 30 ist ein zeitlicher Vergleich der Temperaturen der Messstellen im Laborversuch und des Modells abgebildet. Hierbei wurden die Messstellen mit identischem Abstand zur Lanze in einem Diagramm dargestellt. Analog zum Versuch 1 ist eine starke Abweichung der Messungen untereinander zu beobachten. Die Messungen der ersten und zweiten Messstelle (Abbildung 27, Abbildung 28) sind sehr gut durch das Modell abzubilden. Bei den äußeren Messstellen (Abbildung 29, Abbildung 30) wird der zeitliche Temperaturanstieg unterschätzt. Dies kann auf das Fehlen eines Wärmeübergangs zwischen Mantel und Boden zurückgeführt werden.

Abbildung 27 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 2 an der ersten Messstelle (\varnothing 320 mm)

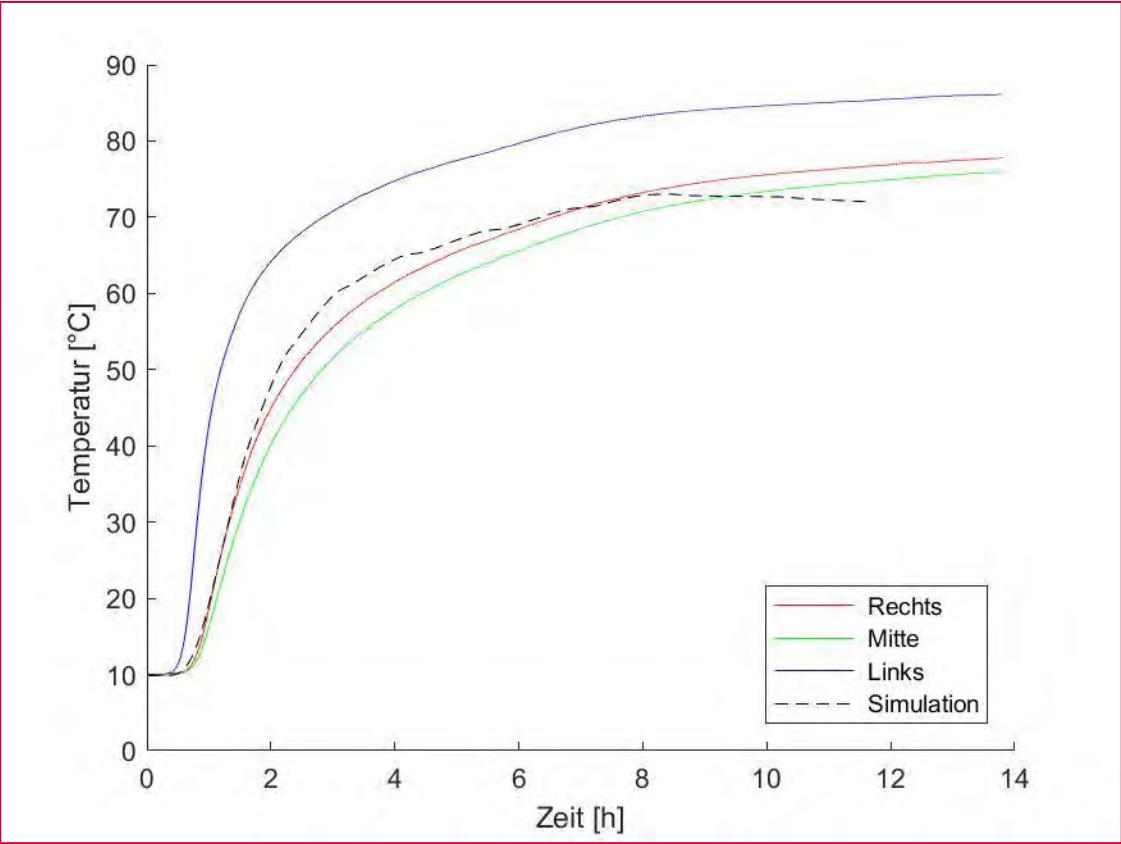


Abbildung 28 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 2 an der zweiten Messstelle (\varnothing 520 mm)

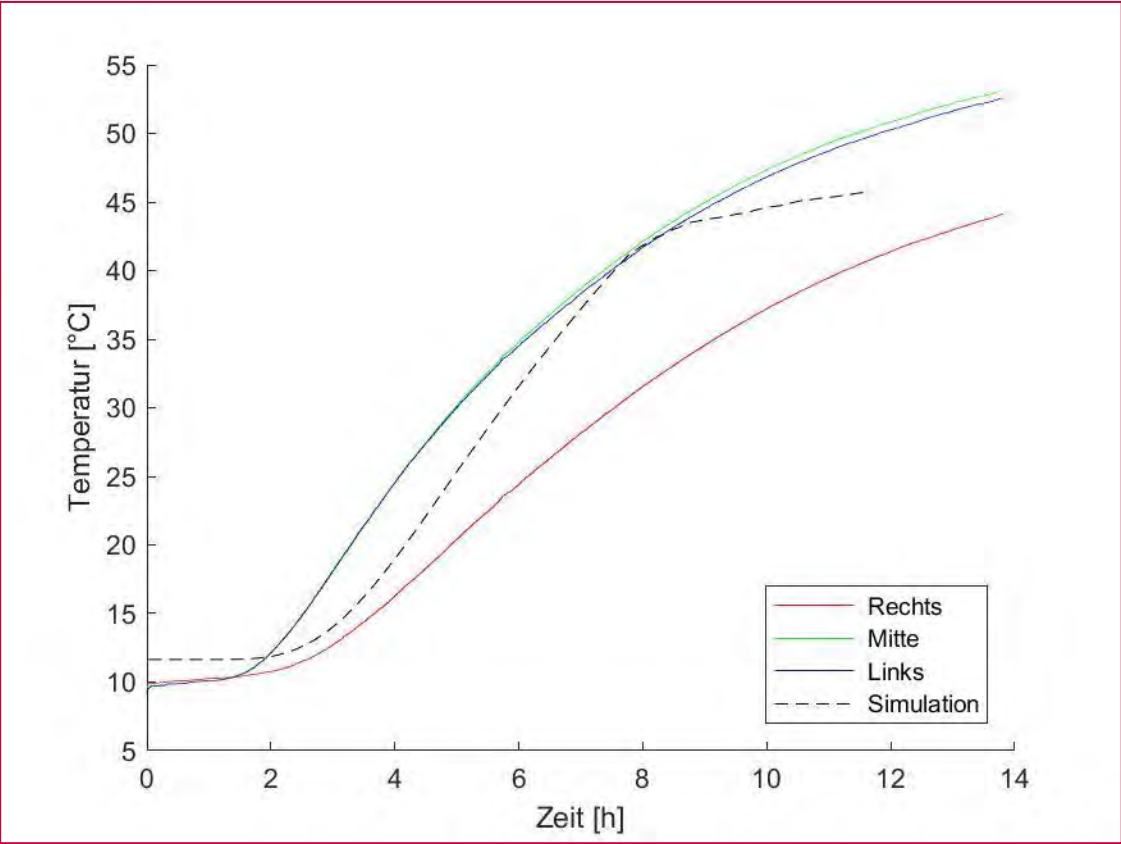


Abbildung 29 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 2 an der dritten Messstelle (\varnothing 720 mm).

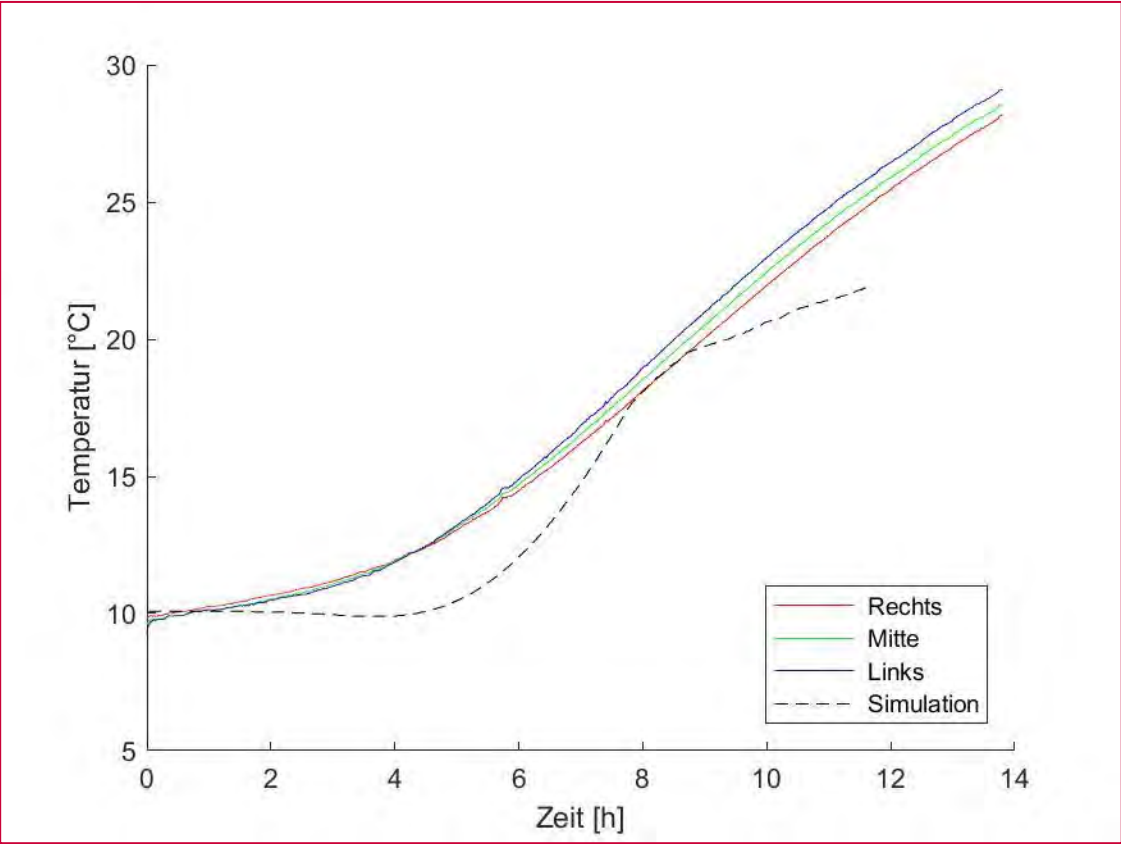
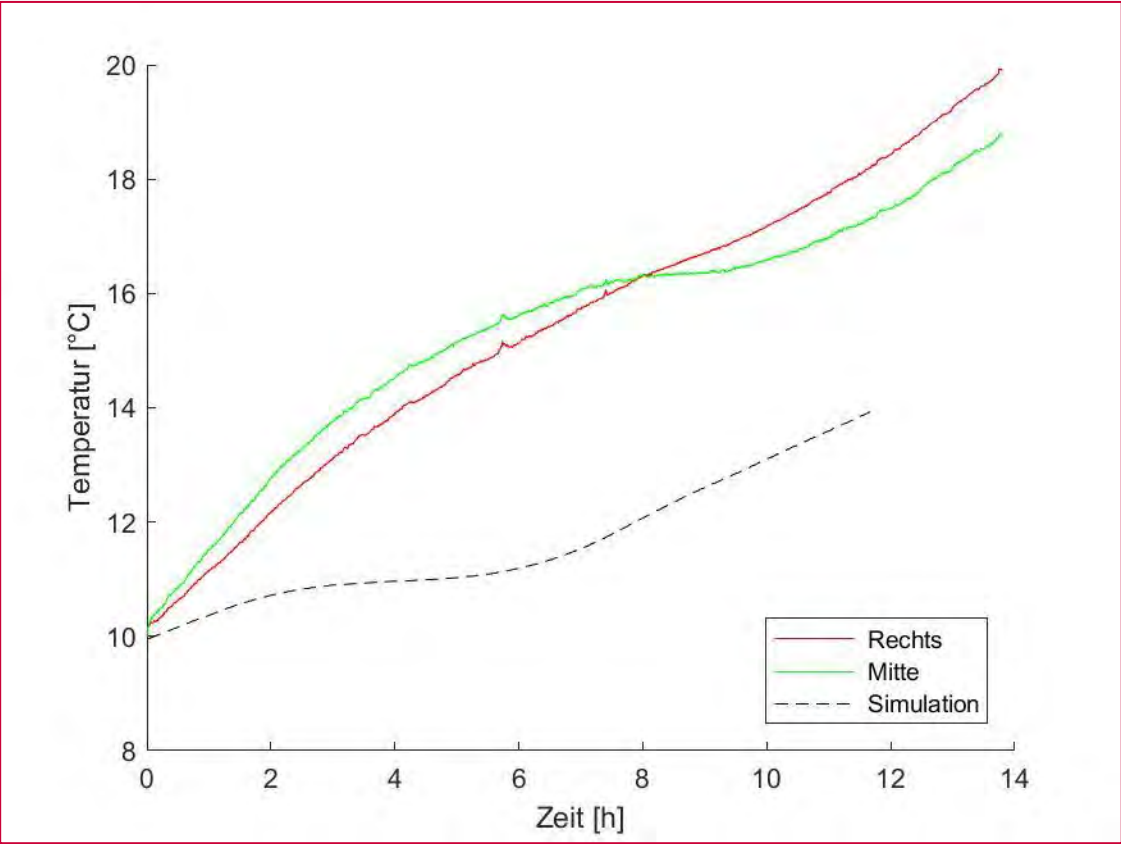


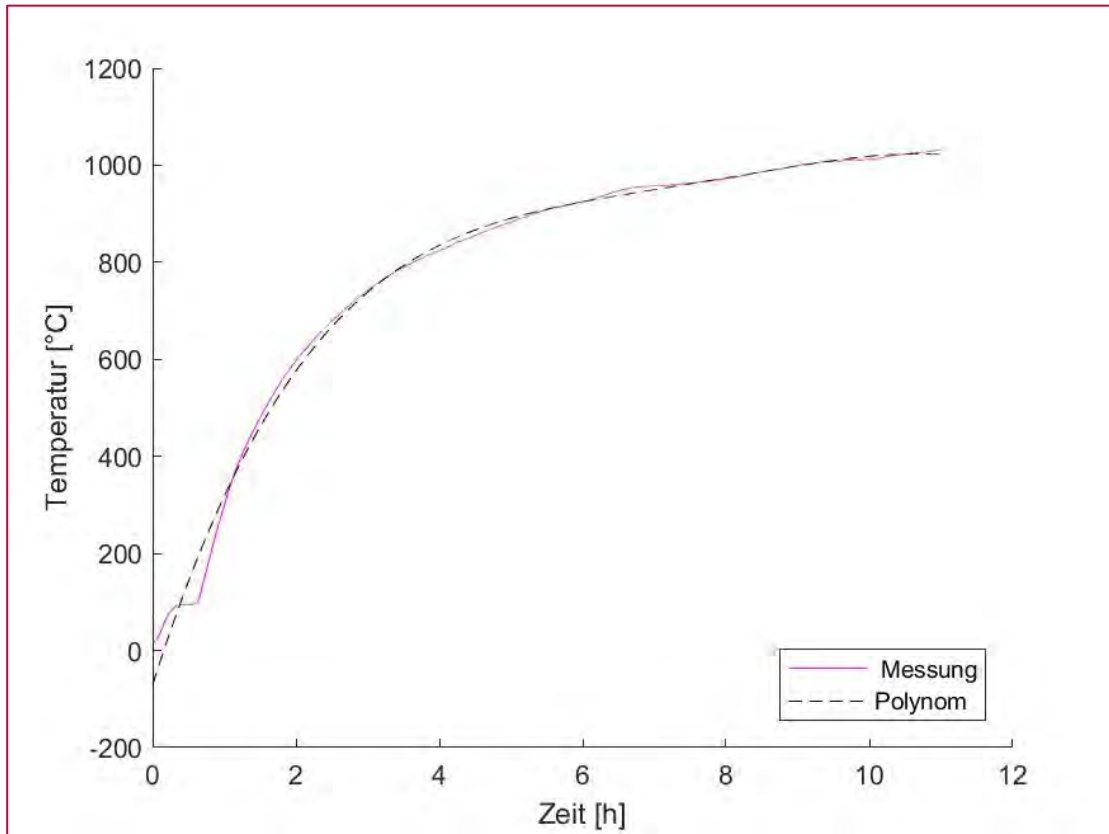
Abbildung 30 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 2 an der vierten Messstelle (\varnothing 920 mm)



2.1.5 Modellierung der Versuche - Versuch 3

Die Simulation des dritten Versuchs unterscheidet sich durch den zeitlichen Temperaturverlauf der Lanze (Abbildung 31) vom Versuch 1. Alle anderen Parameter wurden übernommen.

Abbildung 31 Temperaturverlauf der Heizlanze, Versuch 3, sowie das Polynom, welches als Randbedingung für das Modell dient.



Aufgrund der wesentlich höheren Temperaturen vergrößert sich der trockene Bereich. Dieser besitzt an der Oberfläche einen Durchmesser von 545 mm im Modell und 570 mm in der Messung. Auch der Bereich des Organikabbaus nimmt zu. Der komplett pyrolysierte Bereich im Modell beginnt bei 335 mm und im Laborversuch bei 350 mm. Der Beginn des Abbaus der Organik tritt im Versuch und im Modell bei 380 mm ein.

Abbildung 32 Temperaturfeld, Versuch 3 beim Versuchsende (700 Minuten)

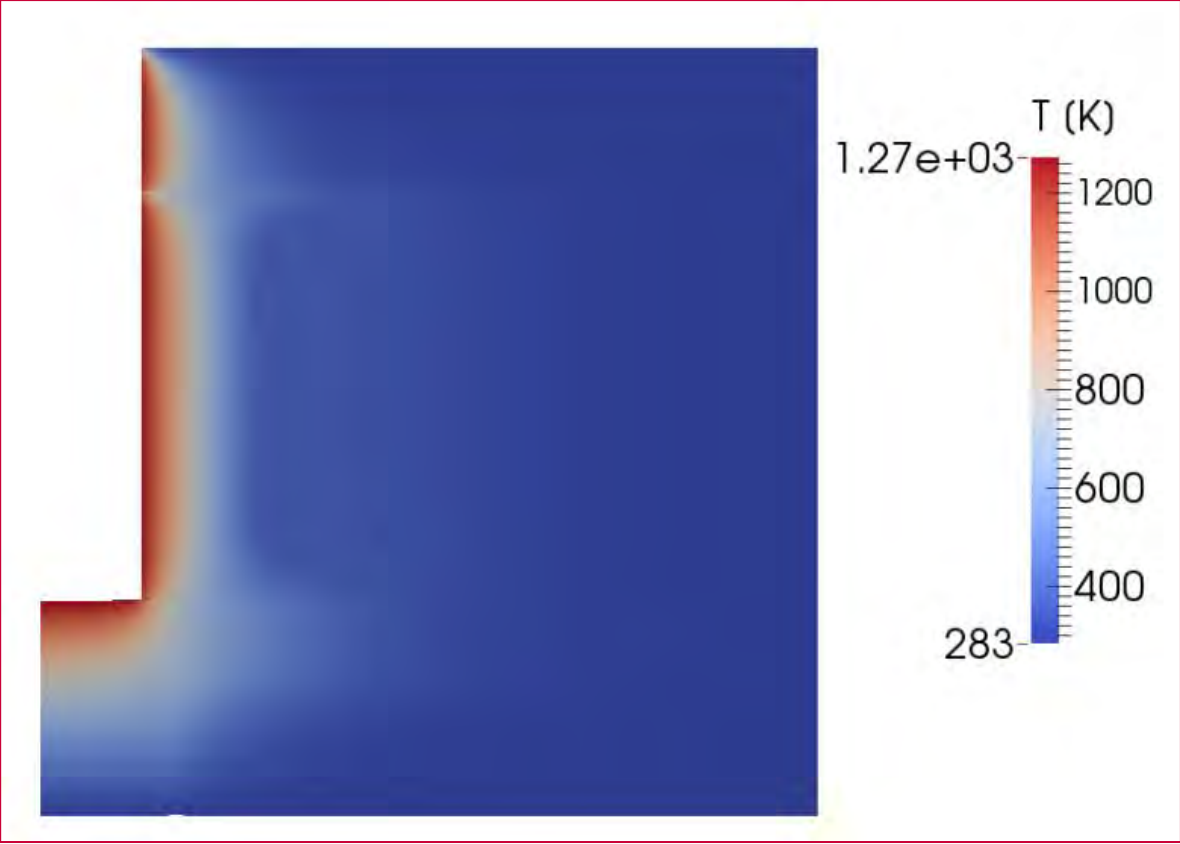


Abbildung 33 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 3 bei Versuchsende (700 Minuten)

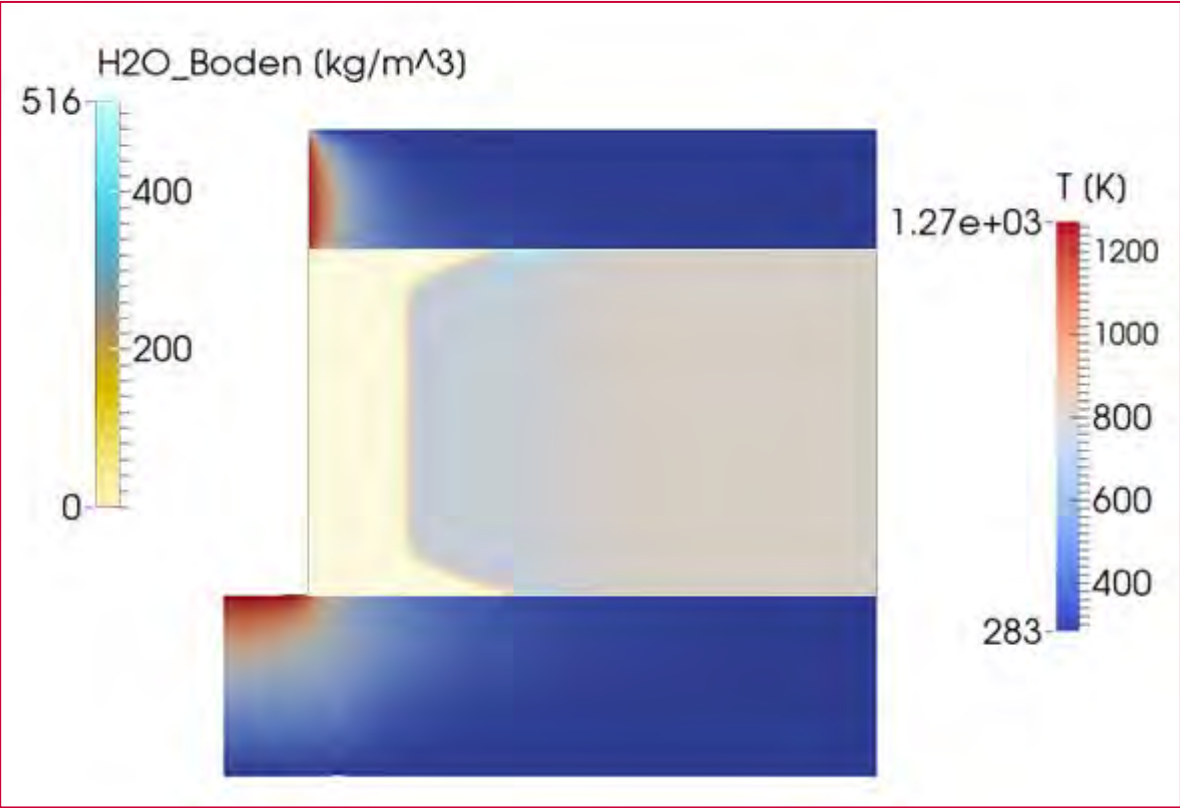
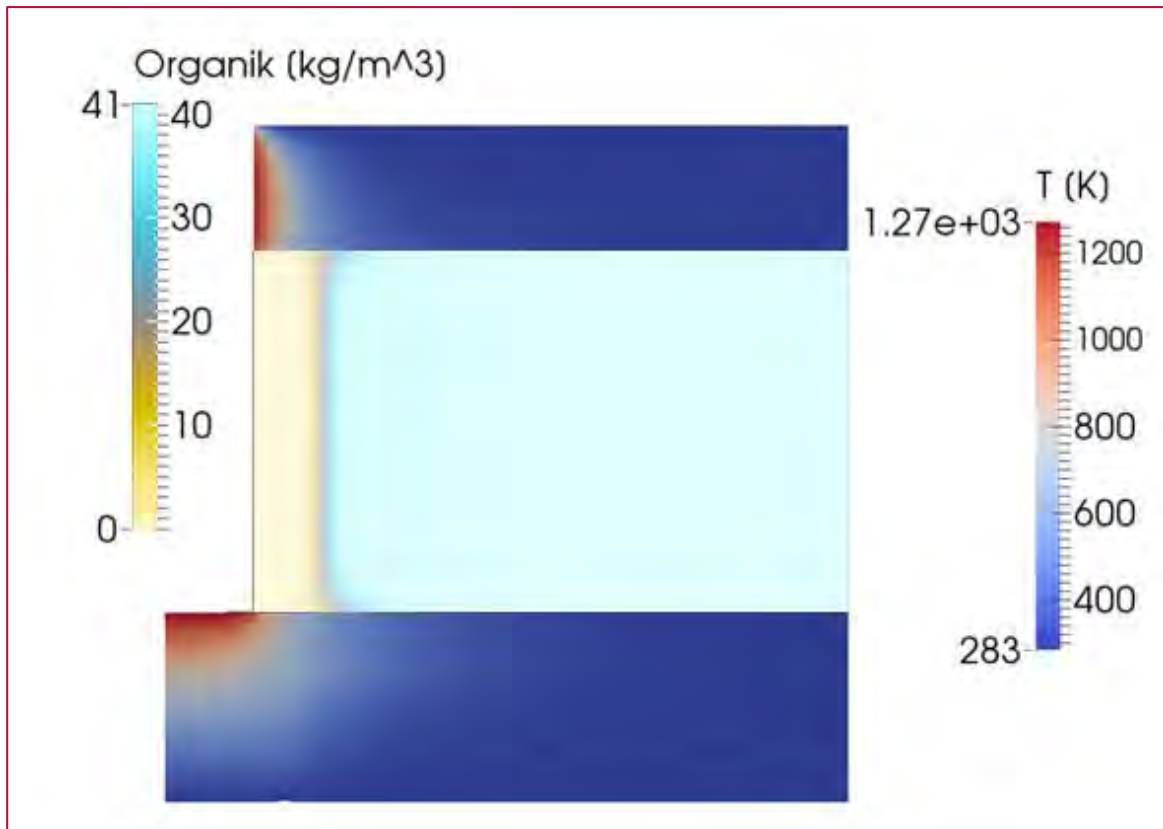


Abbildung 34 Spezifische Masse Organik, Versuch 3 bei Versuchsende (700 Minuten)



In den Abbildungen 35, 36, 37 und 38 ist ein zeitlicher Vergleich der Temperaturen der Messstellen im Laborversuch und des Modells abgebildet. Hierbei wurden die Messstellen mit identischem Abstand zur Lanze in einem Diagramm dargestellt. Bei den innersten Messpunkten (Abbildung 35) variieren die Versuchsdaten sehr stark. Das Modell zeigt ein identisches Verhalten zu den Versuchen und liegt innerhalb der Messdaten. Da bei diesen Temperaturen der Wärmeübergang zum Mantel eine untergeordnete Rolle spielt, lassen sich im Gegensatz zu den ersten beiden Versuchen auch die äußeren Messwerte reproduzieren (Abbildung 37, Abbildung 38).

Abbildung 35 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 3 an der ersten Messstelle (\varnothing 320 mm).

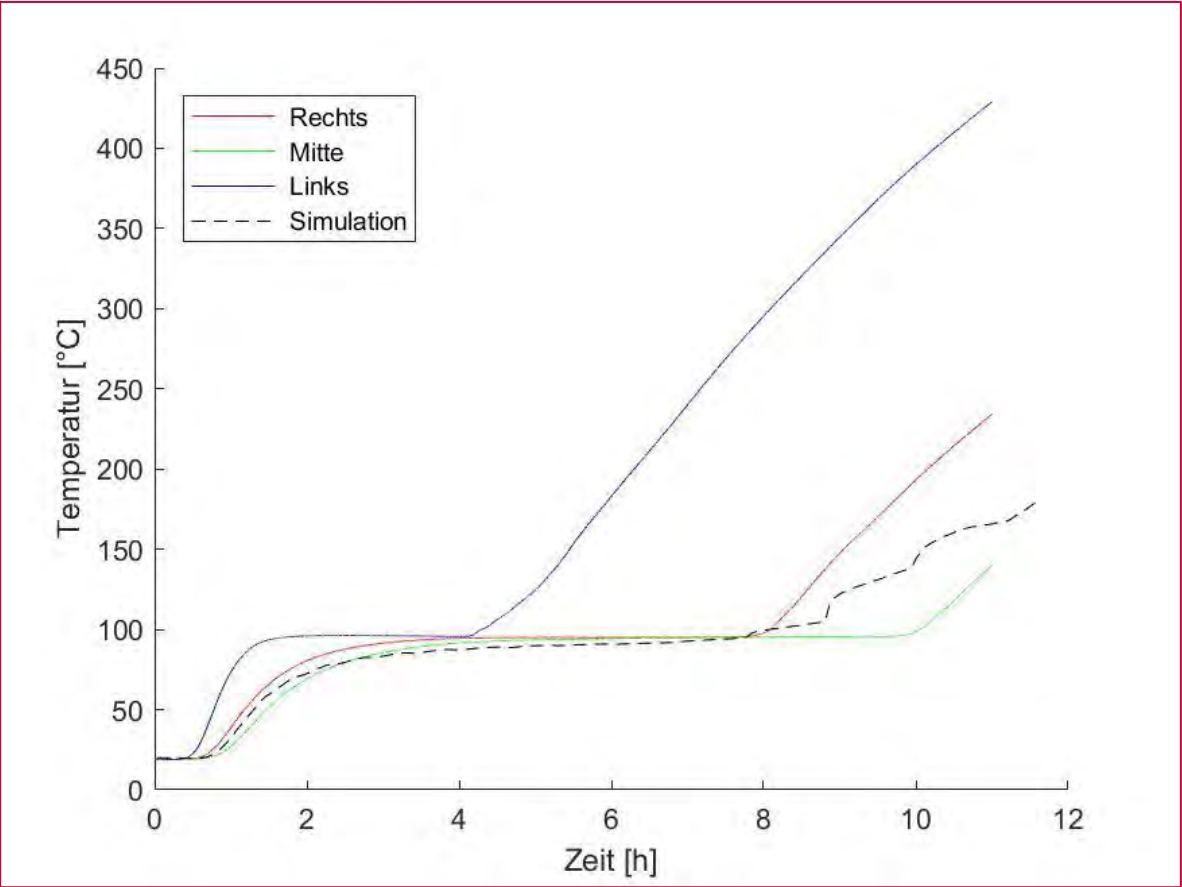


Abbildung 36 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuchs 3 an der zweiten Messstelle (\varnothing 520 mm).

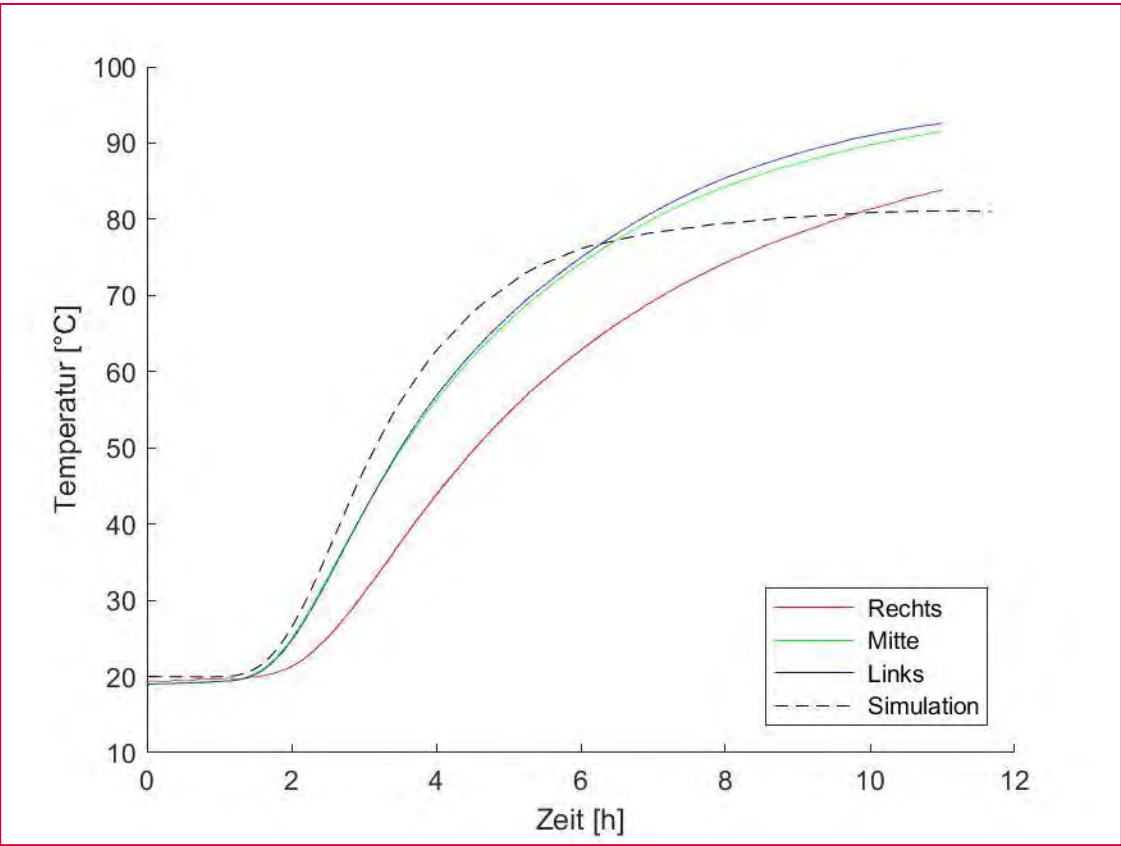


Abbildung 37 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 3 an der dritten Messstelle (\varnothing 720 mm).

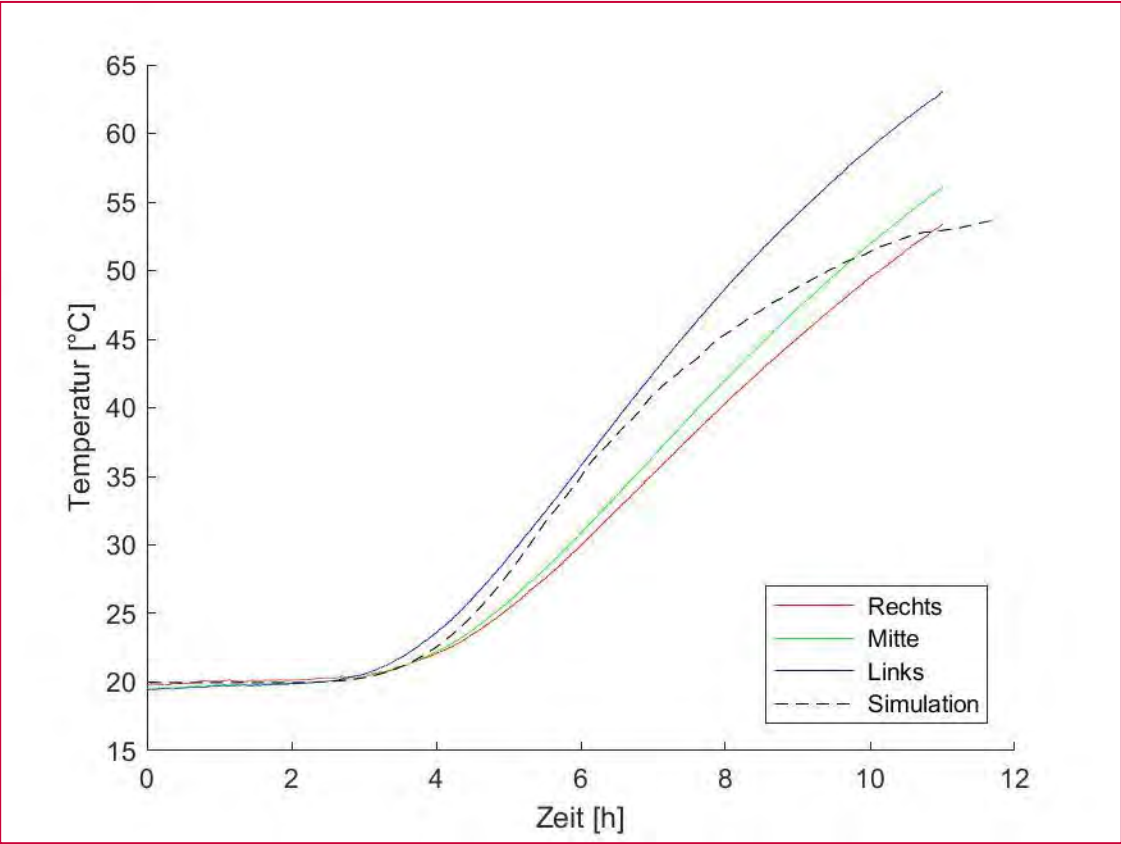
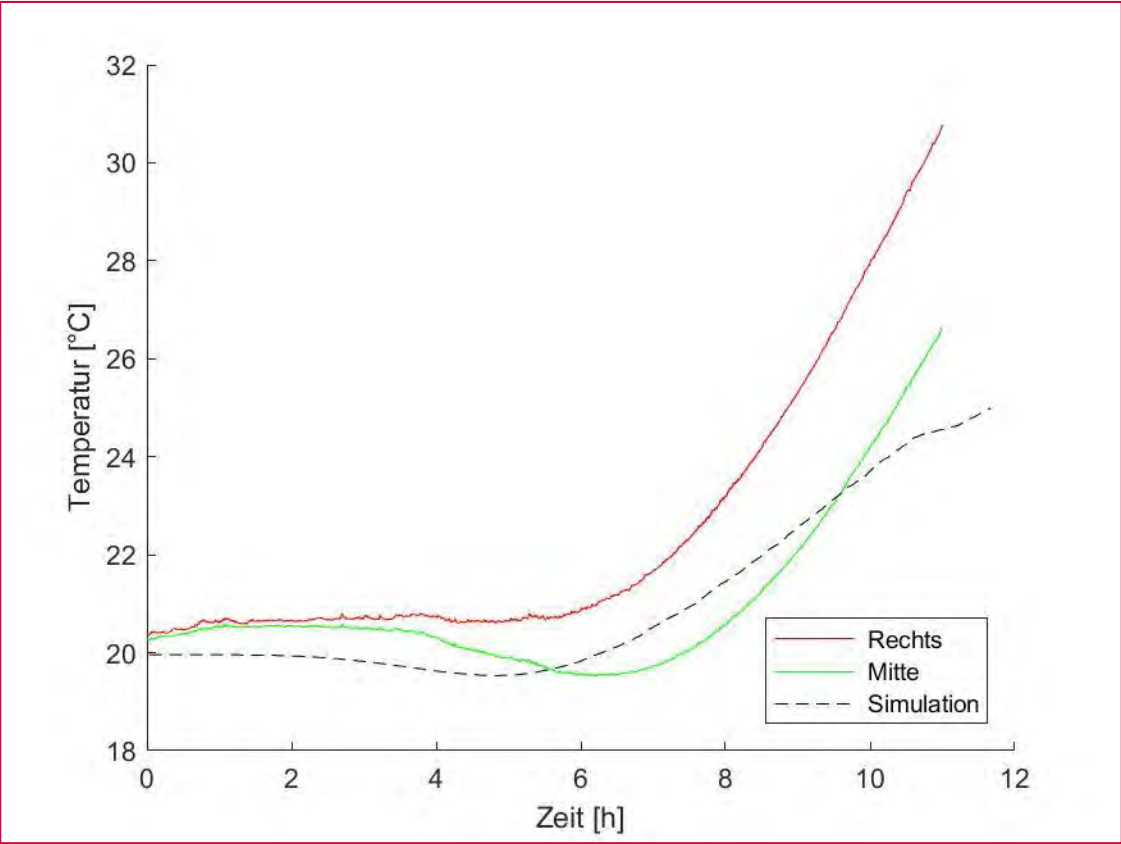


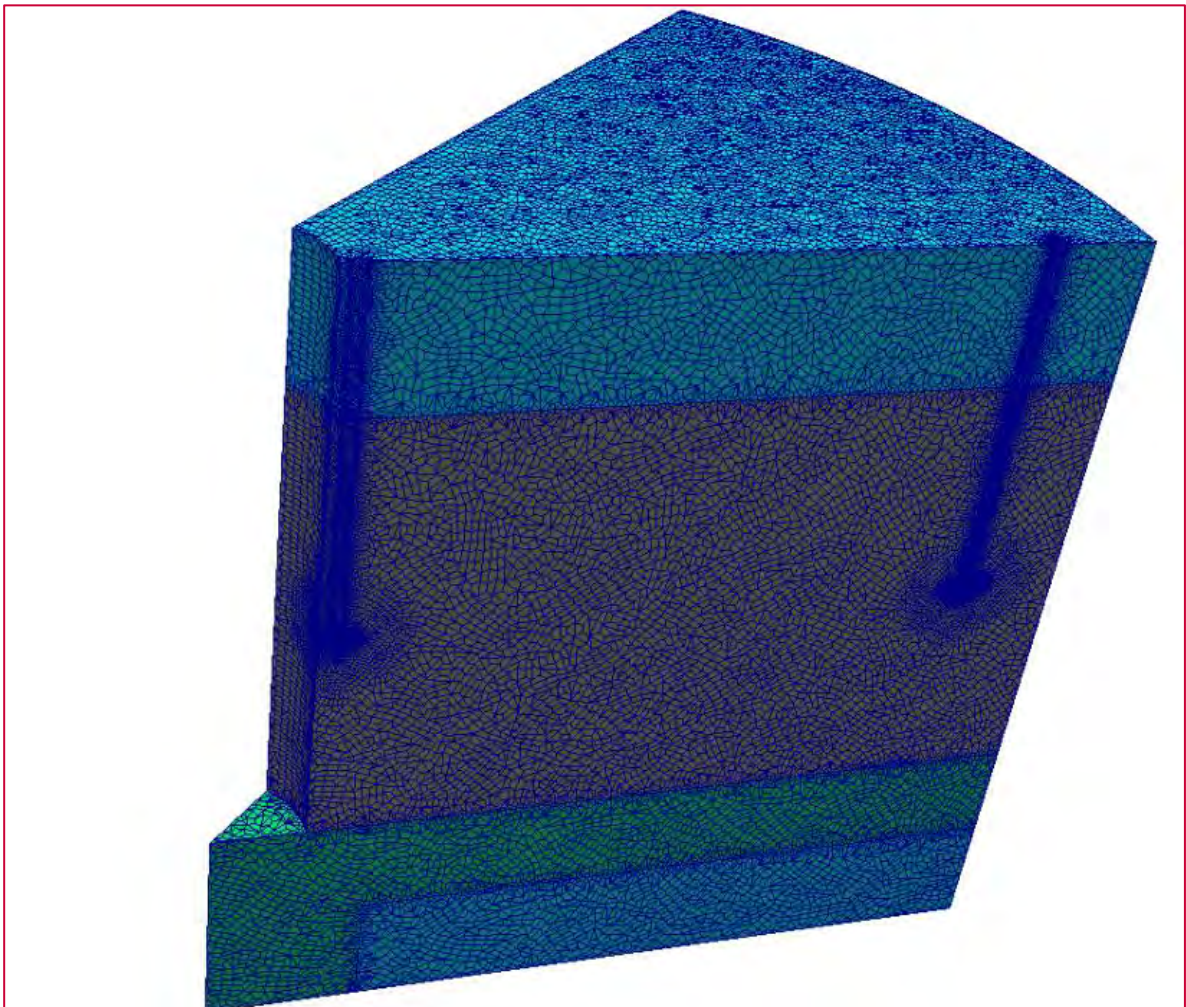
Abbildung 38 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 3 an der vierten Messstelle (\varnothing 920 mm).



Modellierung der Versuche - Versuch 4

Beim vierten Versuch wurden eine Luftinjektion und eine Luftabsaugung vorgenommen. Hier beträgt der Volumenstrom je Rohr 18,75 NL/min. Um dies abzubilden wurde ein Achterschnitt der Versuchsanlage modelliert. Das Rechennetz für die Modellierung (Abbildung 39) besteht wieder aus drei Regionen, welche mit Polyedern vernetzt wurden.

Abbildung 39 Struktur des Rechennetzes



Die Regionen sind farblich gekennzeichnet: Boden = braun, feuerfester Beton = grün, Leichtzustellung = blau.

Als Randbedingung für die Lanze wurde wiederum ein Polynom der Temperatur auf Basis der Messdaten vorgegeben (Abbildung 40). Die Temperatur der injizierten Luft wurde im Laborversuch ebenfalls erfasst. Da diese je nach Stelle der Injektion stark schwankt, wurde ein Mittelwert zur Bildung des Polynoms benutzt. Die einzelne Temperaturmessungen sowie das Polynom sind in Abbildung 41 dargestellt.

Abbildung 40 Temperaturverlauf der Heizlanze, Versuch 4, sowie das Polynom, welches als Randbedingung für das Modell dient.

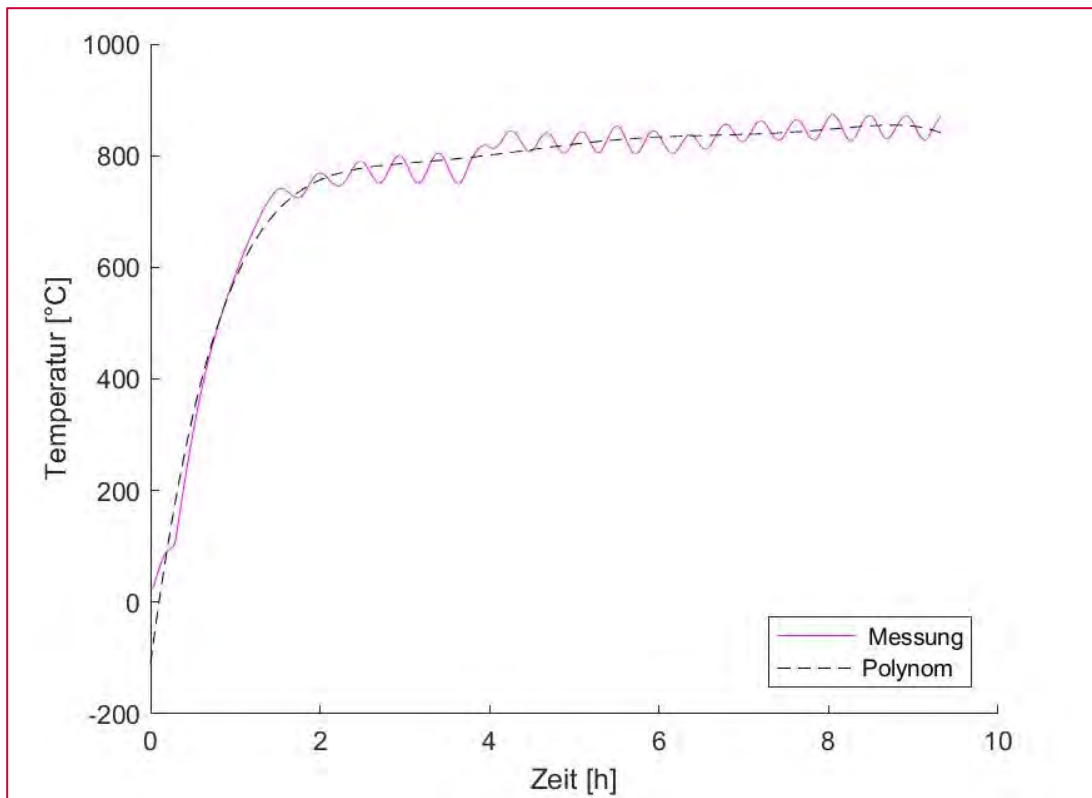
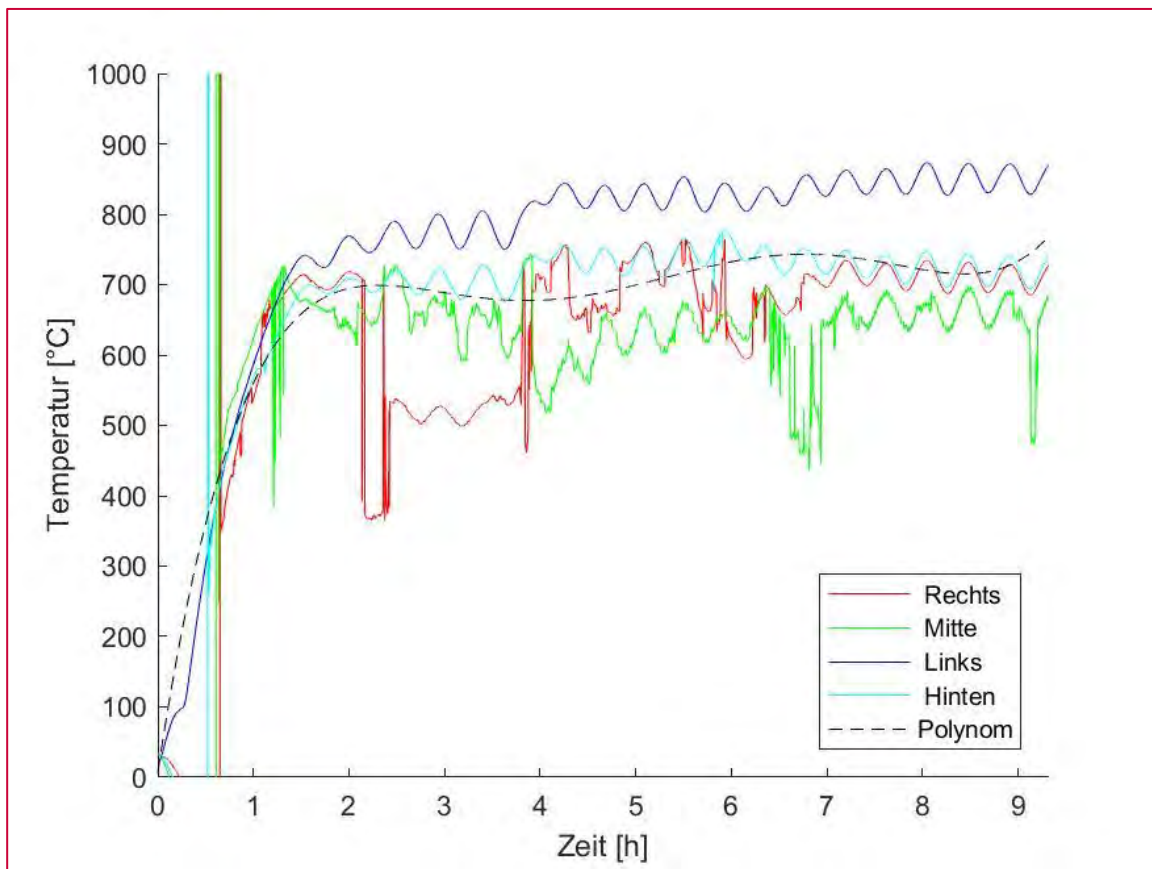
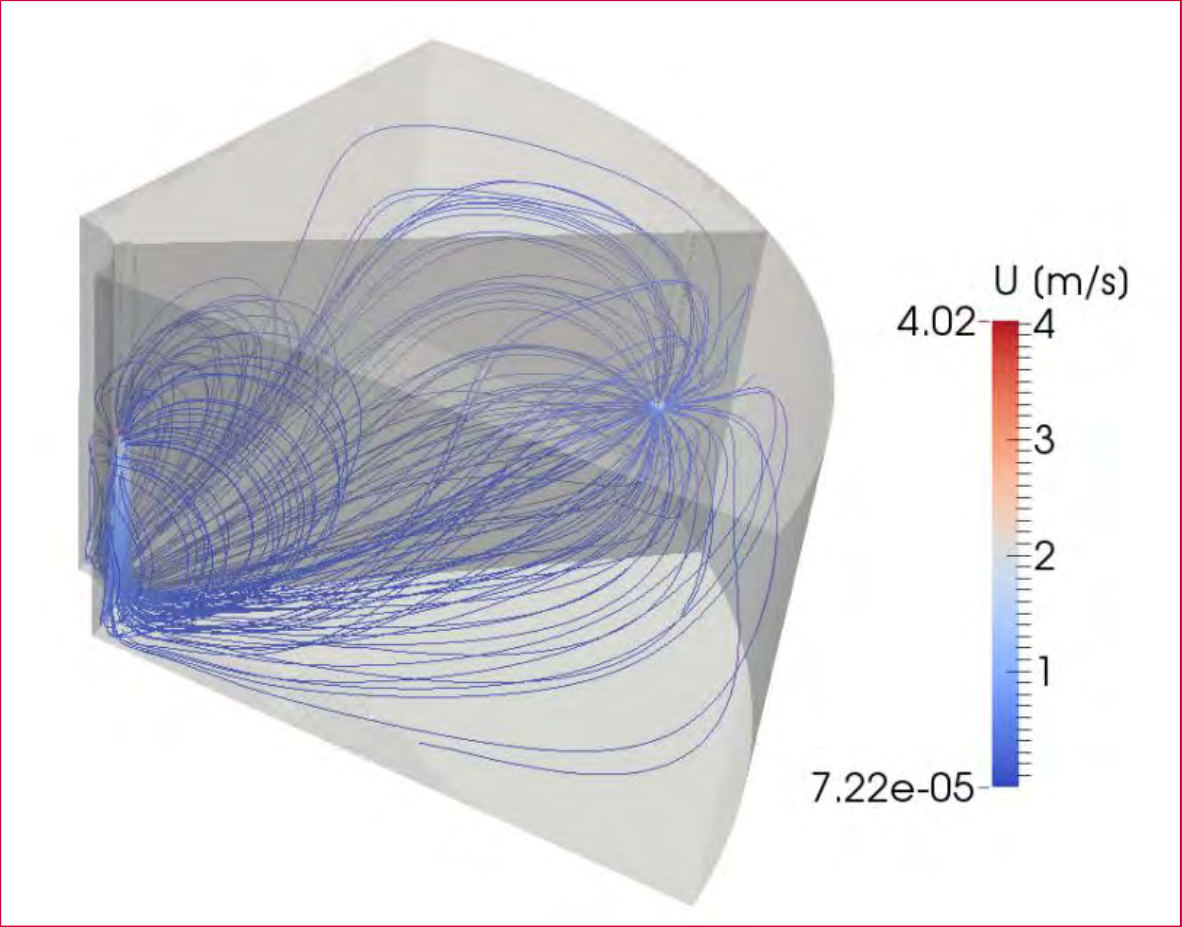


Abbildung 41 Temperatur der injizierten Luft der Messung an allen 4 Injektoren, sowie das Polynom für die Eingangsdaten der Simulation.



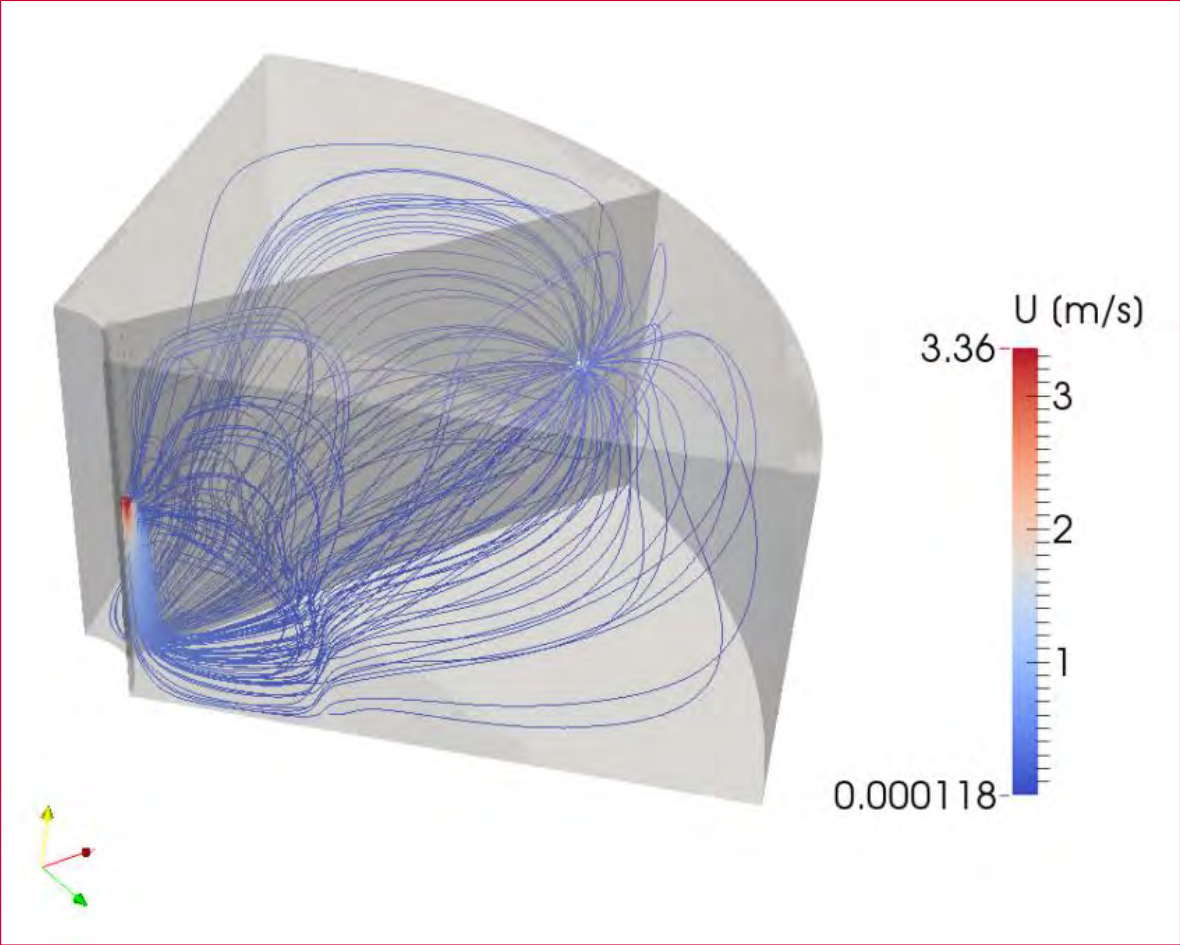
Die Abbildungen 42, 43 und 44 beschreiben die Bahnlinien des Strömungsfeldes. Diese sind mit dem Absolutwert der Geschwindigkeit eingefärbt. Zu Beginn bildet sich ein durchgetriebene Rückströmung entlang im inneren Bereich aus. Diese besitzt zu Beginn eine Geschwindigkeit von 0,4 m/s, welche im Laufe des Versuchs aufgrund der schlechteren Durchströmbarkeit des trockenen und pyrolysierten Bodens abnimmt. Zudem wird der Boden im unteren Bereich deutlich stärker durchströmt als im oberen Bereich. Jedoch konnte beim Ausbringen des Bodens nach dem Versuch das Gegenteil beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung ist, dass das Modell die Verdichtung des Bodens durch sein Eigengewicht nicht berücksichtigt.

Abbildung 42 Bahnlinien des Strömungsfeldes der Luftinjektion nach 17 Minuten



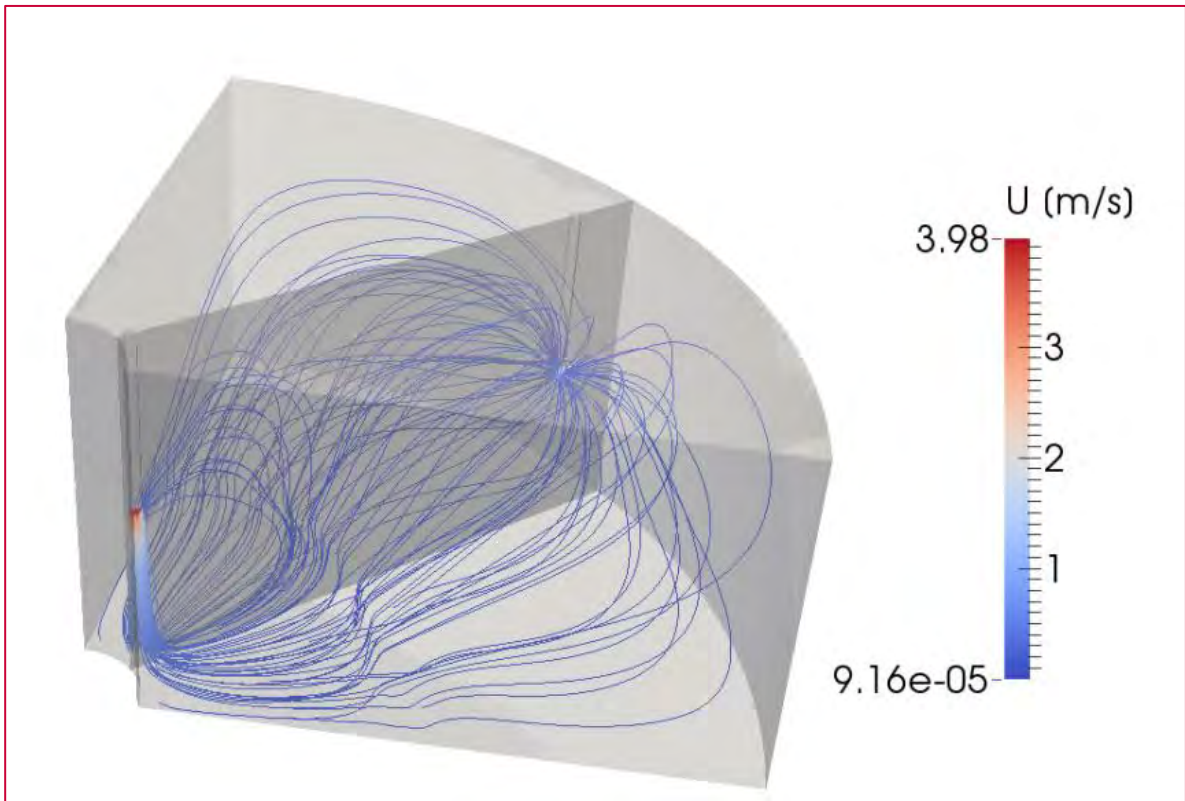
Die Bahnlinien sind mit der Farbgebung der Geschwindigkeit U eingefärbt.

Abbildung 43 Bahnlinien des Strömungsfeldes der Luftinjektion nach 333 Minuten



Die Bahnlinien sind mit der Farbgebung der Geschwindigkeit U eingefärbt.

Abbildung 44 Bahnlinien des Strömungsfeldes der Luftinjektion am Versuchsende (583 Minuten)



Die Bahnlinien sind mit der Farbgebung der Geschwindigkeit U eingefärbt.

In den Abbildungen 45, 48 und 51 ist das Temperaturprofil zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Dieses wird primär durch die Konvektion getrieben, sodass der Widerstand durch die Wärmeleitfähigkeit des trockenen bzw. pyrolysierten Bodens weitgehend umgangen werden kann. Die Konvektion stellt hierbei einen effektiven Ansatz zur Lösung des beobachteten Effektes des „Wärmeübergangs im Ringspalt“ dar.

Da die Verdunstung des Wassers primär vom Wärmestrom getrieben wird, folgt diese ebenfalls dem konvektiven Strömungsfelds. Die spezifische Masse an flüssigem Wasser ist in den Abbildungen 46, 49 und 52 dargestellt. Im Vergleich zum Versuch 1 mit identen Lanzentemperaturen, ergibt sich ein wesentlich größerer trockener Bereich, welcher sich durch die Strömung primär am Boden des Reaktors ausbildet. Ein identes Bild zeigt sich bei der Pyrolyse (Abbildungen 47, 50, 53). Auch hier dominierte die Konvektion.

Abbildung 45 Temperaturfeld, Versuch 4 nach 167 Minuten

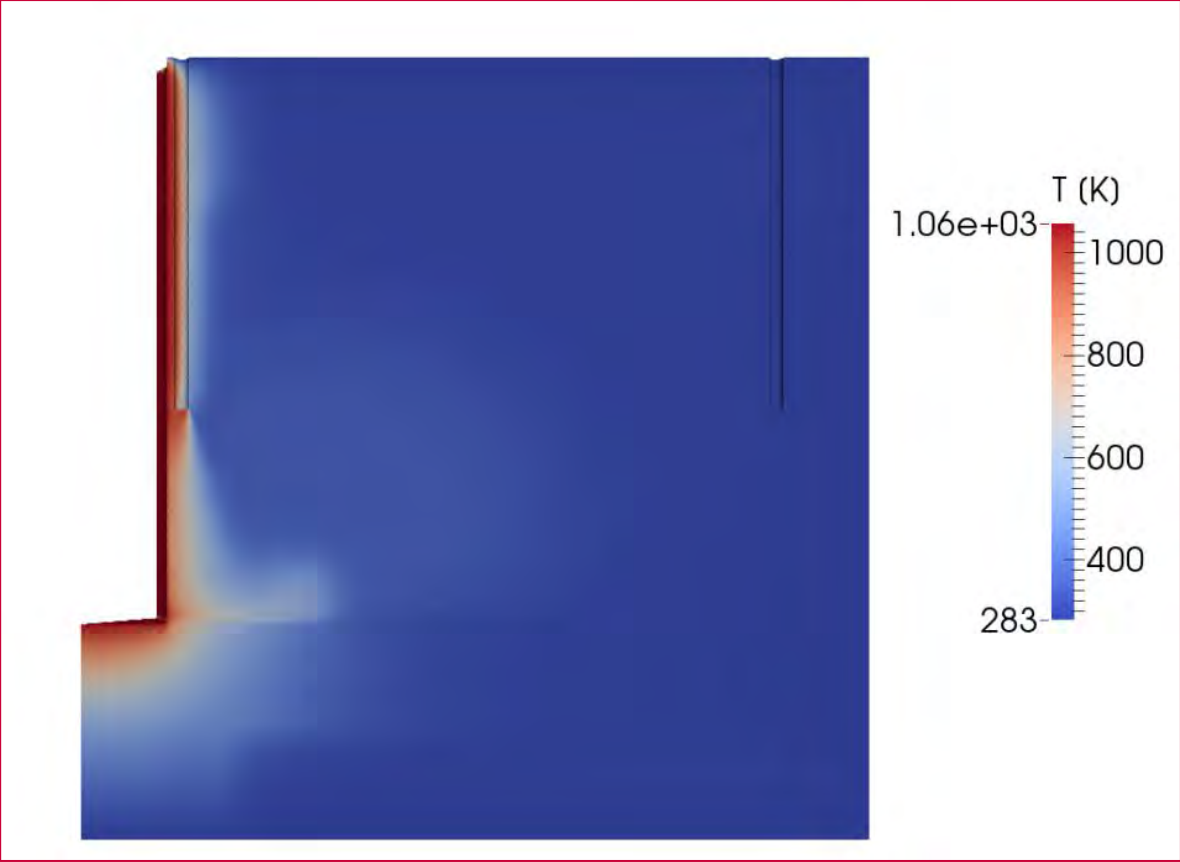


Abbildung 46 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 4 bei 167 Minuten

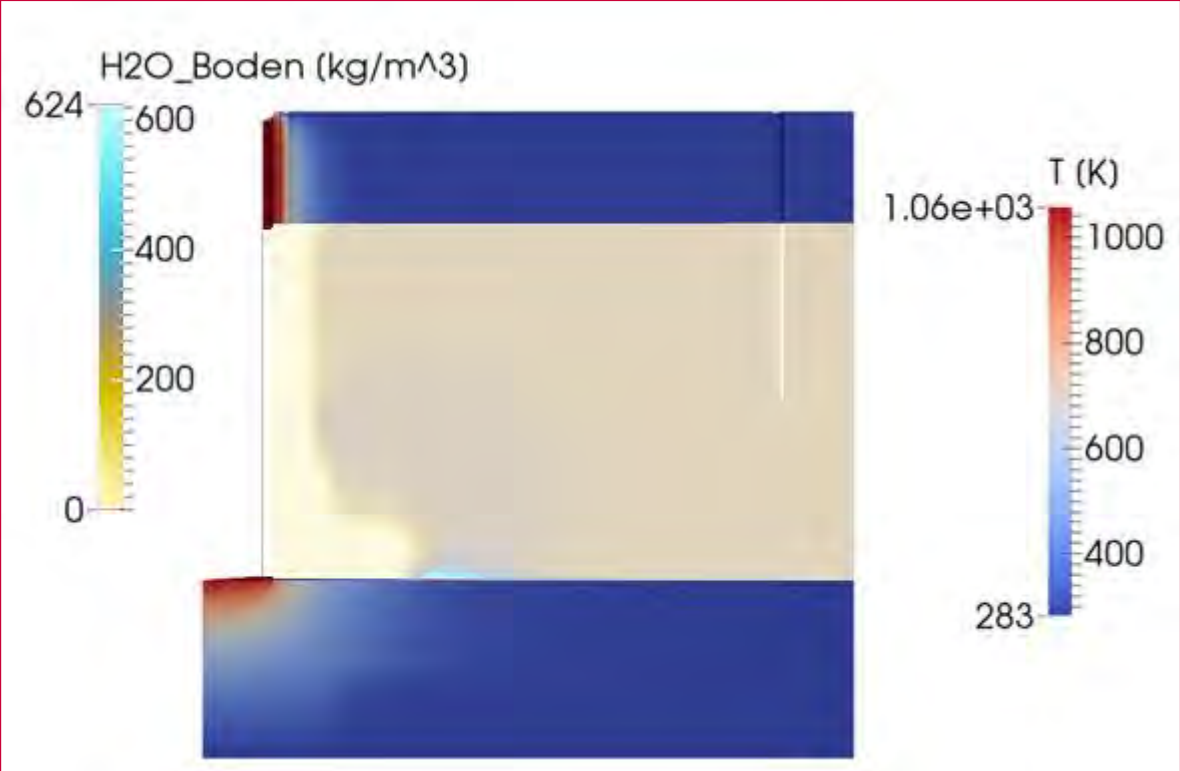


Abbildung 47 Spezifische Masse Organik, Versuch 4 nach 167 Minuten

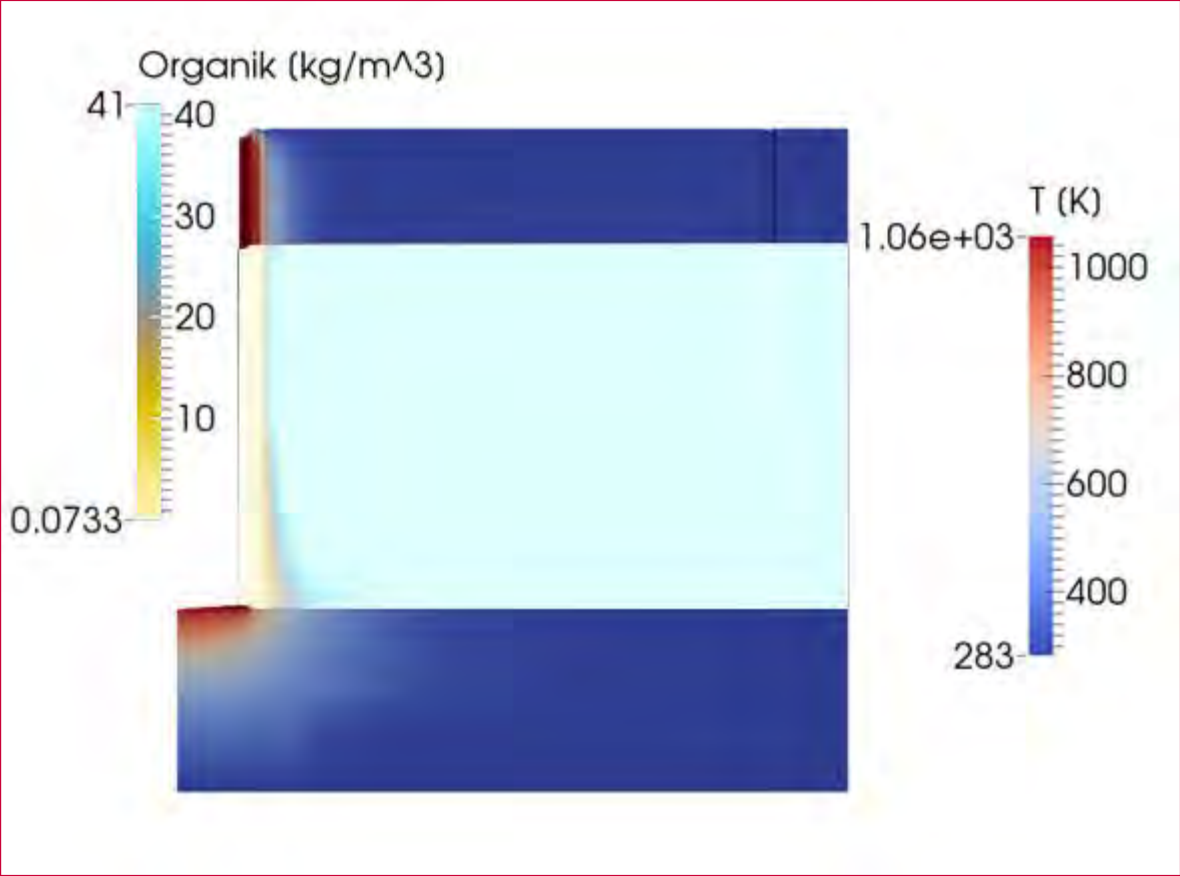


Abbildung 48 Temperaturfeld, Versuch 4 nach 333 Minuten

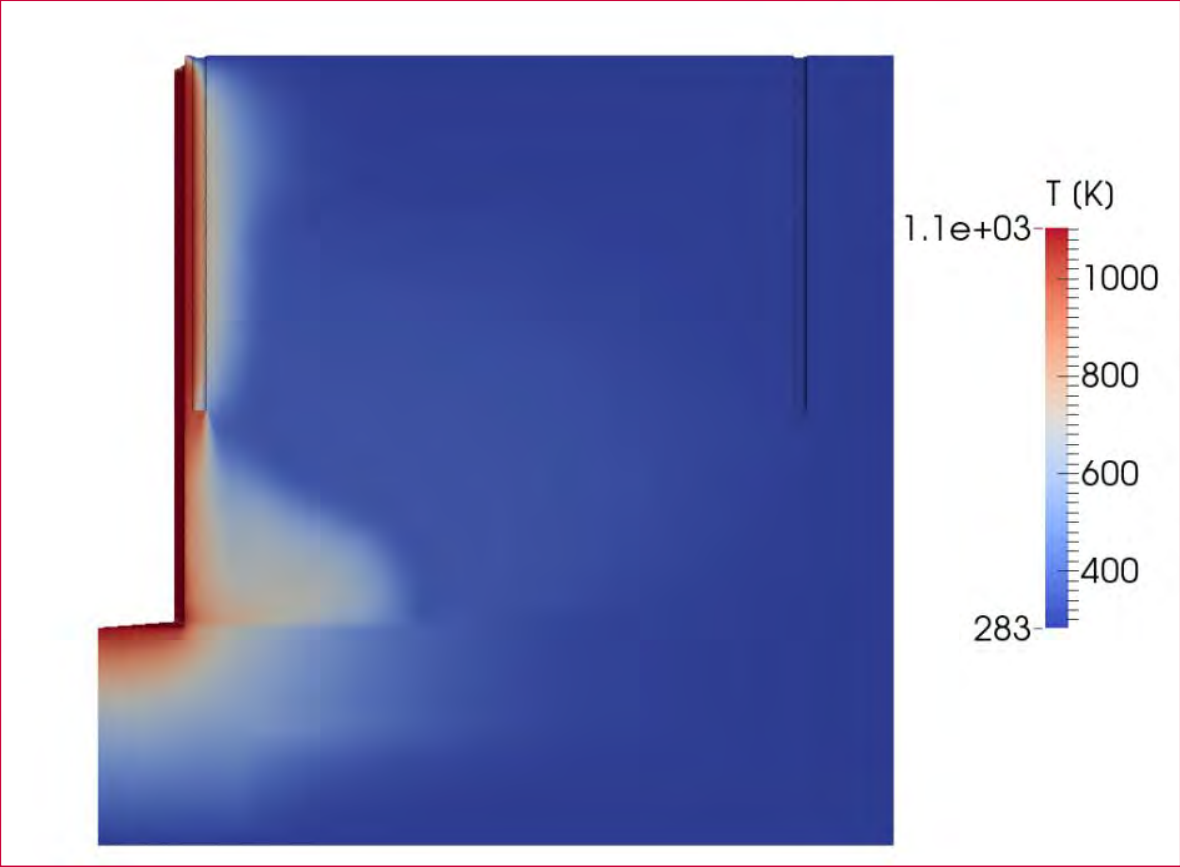


Abbildung 49 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 4 nach 333 Minuten

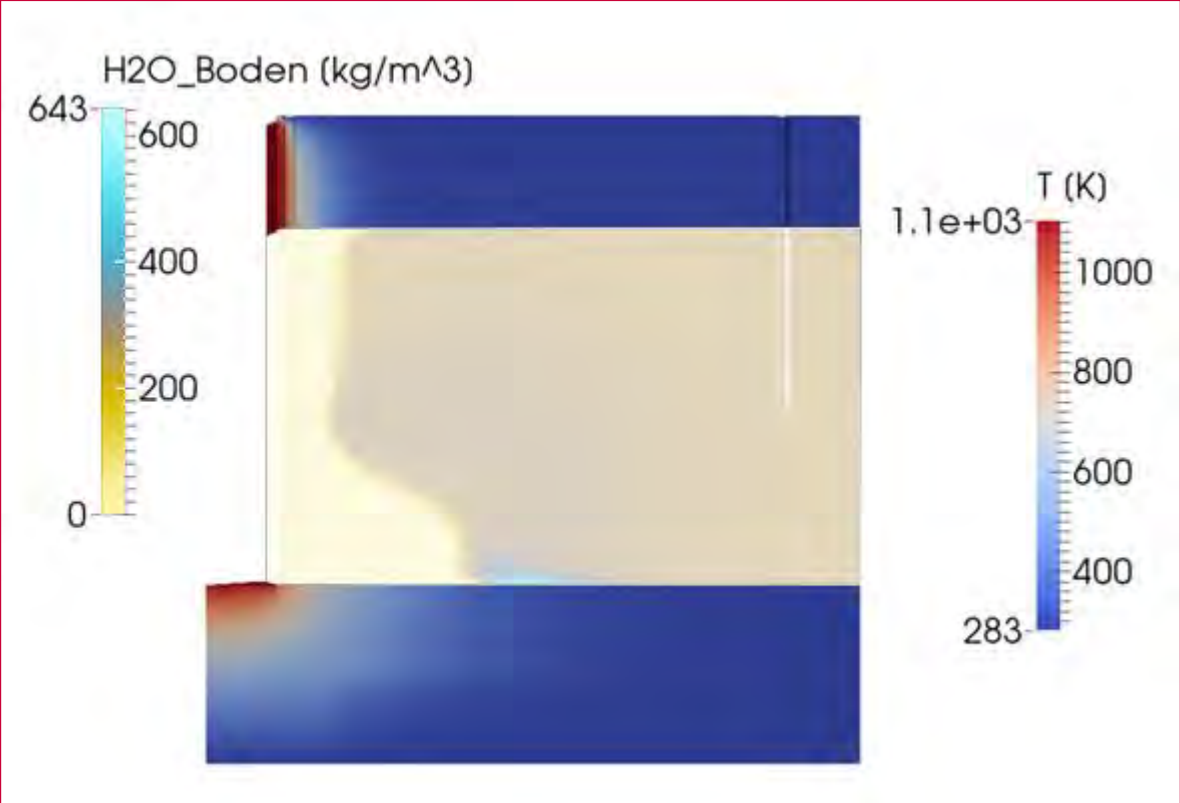


Abbildung 50 Spezifische Masse Organik, Versuch 4 nach 333 Minuten

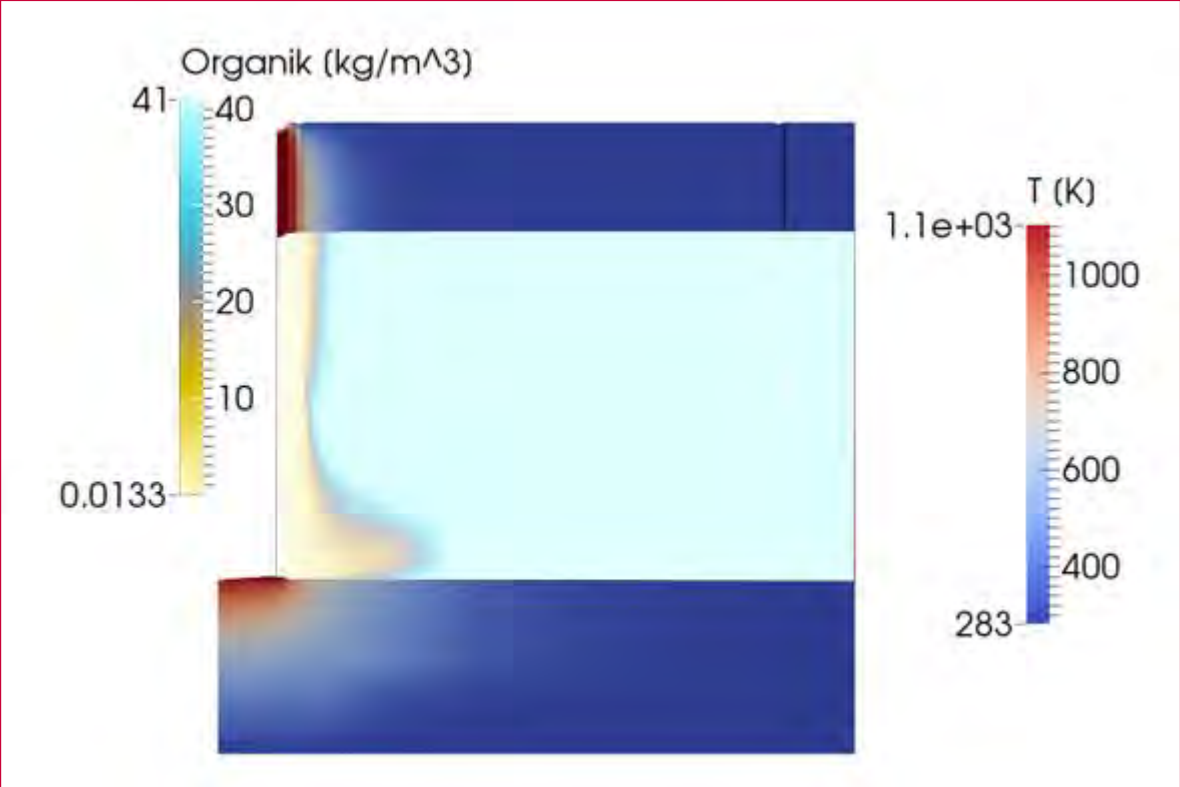


Abbildung 51 Temperaturfeld, Versuch 4 beim Versuchsende (583 Minuten)

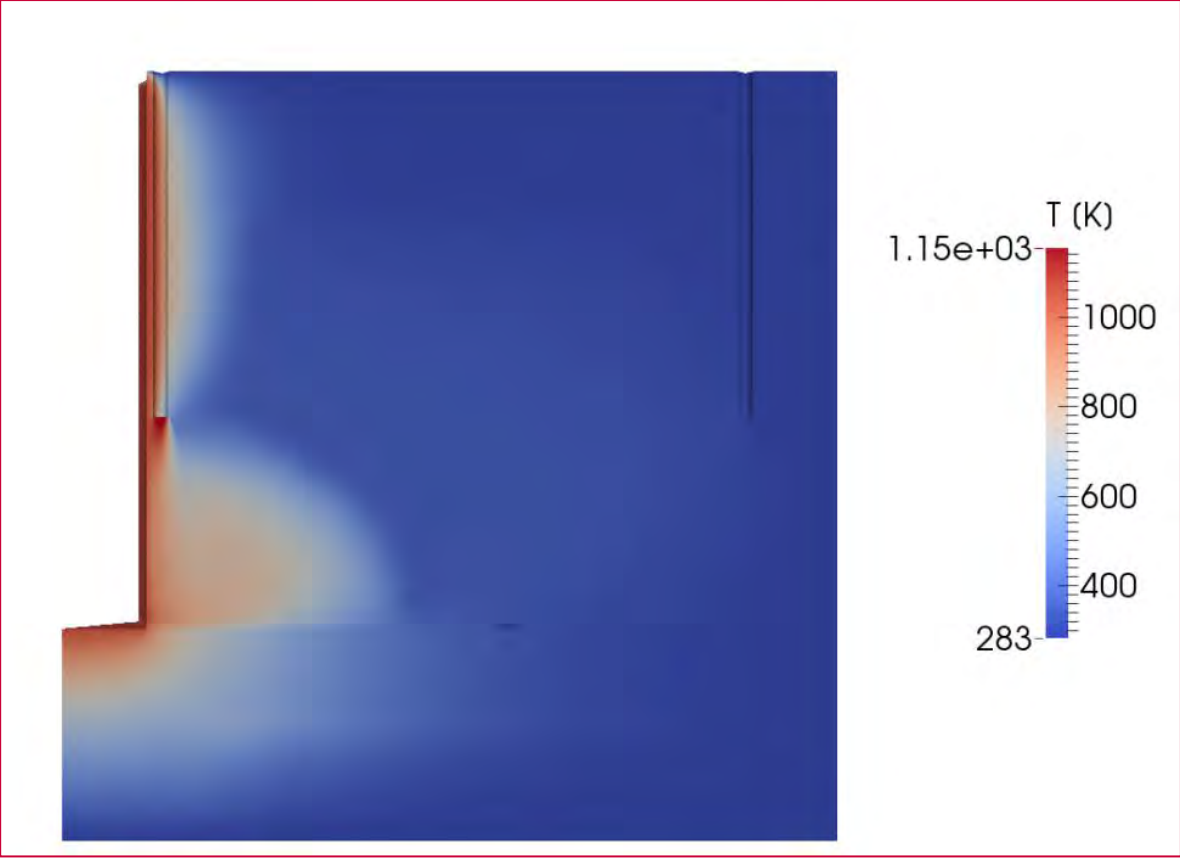


Abbildung 52 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 4 bei Versuchsende (583 Minuten)

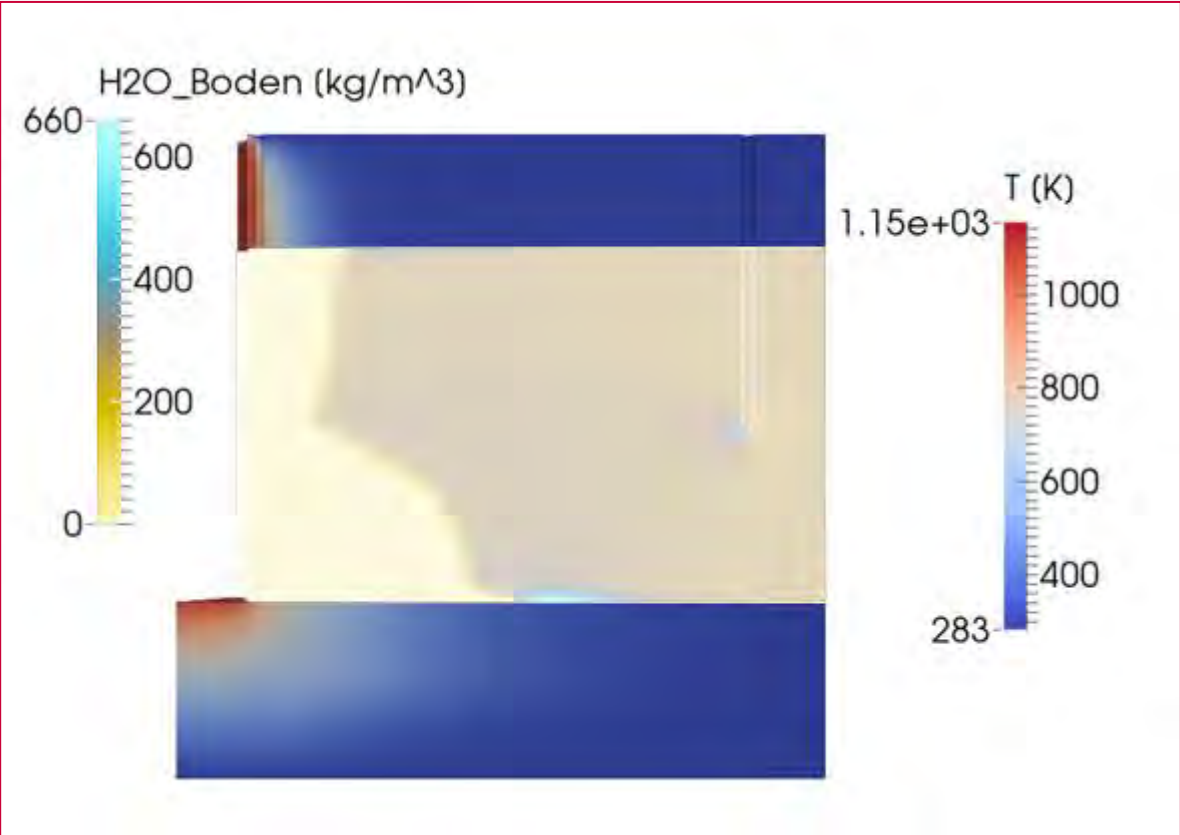
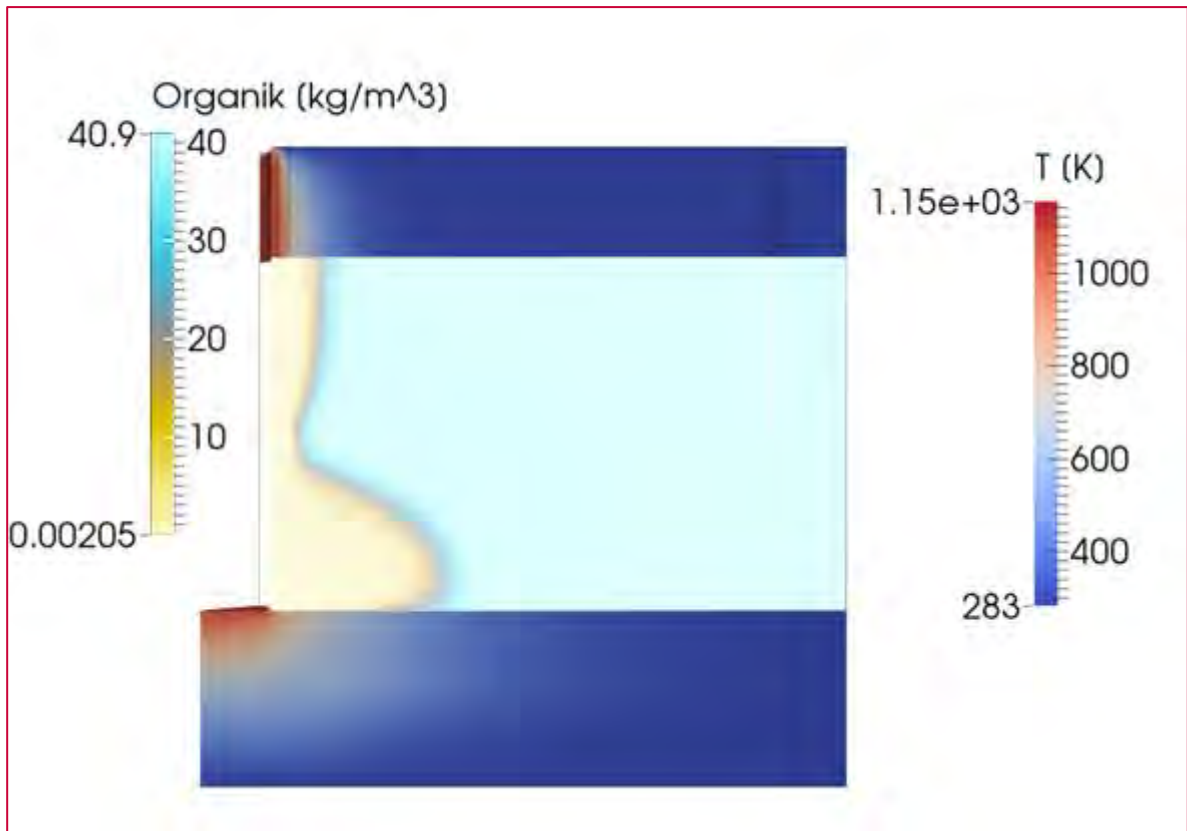


Abbildung 53 Spezifische Masse Organik, Versuch 4 bei Versuchsende (583 Minuten)



Beim Vergleich der Messdaten aus dem Laborversuch mit dem Modell (Abbildungen 54, 55 und 56) zeigt sich, dass die Erwärmung im Versuch deutlich schneller voranschreitet als im Modell. Der Wärmetransport erfolgt primär über Konvektion, allerdings tritt im Modell in der Mitte des Reaktors, wo sich die Messfühler befinden, eine sehr geringe Strömungsgeschwindigkeit bzw. im Fall der ersten Messstelle (Abbildung 54) sogar eine Rückströmung vom Boden auf.

Abbildung 54 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 4 an der ersten Messstelle (\varnothing 320 mm).

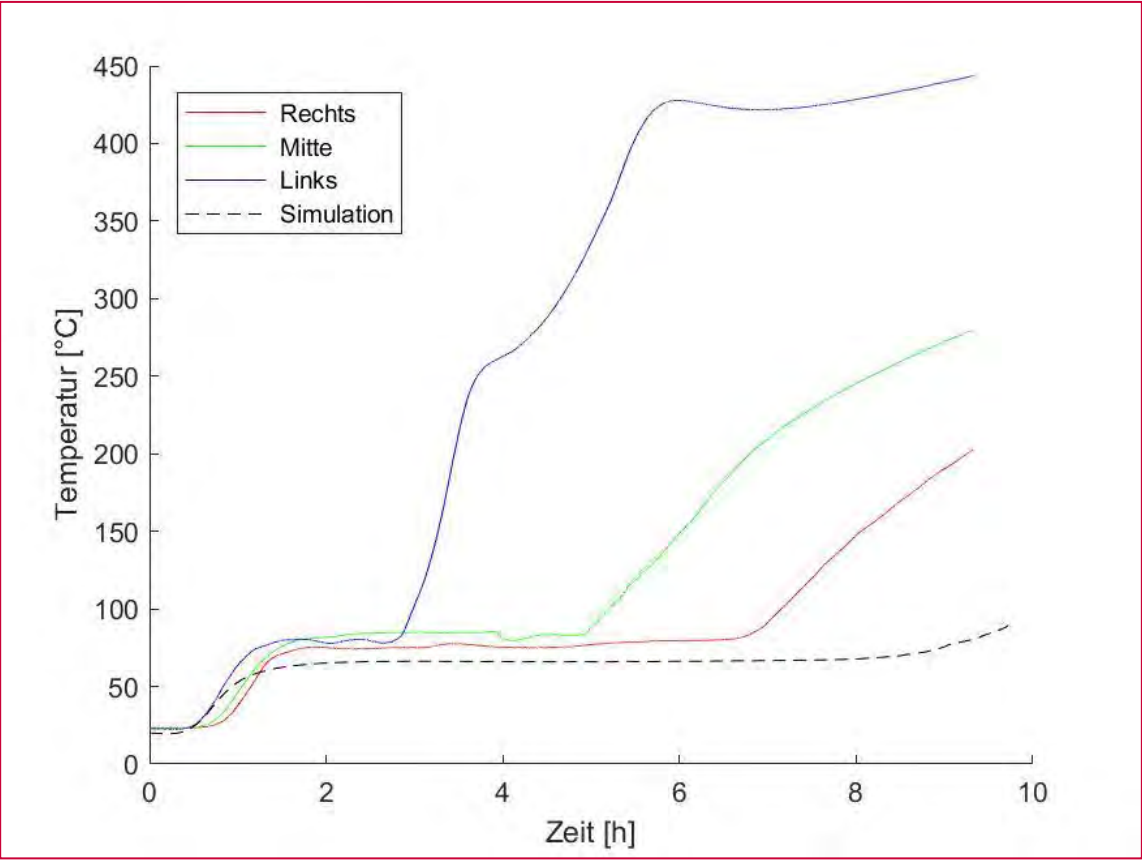


Abbildung 55 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 4 an der zweiten Messstelle (\varnothing 520 mm).

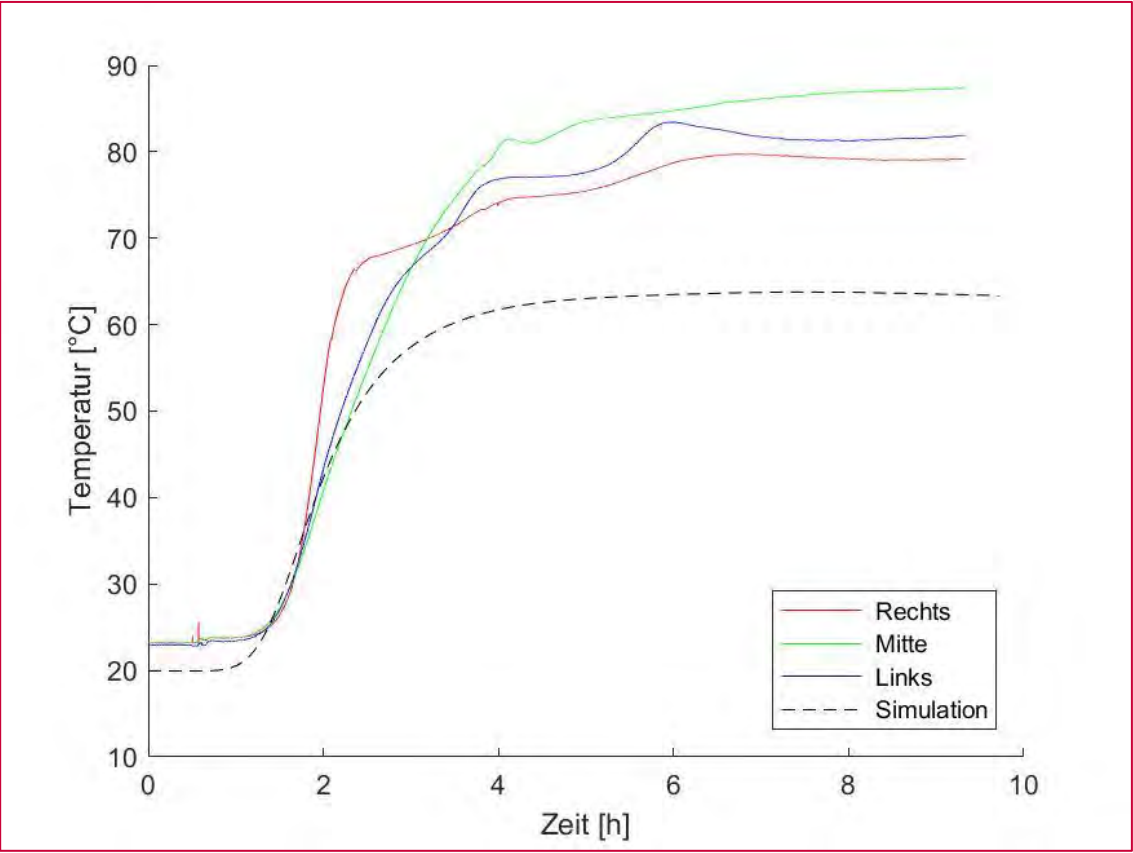
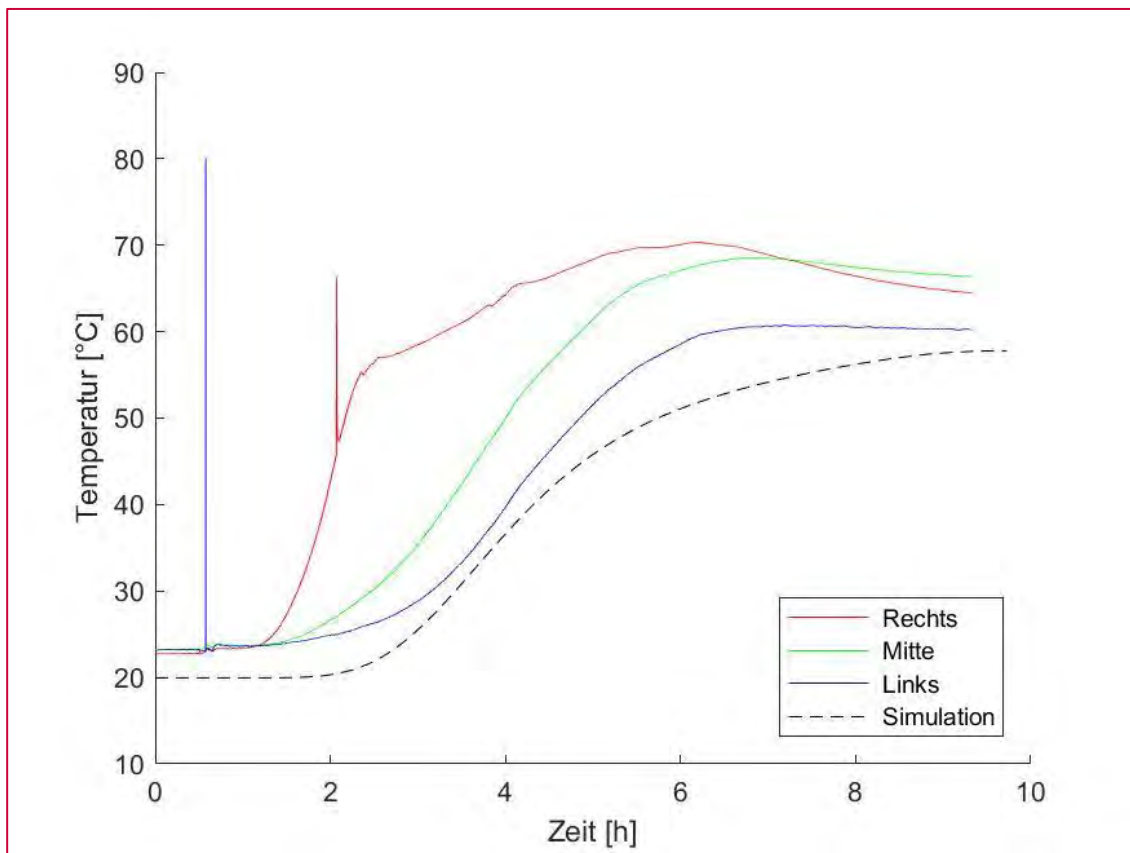


Abbildung 56 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 4 an der dritten Messstelle (\varnothing 720 mm).



Der getrocknete Bereich an der Oberfläche hatte im Versuch einen mittleren Durchmesser von 850 mm und der Bereich der Pyrolyse erstreckt sich von 370 mm bis 430 mm. Beim Ausbringen des Bodens konnte jedoch beobachtet werden, dass diese Bereiche sich nach unten verkleinern. Diese deutet auf eine konvektive Strömung nahe der Oberfläche hin. Im Modell ist der getrocknete Bereich mit einem Durchmesser von 280 mm und der pyrolysierte Bereich mit einem Durchmesser von 185 mm deutlich kleiner (Abbildung 57). Vergleicht man jedoch den gut durchströmten bodennahen Bereich (Abbildung 58) mit den Messdaten, so ergibt sich für den getrockneten Bereich einen Durchmesser von 595 mm. Der Bereich des Organikabbaus am Boden erstreckt sich von 300 mm bis 480 mm und nimmt 50 mm über den Boden sogar auf 515 mm zu.

Abbildung 57 Spezifische Masse flüssiges Wasser und Organik, Versuch 4 an der Oberfläche bei Versuchsende (583 Minuten)

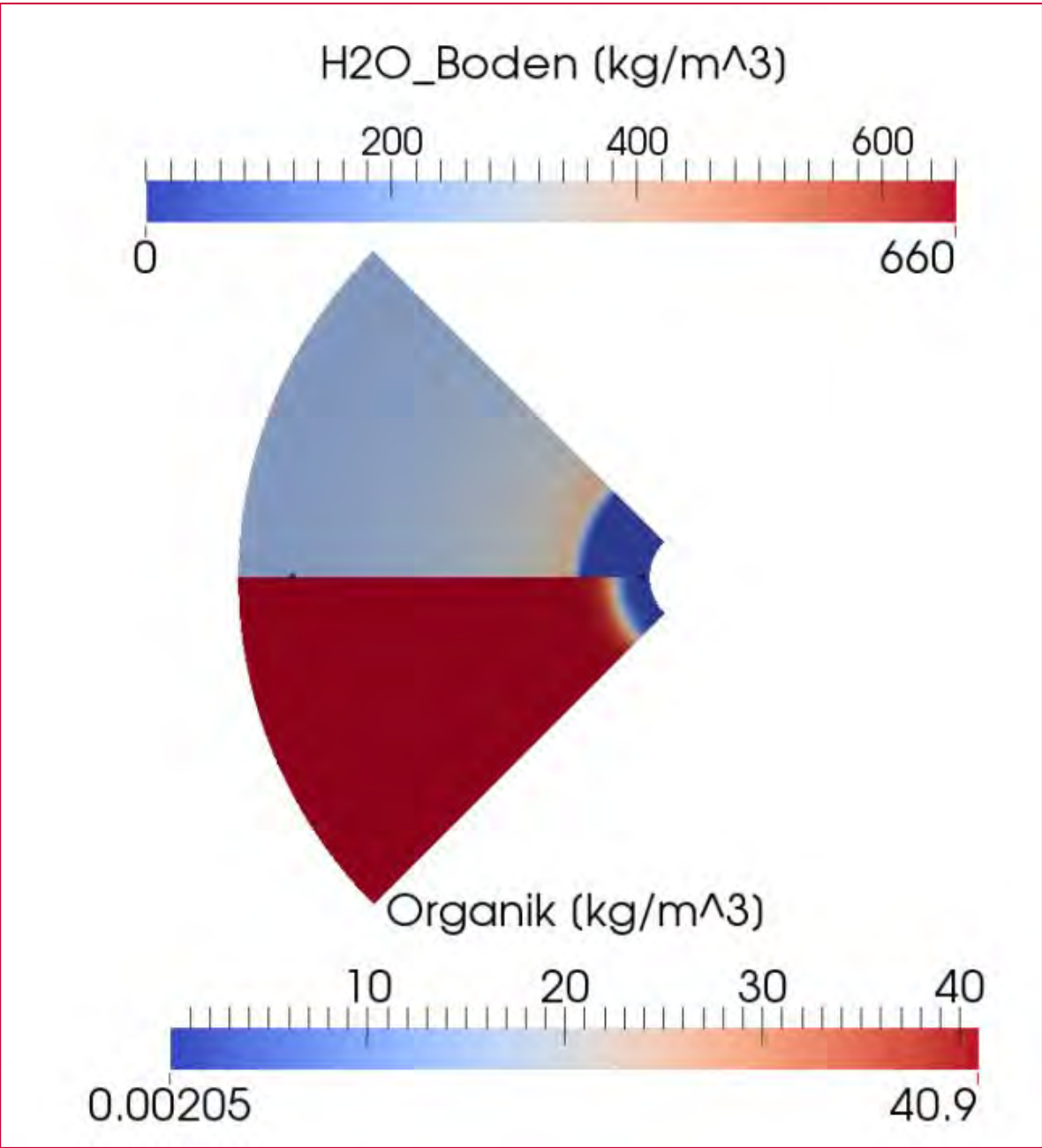
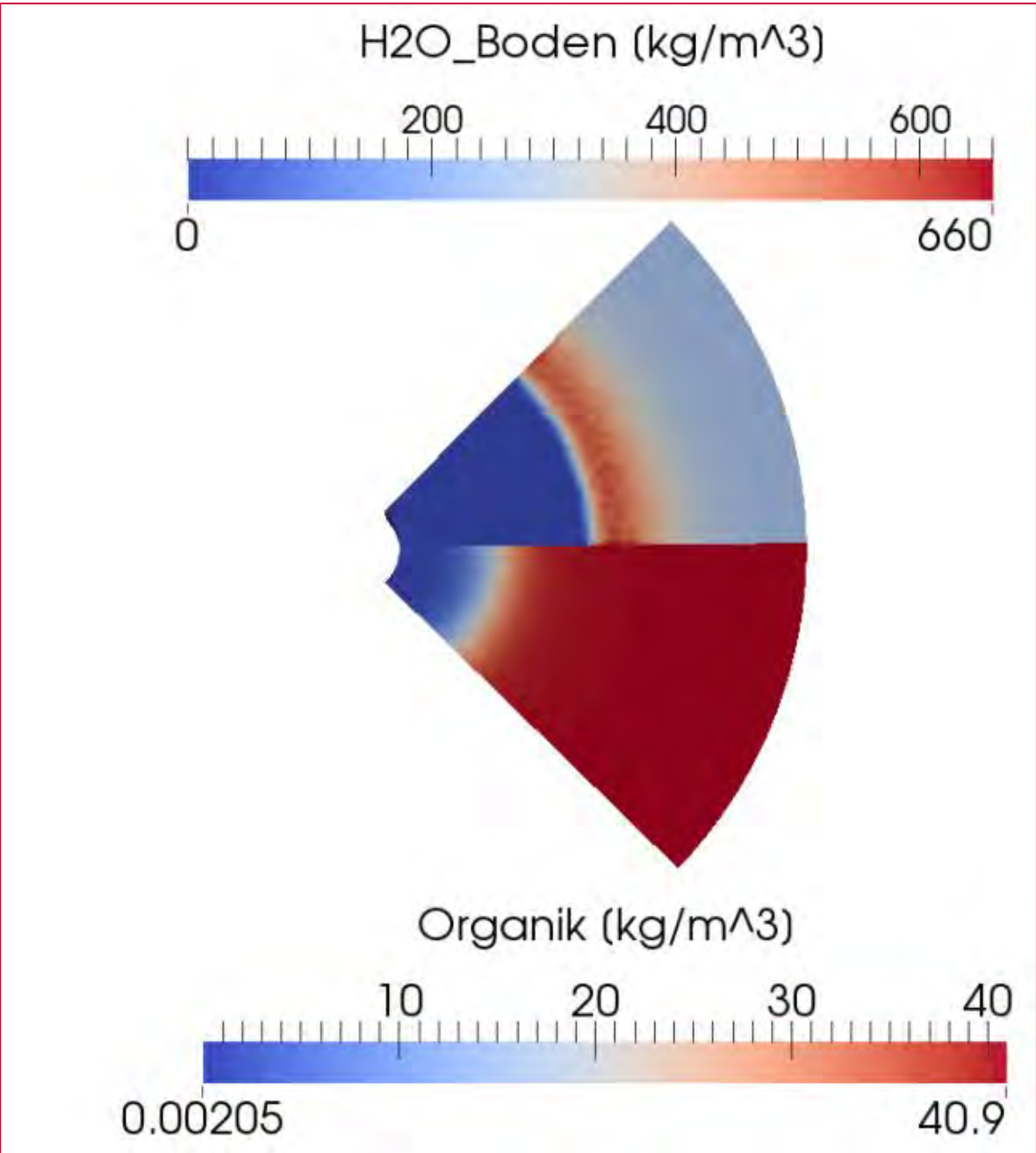


Abbildung 58 Spezifische Masse flüssiges Wasser und Organik, Versuch 4 am Boden bei Versuchsende (583 Minuten)



2.1.6 Modell für das Planungstool

Das Modell, das im neu konzipierten Planungstool (Kap. 3) verwendet wird, geht von wesentlichen Vereinfachungen aus, soll aber trotzdem brauchbare Ergebnisse liefern. Grundsätzlich dient das Modell zur Auslegung und besseren Abschätzung der Betriebsdauer von Sanierungsvorhaben.

In diesem Abschnitt wird ein vereinfachter Ansatz zur Modellierung des Wärmetransports beschrieben. Anschließend werden die mit dem vereinfachten Modell errechneten Daten mit den Daten aus den Laborversuchen verglichen.

Eine detailliertere Beschreibung zur Implementierung des Wärmetransportmodells in das Planungstool ist in Kap. 3.1 aufgeführt.

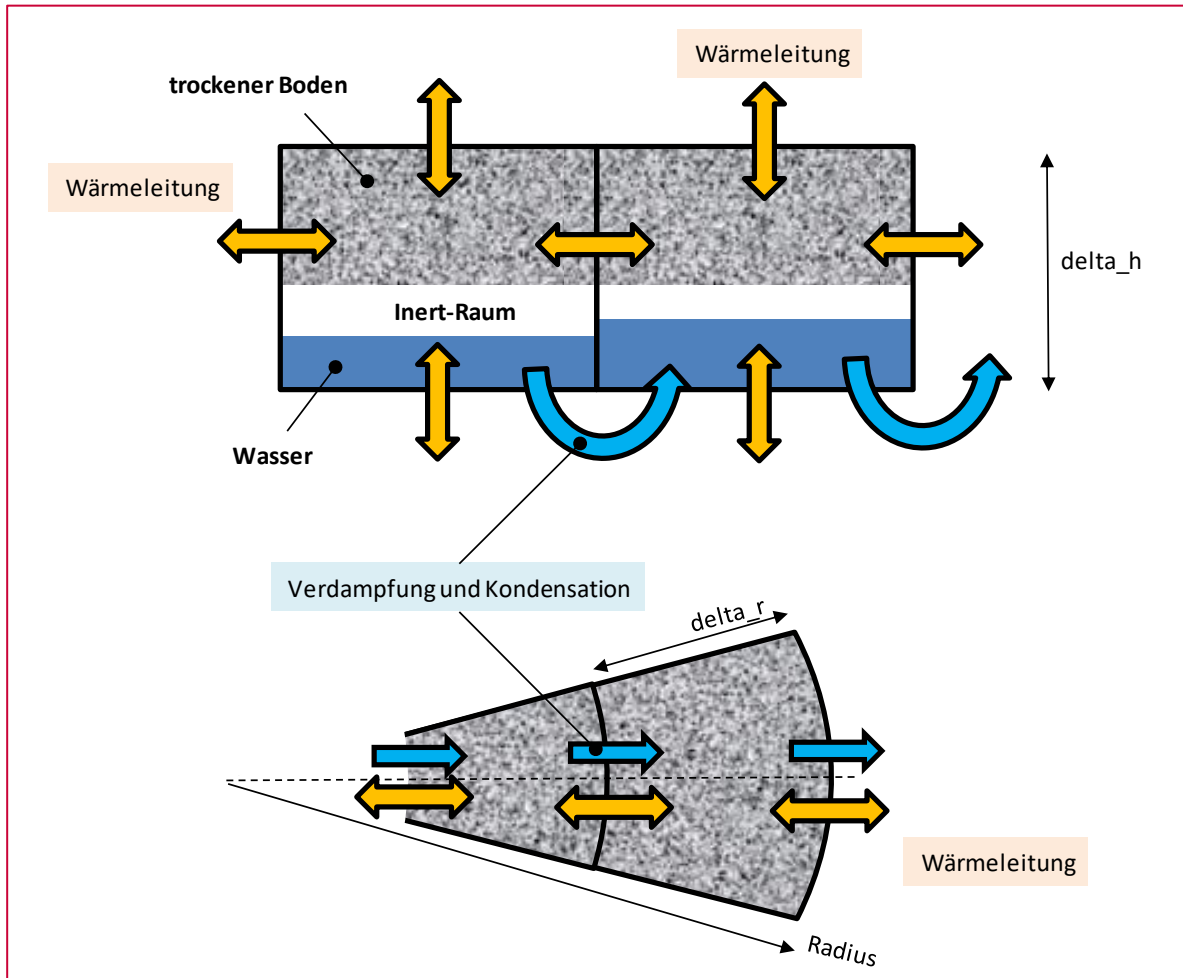
Der Ansatz unterteilt den Modellraum in drei Teilbereiche. Der Boden wird als trockener Boden mit einer Dichte von 880 kg/m^3 angesetzt. Zudem enthält der Raum einen Anteil an Wasser, welcher sich je nach Bedingungen und Zuständen ändert (Startfeuchte von 0,234 Vol%). Den zur Änderung des Wasseranteils notwendigen Raum stellt ein angesetzter „inert“ Raum zur Verfügung, welcher nicht am Wärmetransport teilnimmt.

Der Wärmetransport findet zum Teil durch Wärmeleitung statt und wird durch den Wärmestrom des verdampfenden und kondensierenden Wasseranteils ergänzt. Es wird von vollständiger Kondensation in der „Nachbarzelle“ ausgegangen und die zwei Anteile (trockener Boden und Wasser) befinden sich ansatzmäßig im thermischen Gleichgewicht.

Im Planungstool wird dieser Ansatz um einen „quasistationären“ Gasströmungsanteil erweitert, um die Luftinjektion und Luftabsaugung einzubinden. Somit kann der verdampfende und kondensierende Wasseranteil auch anteilmäßig auf die umliegenden Zellen aufgeteilt werden. Das Planungstool arbeitet mit einem kartesischen Koordinatensystem und Gitter. Für den Versuchsaufbau wurde hier ein rotationssymmetrischer Bereich angesetzt, in welchem vereinfacht nur eine „Verdampfungsrichtung“ (radial von innen nach außen) vorliegt. Die konduktiven Wärmeströme werden sowohl radial als auch axial gerechnet. Die Berechnungen für den Modellansatz zum Versuchsaufbau wurden in MS Excel als explizit mit angepasster Schrittweite ausgeführt.

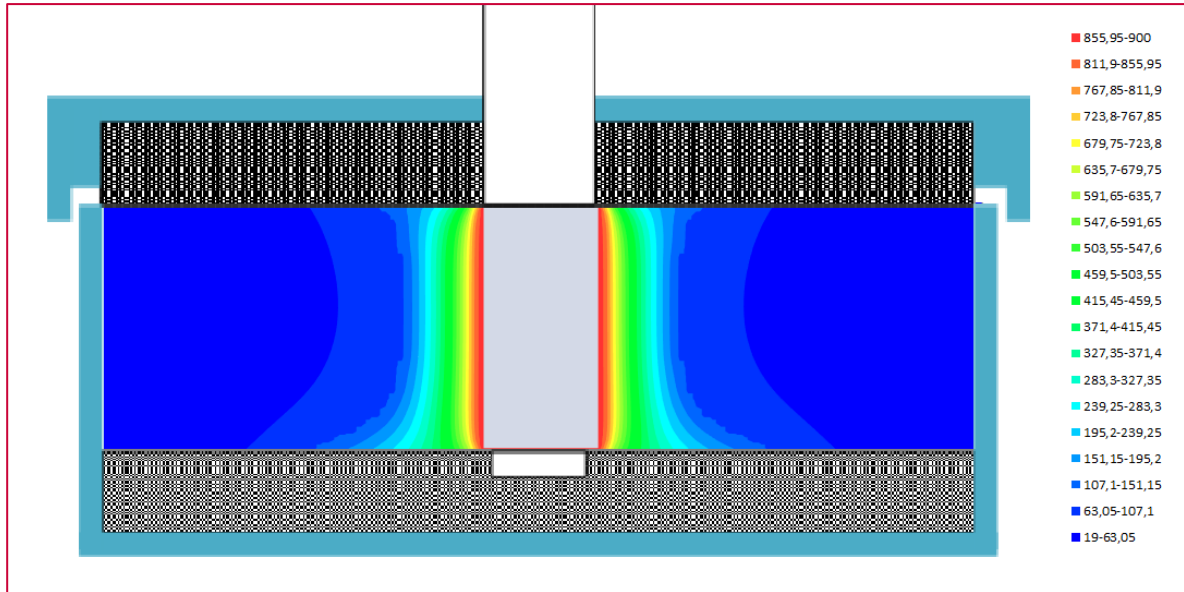
Das Konzept des vereinfachten Modells mit der Nachbildung des Versuchsaufbaus als ein 2-dimensionaler rotationssymmetrischer Ansatz ist in Abbildung 59 dargestellt. Die Zellabmessungen (Δh und Δr) sind bei den Berechnungen mit 10 mm konstant.

Abbildung 59 Konzept für das vereinfachte Modell.



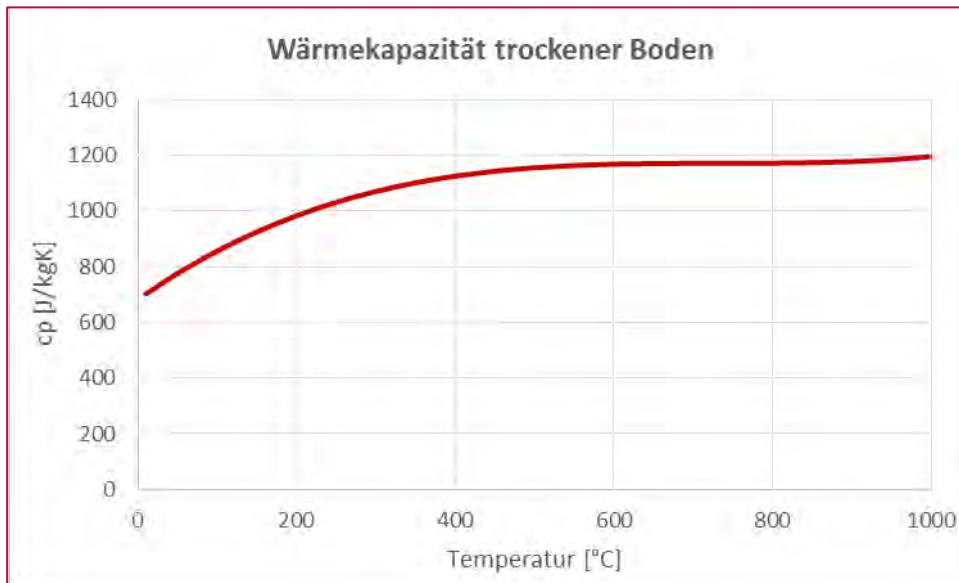
Für eine Überprüfung der vereinfachten Ansätze wurden die Messdaten aus dem Versuch 3 (900°C) verwendet. Hier treten die Wärmetransportvorgänge bis hin zur gesamten Trocknung im Messbereich auf. In Abbildung 60 ist die Temperaturverteilung für den vereinfacht nachgebildeten Versuchsaufbau dargestellt.

Abbildung 60 Temperaturverteilung mit dem vereinfachten Modell.



Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens setzt sich aus der des trockenen Bodens (0,08 W/mK) und anteilmäßig aus der des lokal vorliegenden Wassers (0,6 W/mK) zusammen. Die Wärmeleitfähigkeiten und die Wärmekapazitäten (Abbildung 61) wurden für jeden Rechenschritt temperaturabhängig gerechnet.

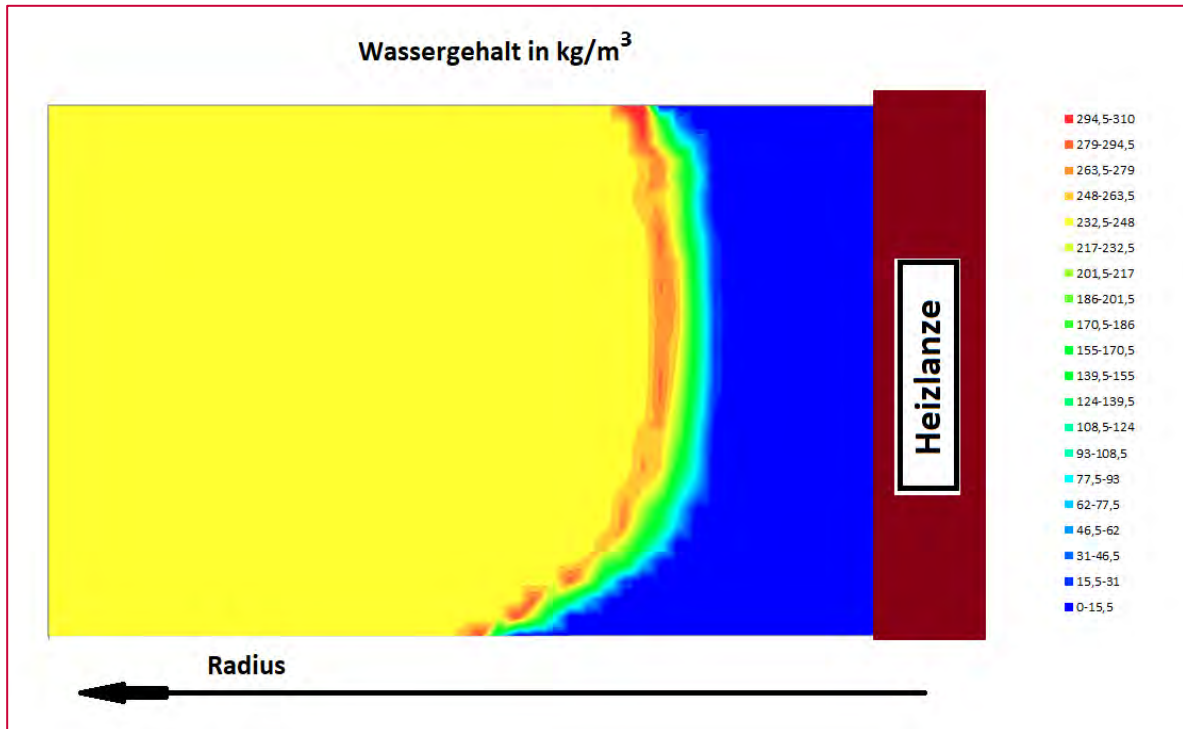
Abbildung 61 Temperaturabhängige Wärmekapazität des trockenen Bodens.



Aufgrund der vergleichsweise guten Wärmeleitfähigkeit des Feuerfestbetons (hier mit 1 W/mK angesetzt) wird der höhenmäßig untere Bereich etwas besser erwärmt als der

mittlere. Auch die Verteilung des Wassergehalts über die Höhe im Boden (Abbildung 62) zeigt ein leichtes „Vorausseilen“ der Trocknung im Bodenbereich des Versuchsaufbaus.

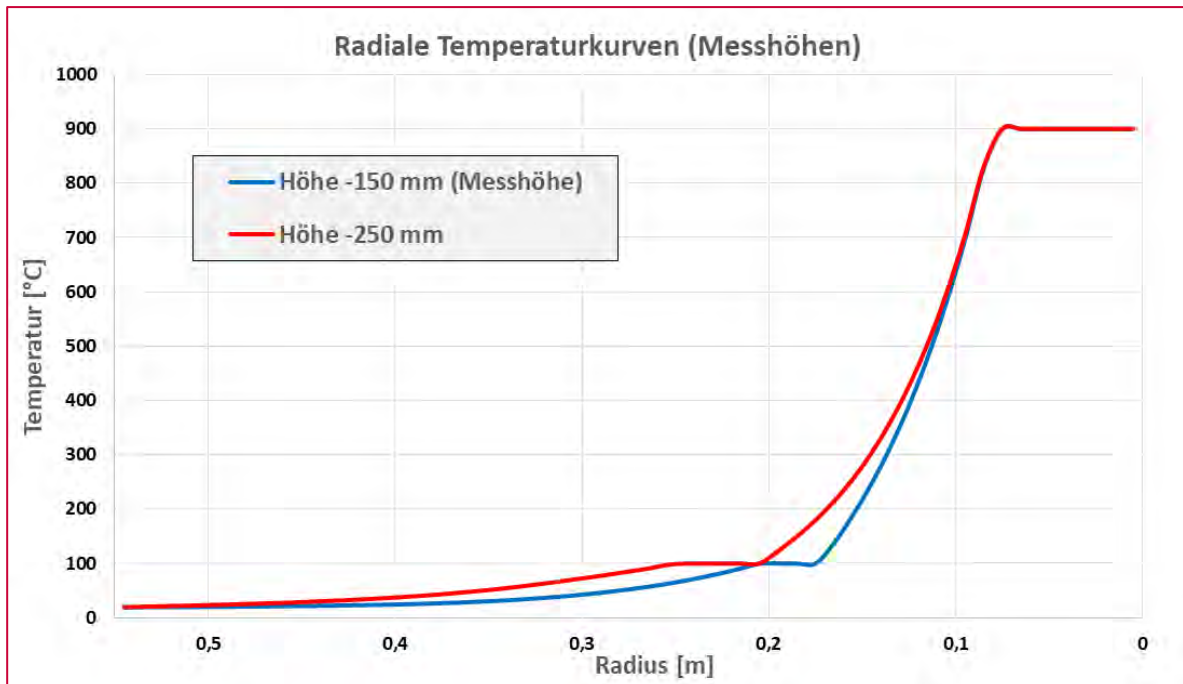
Abbildung 62 Verteilung vom Wassergehalt mit dem vereinfachten Modell.



Im Ansatz wird von einer vollständigen Kondensation des verdampften Wassers in der nächsten Zelle ausgegangen. Bei Verwendung dieses Ansatzes im Planungstool ist zu beachten, dass die Zellgröße des Planungstools (mit derzeit 0,5 m) wesentlich größer ist als die für den Versuchsaufbau verwendete Zellgröße von 10 mm. Bei kleinen Zellgrößen ist das angesetzte thermische Gleichgewicht zwischen Boden und kondensierendes Wasser aus der „Nachbarzelle“ nicht ganz erfüllt. Die „thermische Wirkweite“ des Dampfes ist vermutlich etwas größer und somit auch der Wärmetransport in Kondensationsrichtung etwas besser.

Vergleicht man die errechneten radialen Temperaturkurven nach 11 Stunden (Abbildung 63) in der Höhe der Messstellen aus dem Versuch (-150 mm) und einer Höhe von -250 mm, so sieht man ein „Vorausseilen“ der unteren Temperaturkurve (rote Linie).

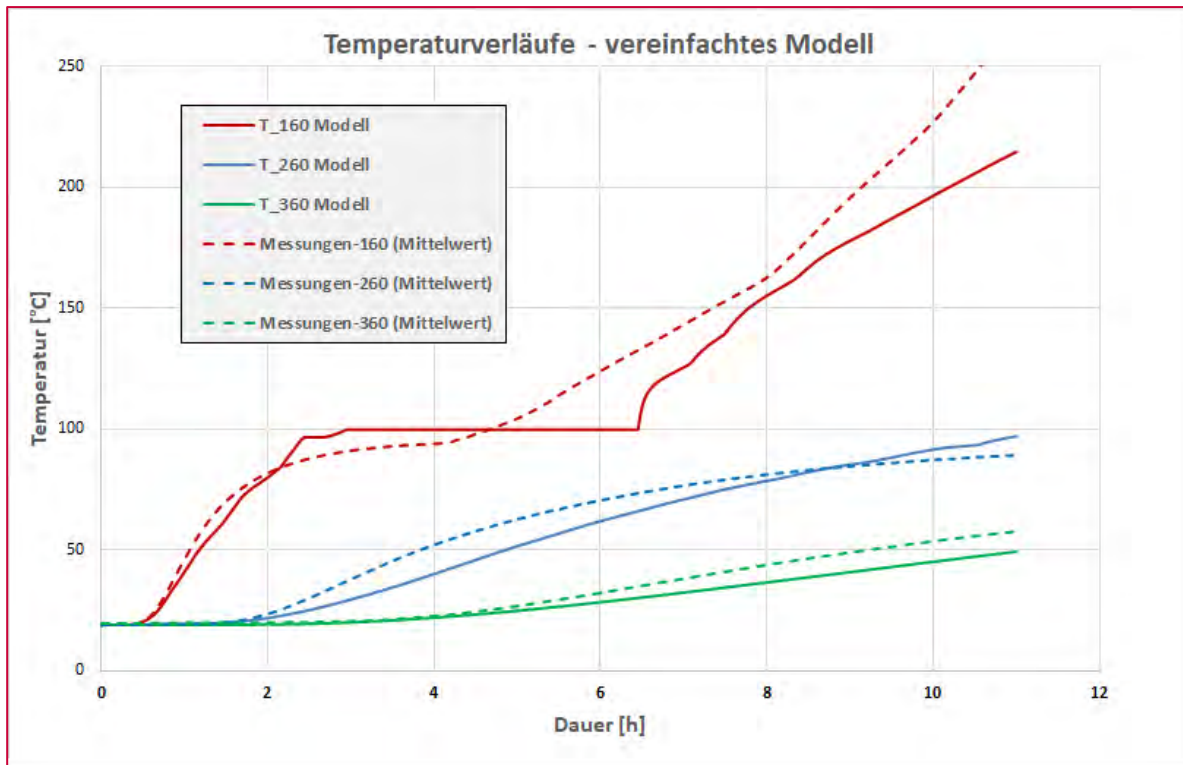
Abbildung 63 Temperaturkurven in unterschiedlichen Höhen.



Grundsätzlich variiert die Verteilung der Temperaturen im Laborversuch in Umfangsrichtung doch signifikant. Der zeitliche Temperaturverlauf für die Messstelle „Durchmesser 320“ zeigt abhängig von der Position (Mitte, Links und Rechts) eine abgeschlossene Trocknung (Temperaturanstieg über 100°C) nach etwa 4 Stunden bis über 10 Stunden (vergl. Abbildung 64). Für einen Vergleich mit dem vereinfachten Modellansatz wird hier jeweils ein Mittelwert der drei Positionen herangezogen.

Ein Vergleich der zeitlichen Temperaturverläufe aus den Messungen und den errechneten Werten mit dem vereinfachten Modell ist in Abbildung 64 ersichtlich. Für die Berechnungen wurden hier die Werte für die Höhe -250 mm angesetzt, um die Auswirkung des vereinfachten Ansatzes bezüglich des thermischen Gleichgewichts in den Zellen zu kompensieren. Die Größenordnung der errechneten Verläufe und das qualitative Verhalten der Trocknung zeigt eine gute Übereinstimmung im Verhältnis zu dem getroffenen vereinfachten Ansatz.

Abbildung 64 Temperaturverläufe mit dem vereinfachten Modell.



Die Abweichungen bezüglich des Ansatzes mit einem thermischen Gleichgewicht in den Zellen sollten bei Verwendung dieses Ansatzes im Planungstool (bedingt durch eine größere Zellgröße) keine wesentliche Größenordnung mehr haben.

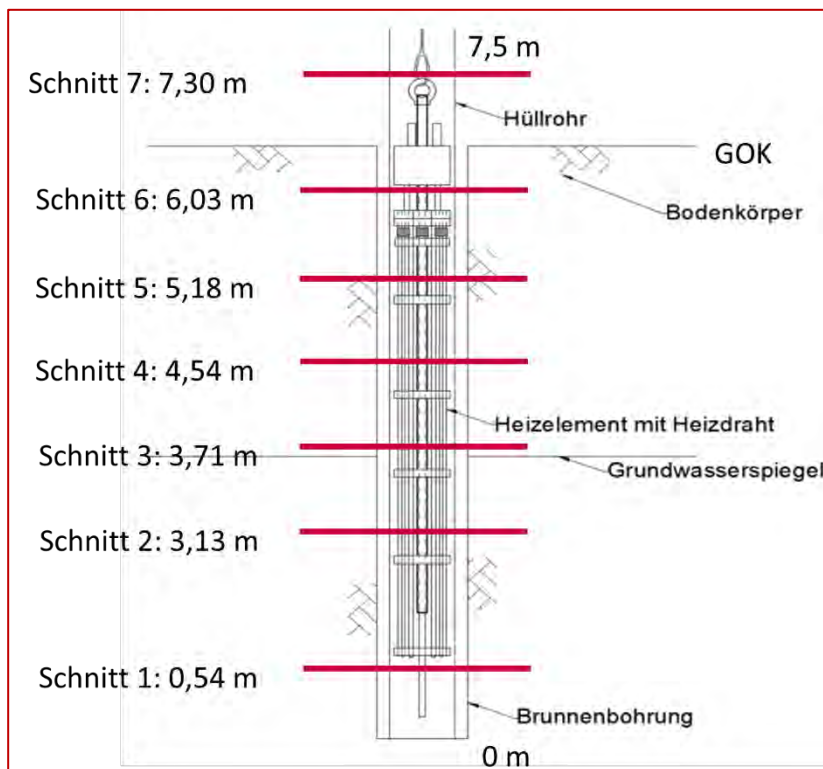
2.2 Optimierung des Lanzenmaterials für den Betrieb bei hohen Temperaturen in der ungesättigten Bodenzone

2.2.1 Untersuchung eines Hüllrohres aus dem Realbetrieb einer Heizlanze

Die im Projekt InnoBLA verwendeten Heizlanzen bestehen aus einem Heizelement mit Heizdrähten und einem Hüllrohr, in das das Heizelement eingesetzt und im Bodenkörper verbaut wird (Abbildung 65). Das Hüllrohr ist unten verschlossen, um das Eindringen von Bodenwasser bzw. Grundwasser zu verhindern.


Zur Optimierung des Hüllrohrmaterials ist ein tiefes Verständnis der beim aktuell eingesetzten Material auftretenden Korrosionsmechanismen erforderlich. Daher wurde ein Hüllrohr aus dem Realbetrieb einer Heizlanze ausgewählt und untersucht. Das untersuchte Hüllrohr bestand aus Edelstahl 304 (18 % Cr, 8 % Ni) und war in einer Anlage für ca. 4 Monate in Betrieb. Der Grundwasserspiegel lag bei 3,5-4 m.

Abbildung 65 Längsschnitt der Bohrung und des dort eingesetzten Hüllrohres mit den ausgewählten Schnitten für korrosionstechnische Untersuchungen



Es wurden in 7 unterschiedlichen Tiefen Rohrabschnitte entsprechend Abbildung 65 entnommen und weiter am Lehrstuhl für Allgemeine und Analytische Chemie der Montanuniversität Leoben untersucht. In Tabelle 4 sind die untersuchten Rohrproben wiedergegeben. Rohrabschnitt 7 ist metallisch blank und nicht angegriffen, die übrigen zeigen unterschiedlichen Angriff.

Tabelle 4 Makroskopische Bildaufnahmen der 7 Rohrabschnitte

Rohrabschnitt Nr.	Bildaufnahme
1	
2	
3	

Rohrabschnitt
Nr.

Bildaufnahme

4


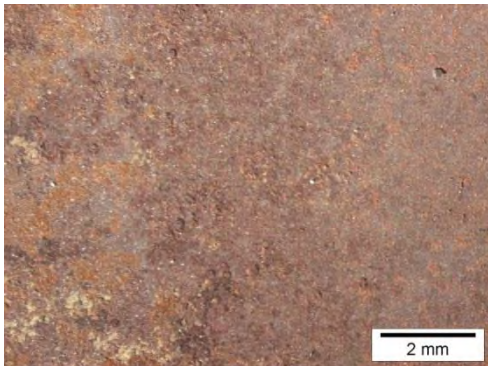


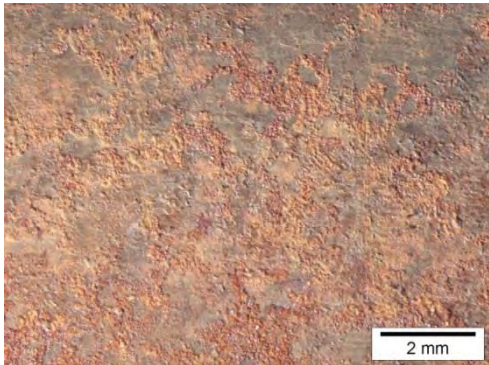
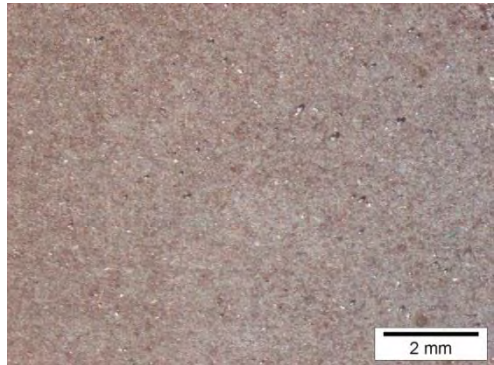
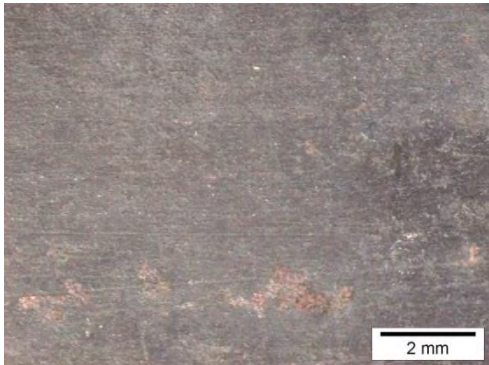
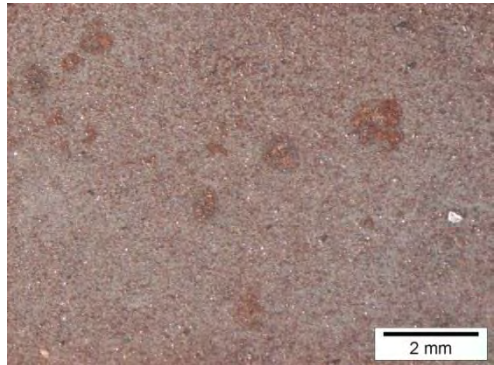
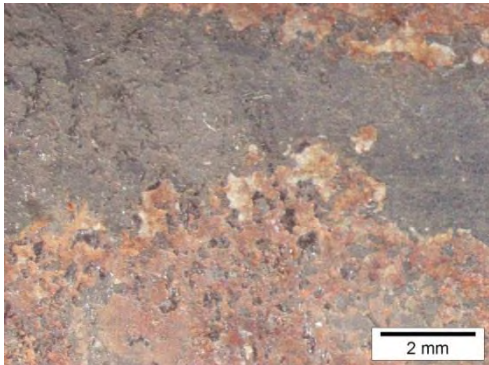
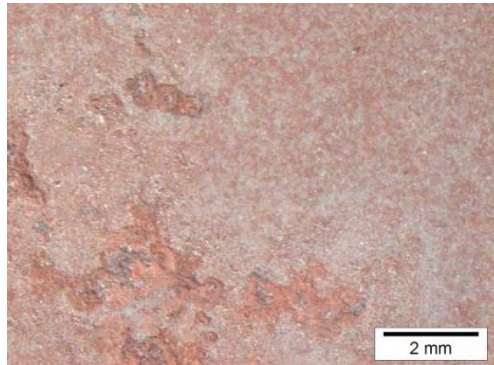
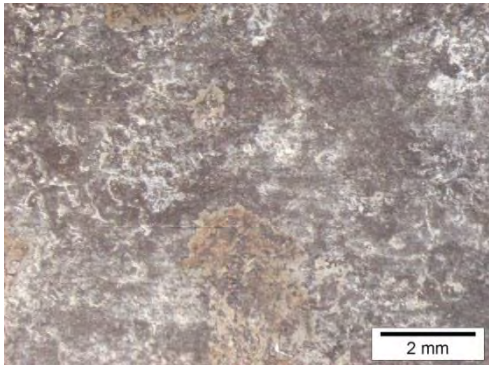
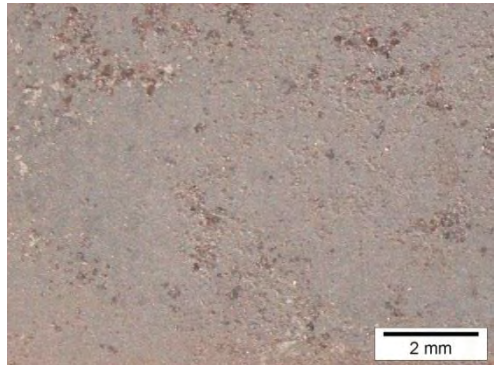
Aus den 7 Rohrabschnitten wurden jeweils mehrere repräsentative 2 x 2 cm² große Proben mittels trockener Sägeschnitte entnommen. Aus jedem Abschnitt wurde jeweils eine Probe für die Anfertigung eines metallografischen Schliffs entnommen. Weitere Proben wurden im Stereomikroskop untersucht. Anschließend erfolgte die chemische Bestimmung der Oberfläche der Proben mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Zudem wurden ausgewählte Proben im REM untersucht.

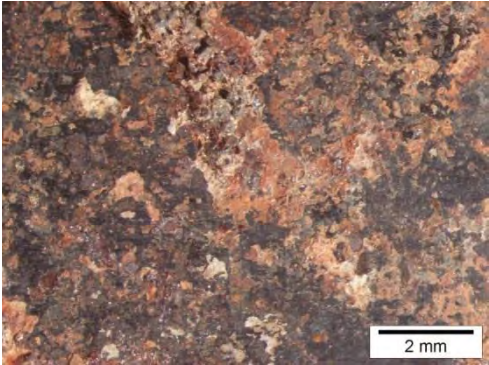
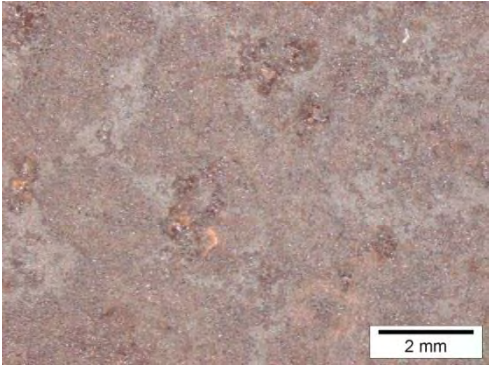

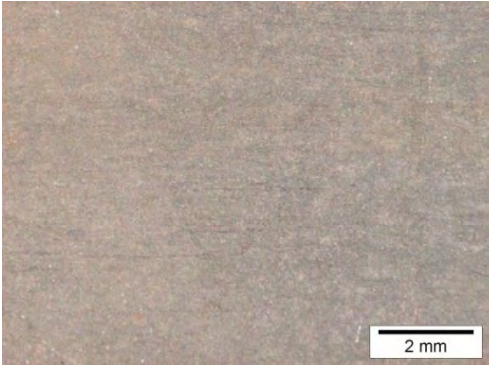
2.2.2 Stereomikroskopische Untersuchung des Oberflächenangriffs

Die Oberflächen der 7 Rohrabschnitte wurden stereomikroskopisch charakterisiert. Die Tabelle 5 stellt die Oberflächen jeweils an Rohraußenseite und Rohrinenseite dar.

Tabelle 5 Stereomikroskopie der Außen- und Innenseite der Rohrabschnitte

Rohrabschnitt Nr.	Außenseite	Innenseite
1		

Rohrabschnitt Nr.	Außenseite	Innenseite
2		
3		
4		
5		

Rohrabschnitt Nr.	Außenseite	Innenseite
6		
7		

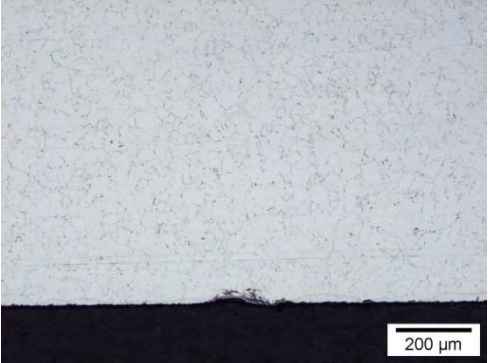
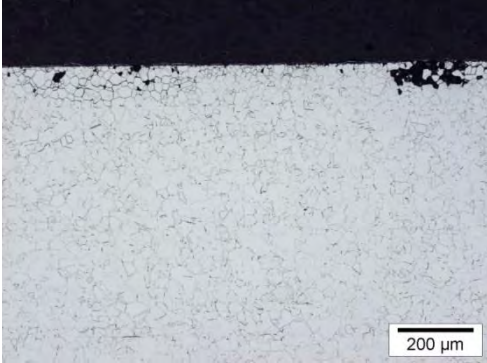
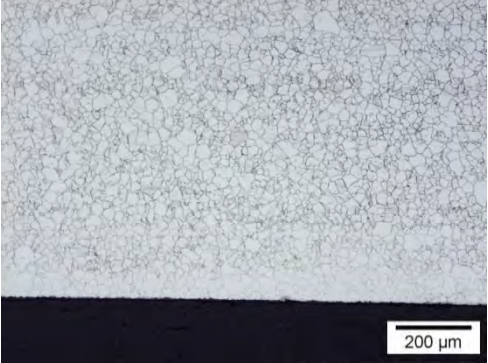
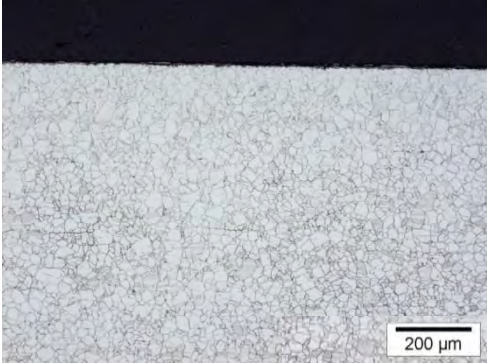
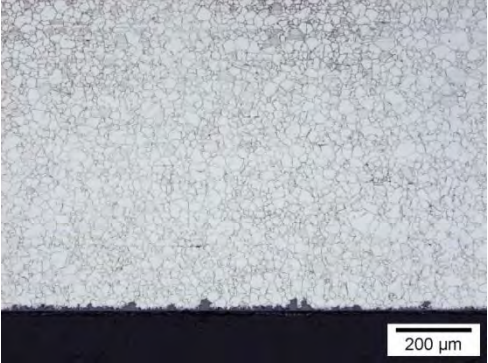

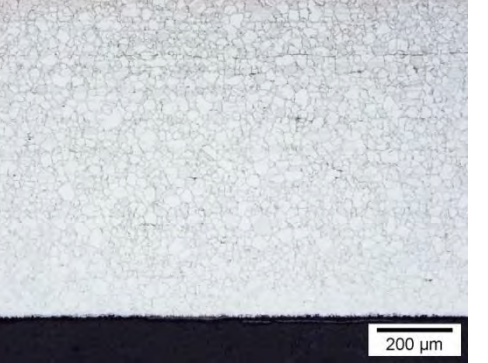
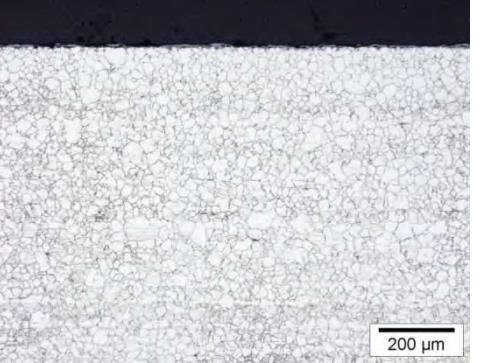
An der Außenseite liegt mehrfach ein unregelmäßiger lokal in die Tiefe gehender Angriff vor. Die Angriffsstellen sind mit darüberliegenden Korrosionsprodukten (Korrosionspusteln) bedeckt. Hier wurde der darunterliegende Werkstoff tiefergehend angegriffen. Besonders deutlich ist der narbige und teilweise lokale Angriff an den Rohrabschnitten 1, 4 und 6 (Tabelle 5).

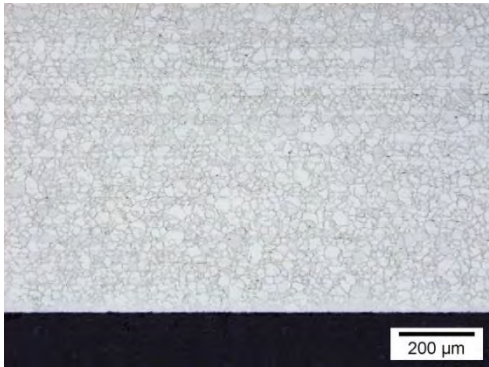
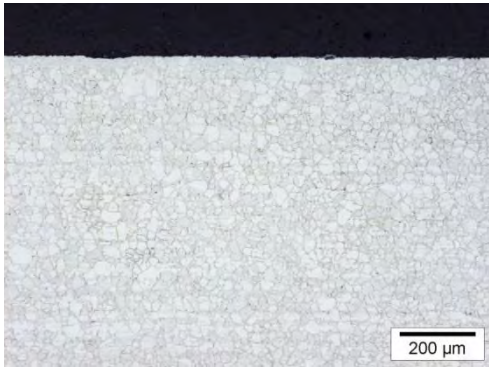
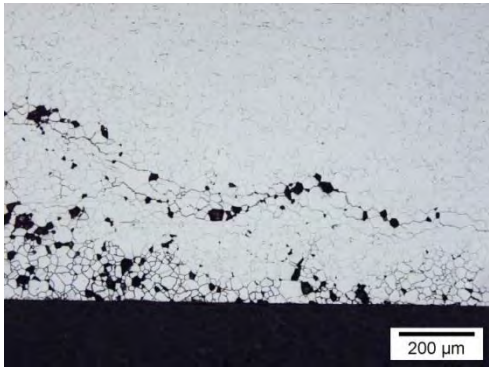
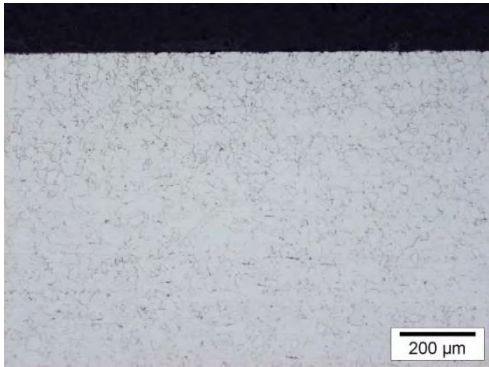
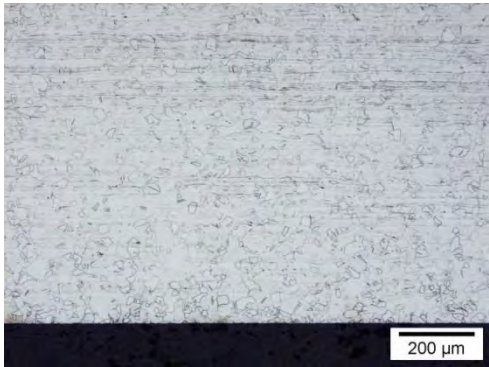
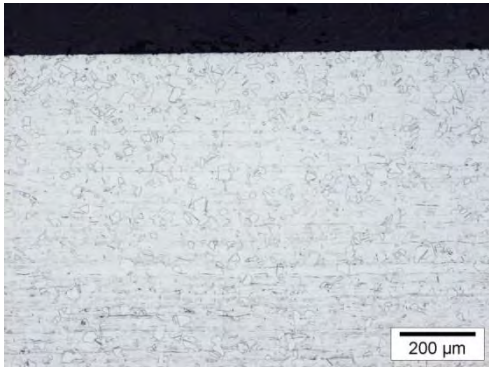
Im Unterschied dazu zeigt die Innenseite der Rohre bei allen Abschnitten eine eher gleichförmige Belegung mit einer dünnen Schicht an Korrosionsprodukten. Es sind nur sehr flache Anhäufungen von Korrosionsprodukten vorhanden. Im Unterschied zum braungrauen bis rotrostigen Erscheinungsbild an der Außenseite ist an der Innenseite ein einheitlich dunkelroter bis dunkelgrauer Belag vorhanden.

2.2.3 Lichtmikroskopische Untersuchung des Oberflächenangriffs

Die Schlitze der 7 Rohrabschnitte wurden lichtmikroskopisch charakterisiert. Tabelle 6 stellt die Oberflächen in Längsschliffen jeweils an Rohraußenseite und Rohrinenseite dar.

Tabelle 6 Lichtmikroskopie der Außen- und Innenseite der Rohrabschnitte

Rohrabschnitt Nr.	Außenseite	Innenseite
1		
2		
3		
4		

Rohrabschnitt Nr.	Außenseite	Innenseite
5		
6		
7		

An zahlreichen Stellen, besonders an der Außenseite, liegt ein interkristalliner Angriff vor. Dieser konnte nur entstehen, da einerseits eine Ausscheidung von Korngrenzenphasen stattfand und andererseits ein wässriger Elektrolyt an der Probenoberfläche in diesem Bereich vorlag. Wenn eine der beiden Voraussetzung, Anwesenheit von Ausscheidungen und Anwesenheit eines Elektrolyten, nicht gegeben ist, kann ein derartiger Angriff nicht stattfinden. In Rohrabschnitt 1 ist auch an der Innenseite ein interkristalliner Angriff vorhanden, der auf das Eindringen von Wasser durch die schlecht verschweißte Bodenplatte zurückzuführen ist, mit der das untersuchte Hüllrohr unten verschlossen war.

Die übrige Rohrinneinnenseite ist stets mit einer gleichmäßigen Schicht von Korrosionsprodukten versehen. Der Angriff erfolgte nicht in die Tiefe gehend.

Die Erkenntnisse aus den lichtmikroskopischen Untersuchungen sind:

- Die Rohrabschnitte 1-6 sind sensibilisiert und anfällig auf interkristalline Korrosion.
- Bei den Rohrabschnitte 2-5 liegt innen ein geringer gleichförmiger Angriff vor, an der Innenseite von Abschnitt 1 liegt interkristalline Korrosion vor.
- Bei den Rohrabschnitten 1 bis 6 liegt außen interkristalliner Angriff vor, der nicht an allen Proben gleich stark ausgeprägt ist. Probe Nr. 6 weist den tiefsten Angriff mit einer Tiefe von bis zu 500 µm vor.
- Der Rohrabschnitt 7 weist weder Angriff noch Sensibilisierung auf.

2.2.4 Elektronenmikroskopische Untersuchung

Basierend auf der Auswertung der lichtmikroskopischen Untersuchungen wurden die Probenplättchen der Rohrabschnitte 3 und 6 für die Rasterelektronenmikroskopie ausgewählt. In Abbildung 66 sind die dazu verwendeten metallografischen Schlitze wiedergegeben. Die Rohrinneinnenseite ist jeweils an der Unterkante der Probe abgebildet.

Abbildung 66 Probe 3 (links) und Probe 6 (rechts).

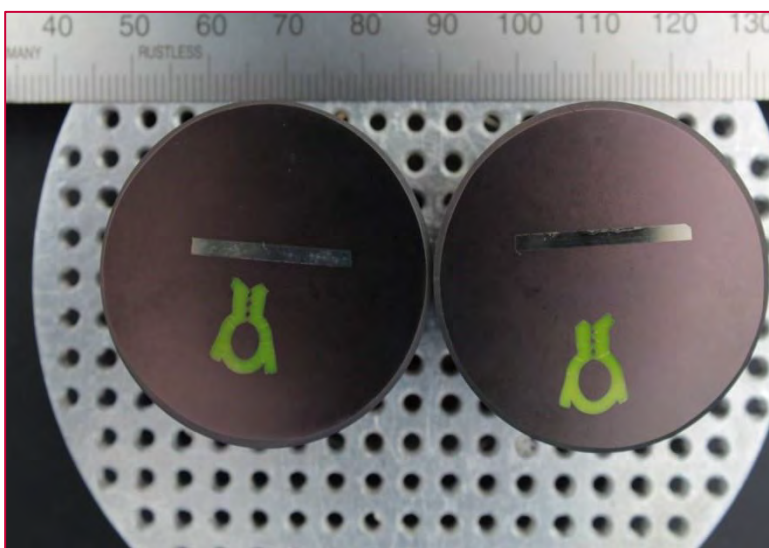


Abbildung 67 zeigt die Innenseite des Rohrabschnitts 3. Es liegt eine Schicht von Zunder vor, die aus zwei Teilschichten besteht. Die äußere, mediumseitige Schicht (Punkt 1 in Abbildung 67 und Tabelle 7) ist reich an Fe und O mit geringeren Anteilen von Cr. Die innere, metallseitige Oxidschicht enthält deutliche Anreicherungen von Cr und O (Punkt 2 in Abbildung 67 und Tabelle 7). Ni ist üblicherweise in Oxidschichten nicht angereichert, da dies das edelste Metall im chemisch beständigen Stahl ist und daher am wenigsten leicht oxidiert wird. Die Zusammensetzung des Stahles am Punkt 3 ist in Tabelle 7 wiedergegeben. In den 2 Analysen ist der hohe C-Gehalt als Artefakt zu bewerten.

Abbildung 68 und Tabelle 8 geben Korngrenzen im Rohrabschnitt wieder. An den Korngrenzen sind Ausscheidungen von $(Fe, Cr)_{23}C_6$ enthalten. Um die Ausscheidungen hat sich ein Verarmungssaum gebildet, der in Abbildung 68 als tiefer, angeätzter, ca. 1 μm breiter Saum an den Korngrenzen sichtbar ist. Die chemische Analyse der einzelnen Messpunkte aus Abbildung 68 ist in Tabelle 8 aufgeführt. Wiederum ist der hohe Grundgehalt an C als Artefakt anzusprechen. Die Anreicherung im Punkt 1 im Vergleich zur Matrix ist signifikant.

Abbildung 67 Rohrinneinnenseite von Rohrabschnitt 3 mit Messpunkten 1-3

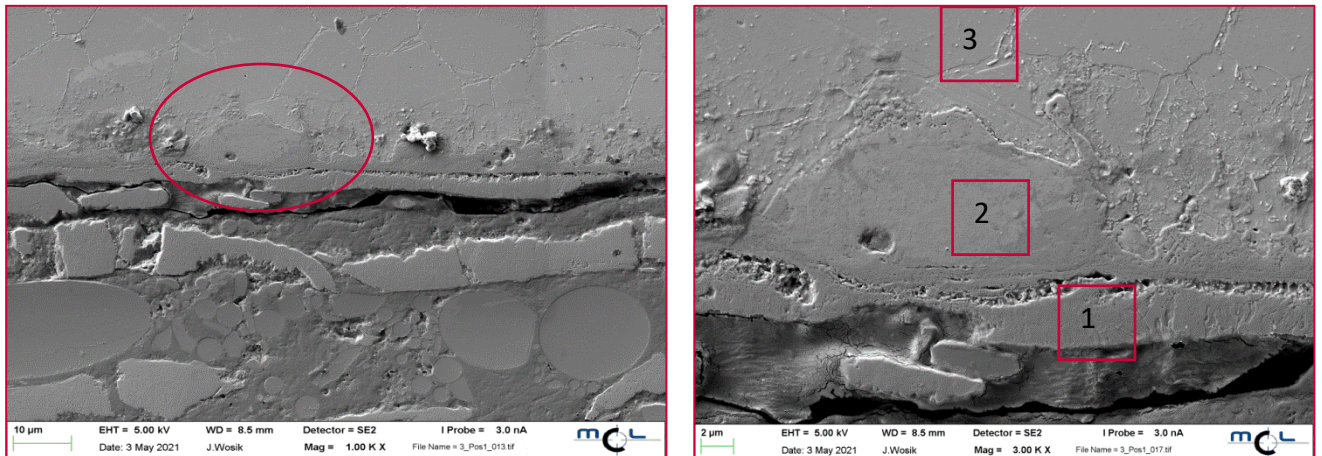


Tabelle 7 Elementanalyse in Massen-%; Rohrabschnitt 3, Innen

Element	Oxidschicht		Matrix
	1	2	3
Fe	63,54	24,23	63,25
C	9,34	8,69	8,93
Cr	0,00	30,04	16,50
Ni	1,85	13,23	9,07
O	24,17	23,17	1,14
Si	0,21	0,65	0,33

Entnahmestelle: Rohrinne von Rohrabschnitt 3 mit Messpunkten 1-3

Abbildung 68 Rohraußenseite von Rohrabschnitt 3 mit Messpunkten 1-4

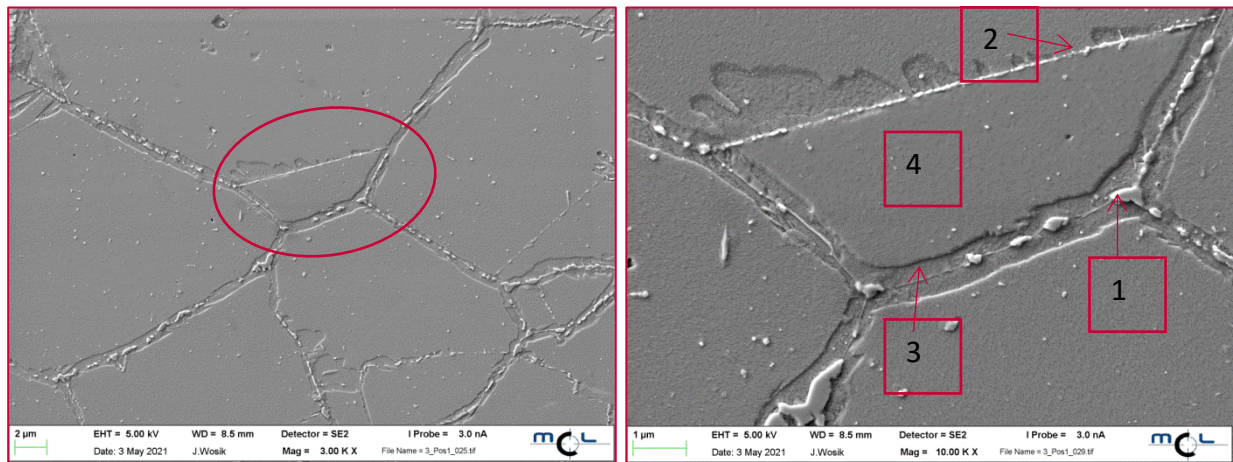


Tabelle 8 Elementanalyse in Massen-%; Rohrabschnitt 3, außen

Element	1	2	3	4 (Matrix)
Fe	35,62	58,04	64,66	63,34
C	13,58	11,21	11,41	9,13
Cr	45,91	20,82	12,57	16,86
Ni	4,33	8,41	8,18	9,37
O	0,38	1,20	1,03	0,91
Si	0,19	0,31	0,47	0,38

Entnahmestelle: Rohraußenseite von Rohrabschnitt 3 mit Messpunkten 1-4

Abbildung 69 Rohraußenseite von Rohrabschnitt 6 mit Messpunkten 1-4

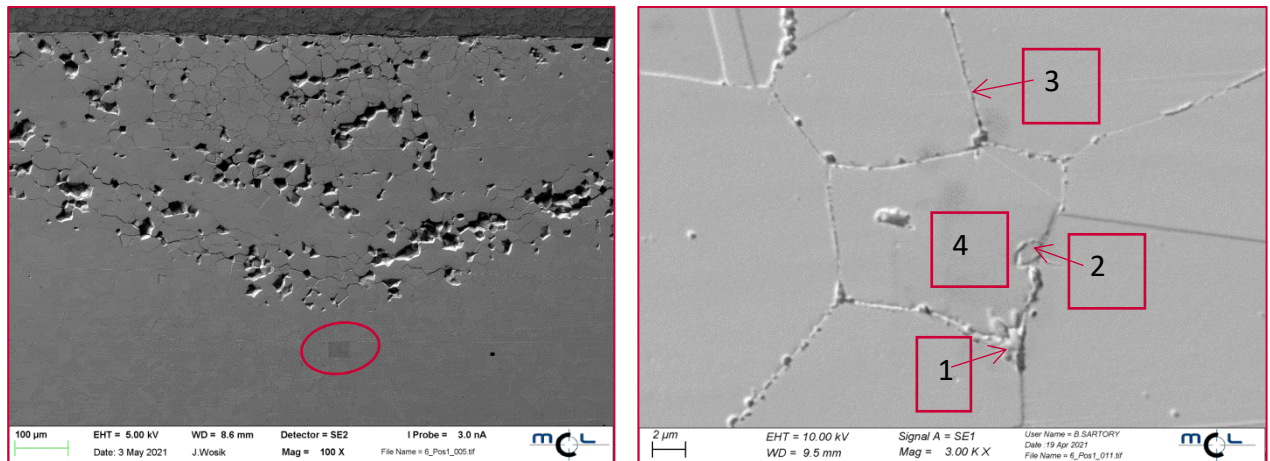


Tabelle 9 Elementanalyse in Massen-%; Rohrabschnitt 6, außen

Element	1	2	3	4 (Matrix)
Fe	37,04	60,25	55,28	62,54
C	36,65	14,97	16,85	10,85
Cr	24,07	15,33	15,63	16,24
Ni	5,55	7,70	7,26	7,94
O	9,30	1,46	4,30	1,25
Si	0,40	0,30	0,67	0,35

Entnahmestelle: Rohraußenseite von Rohrabschnitt 6 mit Messpunkten 1-4

Abbildung 69 zeigt die Außenseite des Rohrabschnitts Nr. 6. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der chemischen Analysen für die einzelnen Messpunkte zusammengestellt. Es liegt ausgeprägter interkristalliner Angriff vor. Einzelne Körner sind herausgelöst. Die Korngrenzen sind mit $(\text{Fe, Cr})_{23}\text{C}_6$ belegt und es ist ein durchgängiger Verarmungssaum vorhanden. Die Anzeige von C im Karbid (Punkt 1) ist überaus deutlich.

2.2.5 Röntgenfluoreszenzanalyse der Korrosionsprodukte

Die Korrosionsprodukte der Rohrabschnitte 2, 3, 5, 6 und 7 wurden innen und außen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt. Dabei wurden die Metalle als Oxide gerechnet, da es sich überwiegend um oxidische oder hydroxidische, ggf. auch karbonatische Korrosionsprodukte handelt. Neben den Elementen des Stahles sind als Fremdelemente deutliche Anzeichen von S (als SO_3 gerechnet) vorhanden (Tabelle 10).

Tabelle 10 RFA Massen-% (Spezies) an den Rohrabschnittoberflächen 2, 3, 5, 6 und 7

Spezies (als Oxid gerechnet)	2		3		5		6		7	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen
Fe ₂ O ₃	73,23	69,42	71,15	63,33	68,92	54,93	74,22	64,29	70,82	80,80
Cr ₂ O ₃	22,21	21,20	18,23	22,44	25,19	31,32	20,31	23,25	20,03	22,49
NiO	3,89	5,55	3,11	2,98	3,99	3,89	6,84	6,99	6,97	7,84
Al ₂ O ₃	0,66	7,15	4,96	15,50	1,28	15,75	1,19	3,72	0,56	1,32
SiO ₂	0,55	18,07	4,12	25,95	1,16	28,46	2,64	10,59	1,48	2,32
CuO	0,45	0,37	6,38	0,25	0,44	0,30	0,48	0,53	0,47	0,59
SO ₃	2,78	0,77	1,15	0,50	0,54	0,45	0,80	1,06	0,25	0,06
Cl	0,15	0,58	0,03	0,39	0,08	0,15	0,18	0,12	0,2	0,03

2.2.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich aus den Untersuchungen folgende Ergebnisse ableiten:

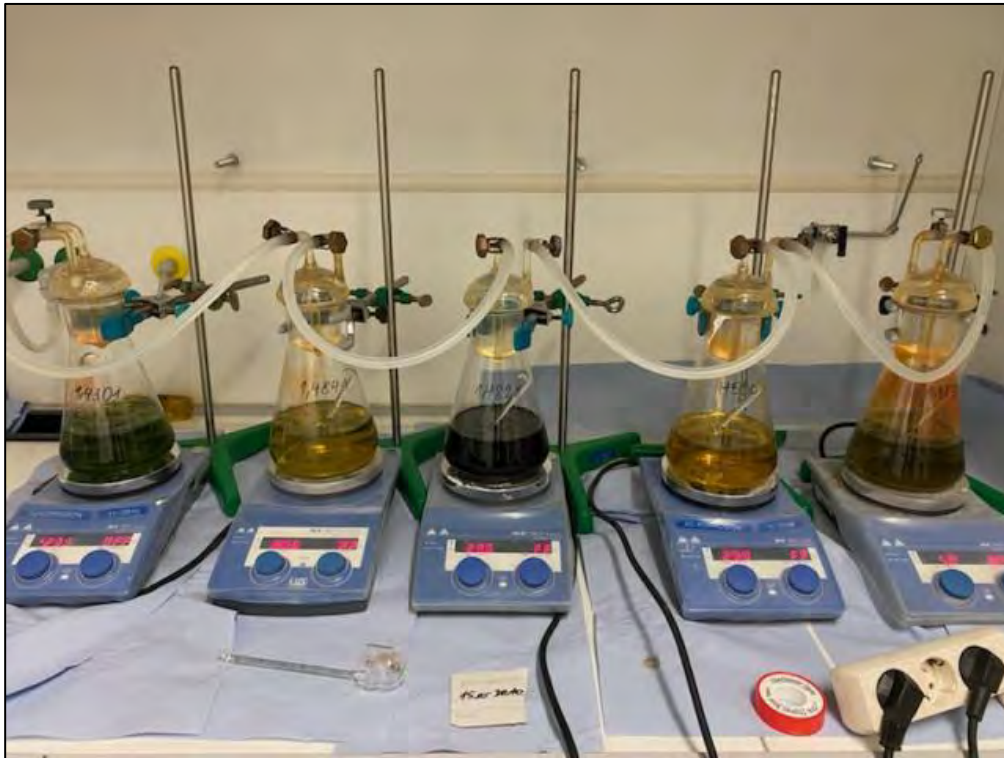
- Im Material führt die Anwendungstemperatur von 650 °C zur Sensibilisierung (Ausscheidung von chromreichen Karbiden an den Korngrenzen) des Werkstoffes über die gesamte Wandstärke.
- Daraus folgt an der Rohraußenoberfläche durch Einwirkung eines Elektrolyten interkristalline Korrosion. Diese erreicht eine Tiefe von bis über 500 µm. Ohne Anwesenheit eines Elektrolyten würde eine interkristalline Korrosion mit Kornzerfall nicht auftreten.
- An der Rohrinneoberfläche ist Hochtemperaturkorrosion in Form von gleichförmigem Angriff mit der dafür typischen Bildung von Eisenoxid bzw. Chromeisenmischoxid gegeben. Dieser Angriff ist gegenüber der interkristallinen Korrosion an der Rohraußenseite als weniger kritisch einzustufen.

2.2.7 Materialauswahl

Da die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass es sich um einen elektrolytischen Angriff (interkristalline Korrosion) und nicht, wie zu Beginn des Projektes vermutet, um Korrosion aufgrund der Verzunderung (Hochtemperaturkorrosion) handelt, musste eine alternative Versuchsdurchführung zur Untersuchung der Neigung verschiedener Materialien zur interkristallinen Korrosion vorgenommen werden. Dazu wurden kleine Abschnitte von unterschiedlicher Stahlqualität (z.B. 304, 310, A975, H500, H520, H525 und Alloy 600) im A4-Format bzw. in Form kurzer Rohrstücke verwendet.

Zunächst erfolgte eine Sensibilisierung der Probenkörper im Ofen bei 700°C, jener Temperatur, bei der sich Ausscheidungen bilden. Danach erfolgten Auslagerungsversuche, bei denen die geglühten Materialien für 120 h mit einem Elektrolyten in Kontakt gebracht wurden, um die Bedingungen im Feld zu simulieren. Dabei wurde der Massenabtrag in Gramm je Quadratzentimeter und Stunde bestimmt, wodurch ein Ranking der eingesetzten Probenmaterialien erstellt werden konnte. Abbildung 70 zeigt die Auslagerungsversuche wie sie im Labor durchgeführt wurden. Der für die Versuche gewählte Elektrolyt hat zu Beginn eine gelbe Färbung. Eine mit der Zeit ins Grüne gehende Färbung deutet auf eine erhöhte Korrosionsrate hin, wie sie hier bei beiden Proben am Rand, sowie in der Mitte der Fall ist.

Abbildung 70 Auslagerungstests zur Bestimmung der Neigung der Werkstoffproben zu interkristalliner Korrosion



Im Anschluss an die Auslagerungsversuche (5 Proben je Testdurchlauf) erfolgte, wie oben beschrieben, eine Bestimmung der Abtragsraten der einzelnen Werkstoffe. Aufgrund dieser Auswertung konnte eine präzise Aussage über die Eignung der Materialien getroffen werden. Eine Reihung der Werkstoffe anhand ihrer Abtragsrate ist in Tabelle 11 dargestellt. Neben den Qualitäten 1.4301 (303), 1.4876 (H500), 1.4841, (H52, 5310), 2.4816 (Alloy 600), 1.4563 (A975) wurden weitere, gegen interkristalline Korrosion beständige Werkstoffe getestet. Zu sehen ist, dass drei Werkstoffe eine Abtragsrate von weniger als einem Gramm je Quadratmeter und Stunde besitzen. Am besten geeignet zeigt sich der Werkstoff A975. Für den zu Beginn der Materialstudien untersuchten Werkstoff 1.4301 ergibt sich eine Abtragsrate von $5,805 \text{ g/m}^2\text{h}$, worin auch die starke Korrosion des Hüllrohres begründet liegt.

Tabelle 11 Reihung von Materialqualitäten nach ihrer interkristallinen Korrosionsbeständigkeit

Nr.	Kurzbezeichnung	Werkstoff-Nr.	Trivialname	Abtragsrate ¹⁾ [g/m ² h]
1	X1NiCrMoCu31-27-4	1.4563	A975, Sanicro28	0,080
2	X10CrAl25	1.4762		0,510
3	X18CrN28	1.4749		0,585
4	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571		1,453
5	X10NiCrAlTi32-20	1.4876	H500	1,471
6	X8CrNiTi18-10	1.4878	1.4541	1,589
7	X15CrNiSi25-20	1.4841	H525	1,743
8	X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	A970	3,051
9	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462		3,478
10	X5CrNi18-10	1.4301	A500	5,805
11	NiCr21Mo14W	2.4602	Hastelloy C22	8,023
12	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	A200	8,949
13	NiCr15Fe	2.4816	Alloy 600	28,803
14	X15CrNiSi20-12	1.4828	H550	37,712
15	X9CrNiSiNce21-11-2	1.4835	Alloy 253 MA	39,618

¹⁾ (<1 grün, 1-10 gelb, >10 rot)

Das zur Boden- und Grundwassersanierung eingesetzte Heizsystem besteht aus den Komponenten Heizlanze (NiCr-Draht) und Hüllrohr. Da die Korrosion nur das Hüllrohr betrifft, beziehen sich die oben erläuterte Materialstudien auf die Hüllrohrmaterialien. Wie oben beschrieben, wurde für die Bestimmung des Ist-Zustandes ein Hüllrohr aus einem Praxiseinsatz mit der Stahlqualität 1.4301 herangezogen. Für das Hüllrohr des Versuchsstandes wurde ein Edelstahl der Qualität 1.4828 verwendet, um der zunächst angenommenen Hochtemperaturkorrosion entgegenzuwirken. Diese Werkstoffqualität ist, wie die Ergebnisse der Auslagerungsversuche zeigen, zum Einsatz auf kontaminierten Flächen nur bedingt geeignet, wenn das Hüllrohr aufgrund der Standortbedingungen elektrochemischer Korrosion ausgesetzt ist.

2.2.8 Anfertigung ausgewählter Materialien aufgrund der Testergebnisse

Das Material für die in weiterer Folge in den Feldtests (Kap. 4) verwendeten Hüllrohre wurde aufgrund der Ergebnisse aus den beschriebenen Versuchen sowie unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien und nach Verfügbarkeit ausgewählt. Einige der getesteten Materialien sind schwer zu beschaffen, vor allem als Rohrformstücke. Der Edelstahl 1.4563 (A975) ist beispielsweise in den benötigten Dimensionen nicht standardmäßig zu erhalten. Abträglich sind hier zudem die geringen benötigten Mengen. Eine Alternative zum A975 stellt beispielsweise der Edelstahl 1.4571 mit einer niedrigen Abtragsrate dar, der bei einem inländischen Rohrlieferanten im Standardsortiment vorhanden war und somit zum Bau der Hüllrohre für den Feldtest in Frage kam.

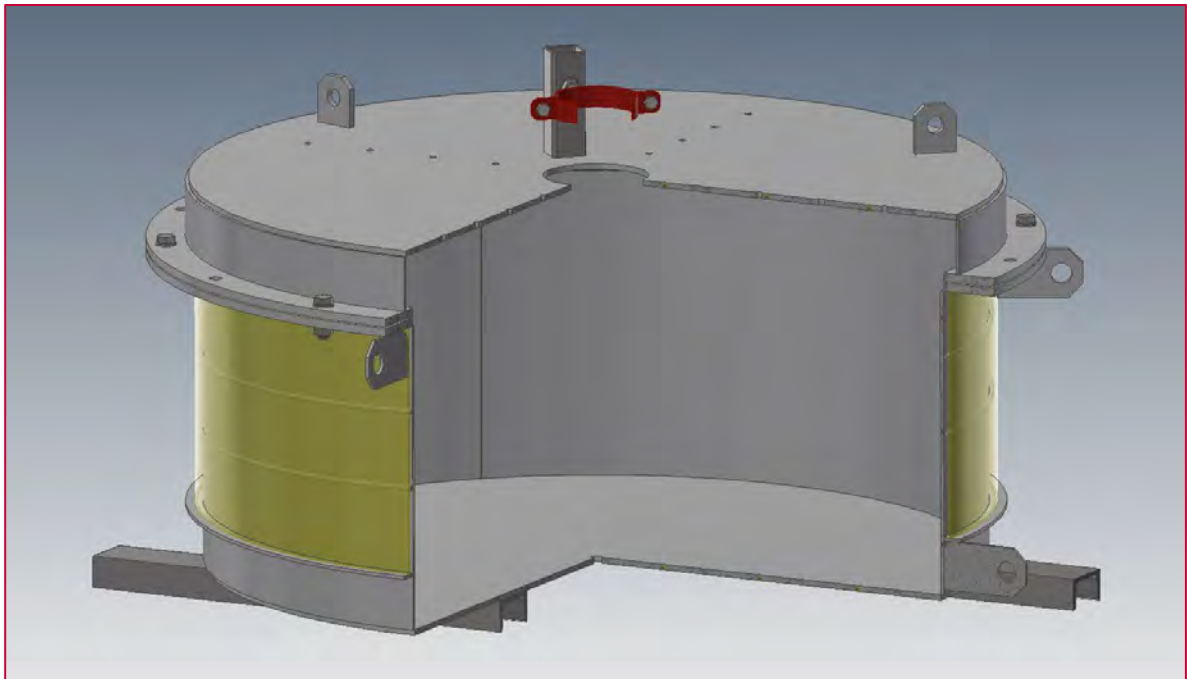
2.3 Verbesserung des Wärmeübergangs im Ringspalt zwischen Heizlanze und Bodenkörper

2.3.1 Bestimmung des Wärmeübergangs

Versuchsaufbau Versuche 1 bis 3

Es wurde ein Versuchsaufbau zur Messung der Wärmeausbreitung im Erdreich, sowie zur Abklärung des Wärmewiderstands zwischen Lanze und Ringspalt, errichtet, der aus einem Stahlbau besteht (Abbildung 71 3D Schnitt des Stahlbaus.). Dieser verfügt über einen Doppelmantel, welcher wassergekühlt ist. Um eine gleichmäßige Kühlung zu gewährleisten, ist dieser mit zwei Strömungsleitblechen versehen. Die Lanze wird hierbei über eine Schelle befestigt. Zur Manipulation des Behälters mit Kran und Gabelstapler wurden Standschienen und diverse Laschen angeschweißt.

Abbildung 71 3D Schnitt des Stahlbaus.



Die Zustellung (Abbildung 72) des Behälters besteht aus Feuerfestbeton und Keramikfasermatten. Hierbei stellen die Keramikfasermatten die Isolierung dar. Der Feuerfestbeton ist notwendig, da die Keramikfasermatten druckempfindlich sind. Zur

Stützung in der Lanze in der Mitte und um einen Teil des Gewichts des Bodens in den Stahlbau abzuleiten, wurde ein Gussstein aus Feuerfestbeton eingesetzt.

Abbildung 72 Aufbau der Zustellung der Versuchsanordnung.

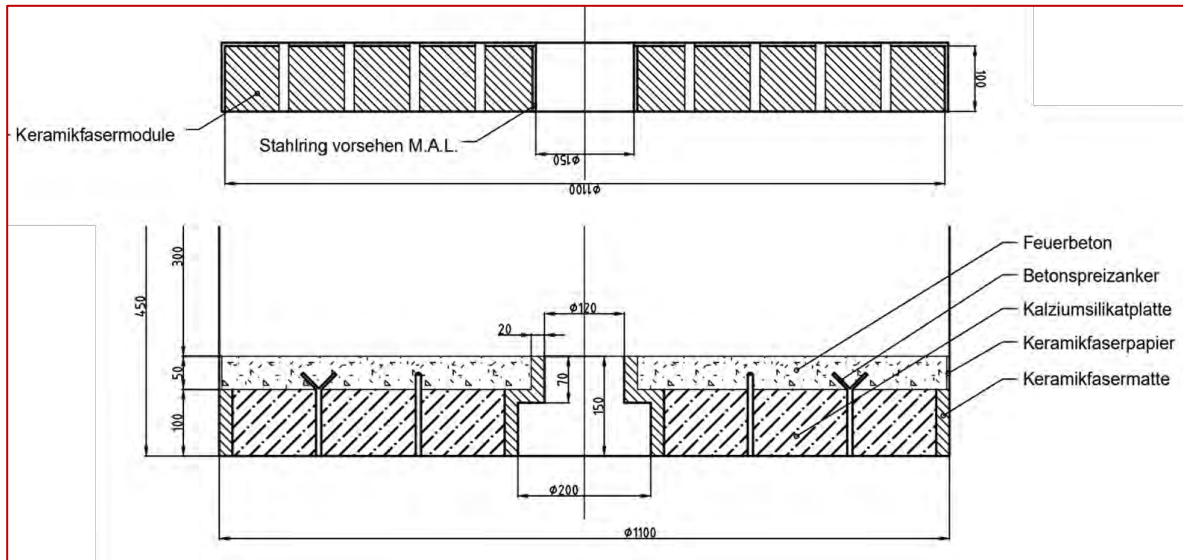
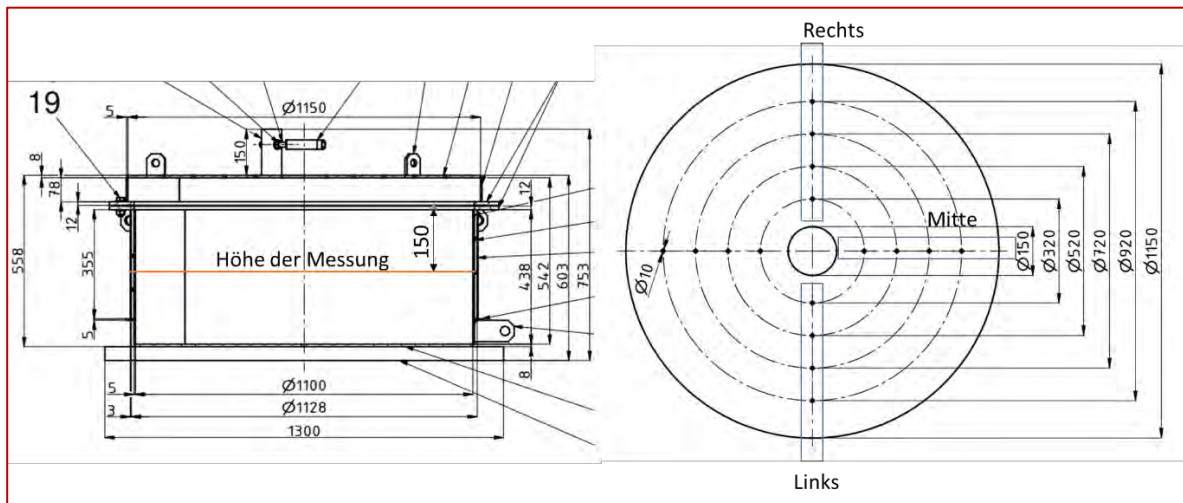


Abbildung 73 Messpositionen und Bezeichnungen der Thermoelemente.



Jeweils 3 Thermoelemente des Typ K sind mit demselben Abstand zur Lanze angeordnet (Abbildung 73). Die Positionen werden als Rechts, Mitte und Links bezeichnet. Die Einbringung der Thermoelemente erfolgt über eine Lehre, um sicherzustellen, dass diese sich in der Mitte des Bodens auf einer Tiefe von 150 mm befinden. Zusätzlich wurde noch ein Thermoelement an der Lanze angebracht, um deren Temperatur zu dokumentieren.

Die Messdatenerfassung erfolgt über das National Instruments Modul NI-9213, welches in eine LabView Umgebung eingebunden wurde.

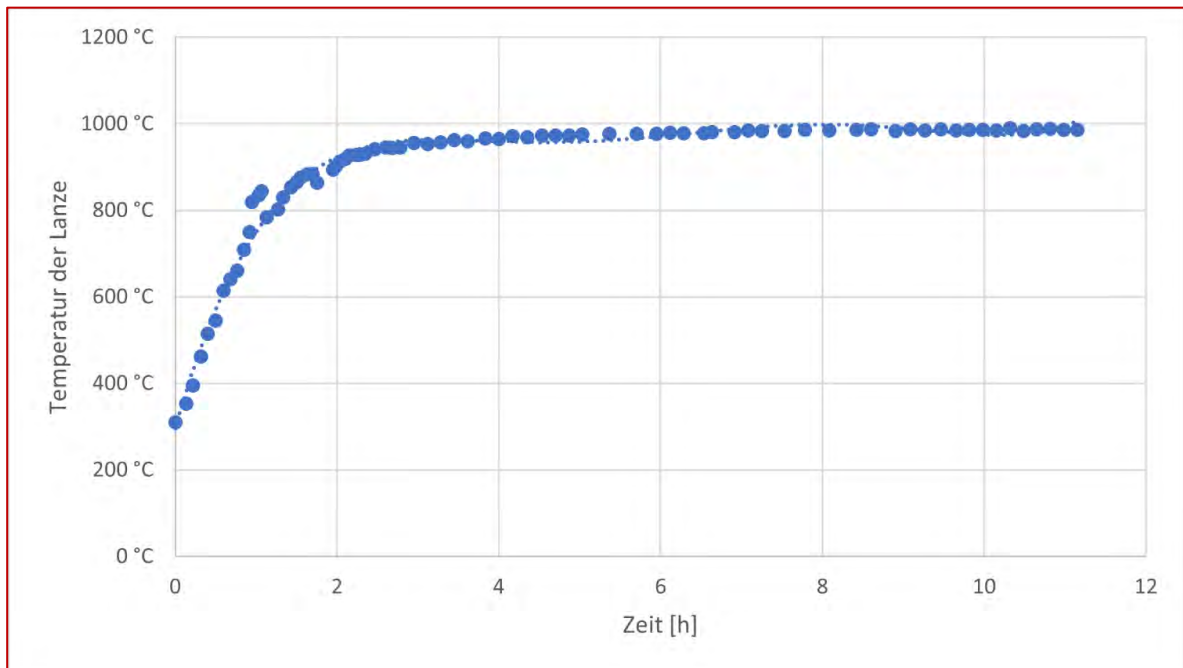
Abbildung 74 Foto des Messaufbaus mit Heizlanze, Thermoelementen, Wasserkühlung und Absaugung.



2.3.2 Resultate Laborversuch 1

Beim ersten Versuch wurde die Temperatur der Heizlanze auf 600°C (873 K) in der Regelung vorgegeben. Wie aus Abbildung 75 ersichtlich ist, wurde diese Temperatur von der Regelung um bis zu 122 °C überschritten. Dieses Verhalten der Regelung war auch in den Versuchen 2,3 und 4 zu beobachten.

Abbildung 75 Gemessener Temperaturverlauf der Heizlanze.



In den Abbildungen 76 bis 79 sind jeweils die Temperaturen des Bodens mit identem Abstand zur Heizlanze zusammengefasst. Hier ist zu beobachten, dass es deutliche Abweichungen zwischen den Messwerten gibt. Diese sind auch nicht einer Reihe zuzuordnen. Bei einem Durchmesser des Kreises der Thermoelemente von 320 mm erwärmt sich das linke Thermoelement langsamer als die beiden anderen, wobei bei einem Durchmesser von 520 mm sich das rechte Thermoelement langsamer erwärmt. Die Trocknung des Bodens (Abbildung 80, Abbildung 81) zeigt keine Zeichen einer stark ungleichmäßigen Wärmeausbreitung. Bei den äußeren Messstellen (720 mm, 920 mm) kommt es zu einer Übereinstimmung der Messergebnisse.

Abbildung 76 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 1, welche auf einem Kreis mit 320 mm angeordnet sind.

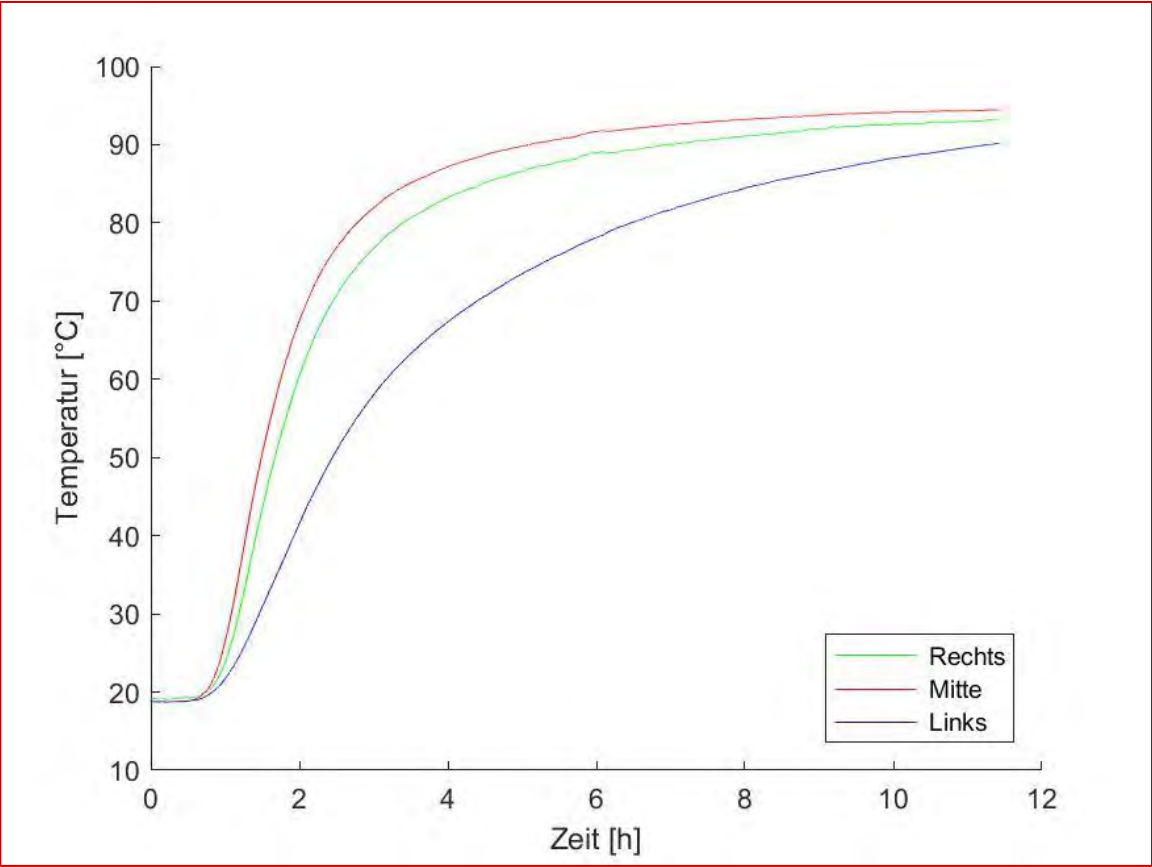


Abbildung 77 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 1, welche auf einem Kreis mit 520 mm angeordnet sind

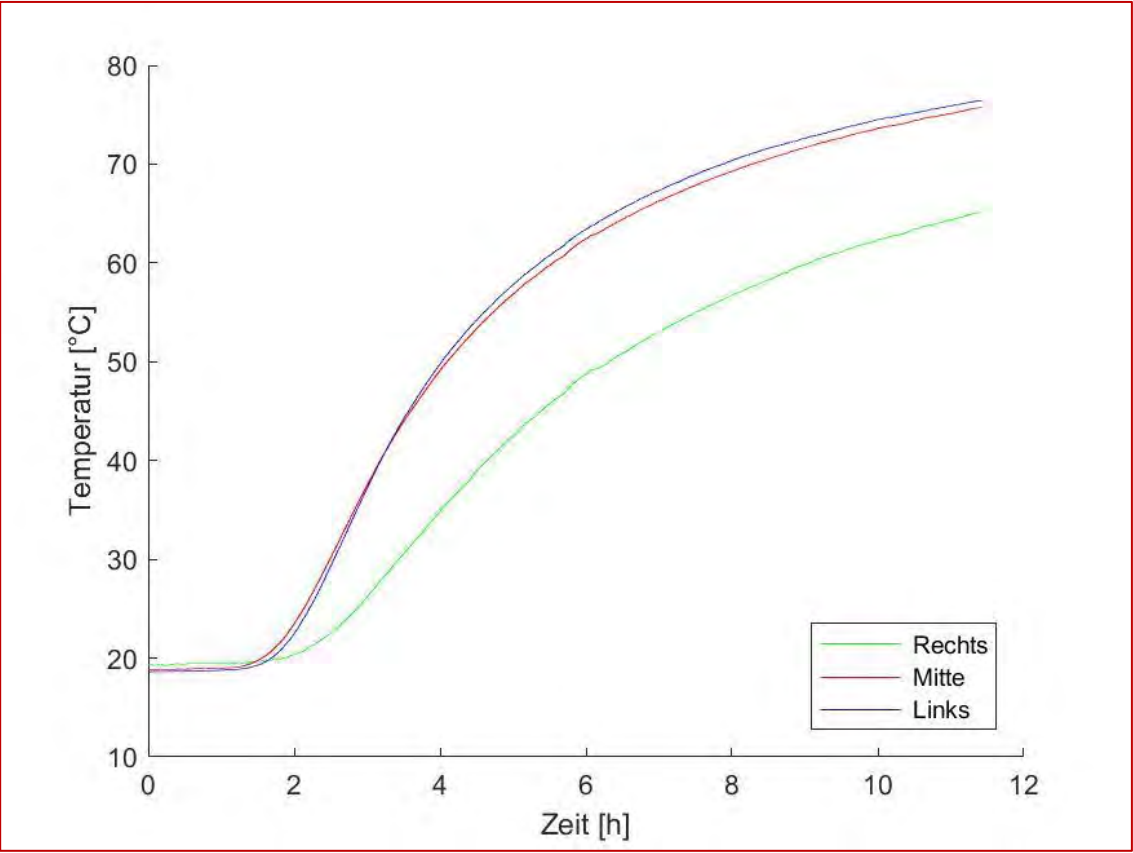


Abbildung 78 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 1, welche auf einem Kreis mit 720 mm angeordnet sind.

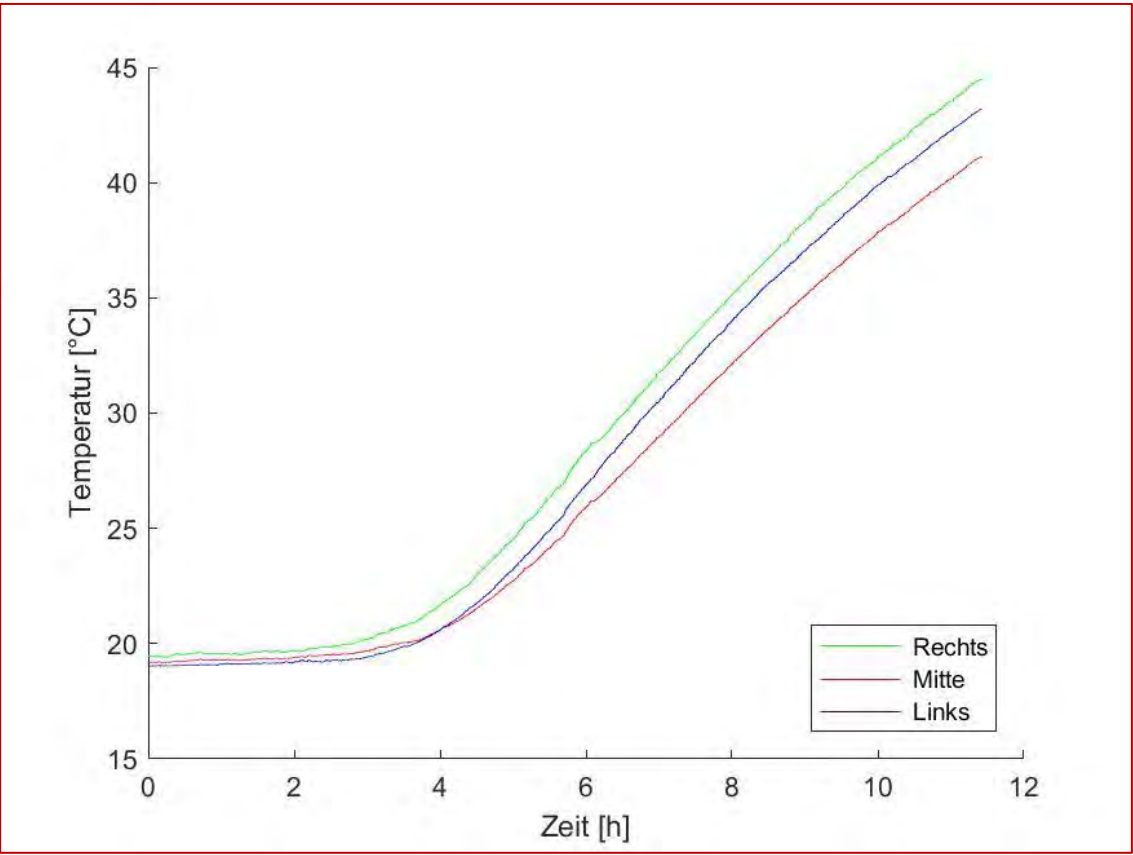
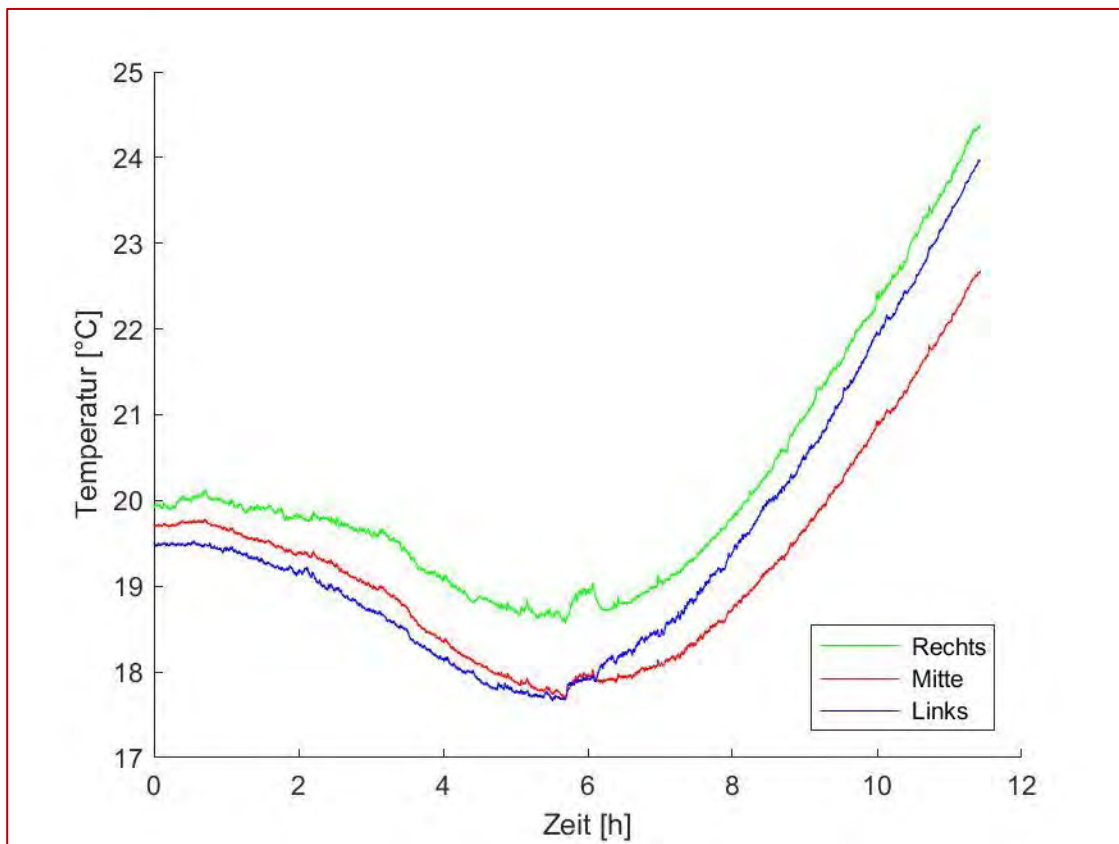


Abbildung 79 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 1, welche auf einem Kreis mit 920 mm angeordnet sind.



Die Abbildungen 80 und 81 zeigen den Boden nach dem Versuch, sowohl der trockene Bereich als auch der Bereich der Pyrolyse breiten sich ringförmig aus. Nach der Versuchsdauer von 11 Stunden und 24 Minuten erreicht der trockene Bereich einen Durchmesser von 420 mm und der Bereich der Pyrolyse erstreckt sich bis zu einem Durchmesser von 340 mm.

Abbildung 80 Foto des gesamten Bodens nach dem ersten Versuch.

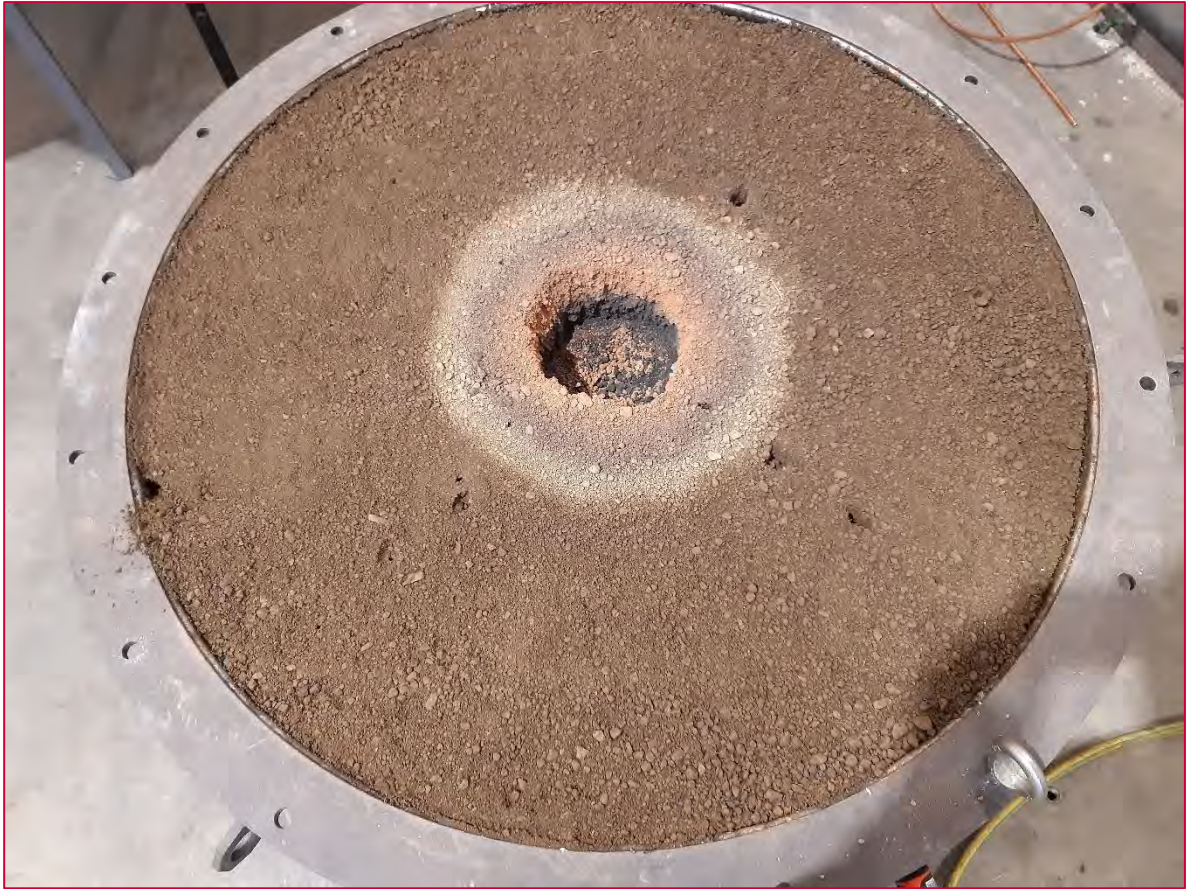


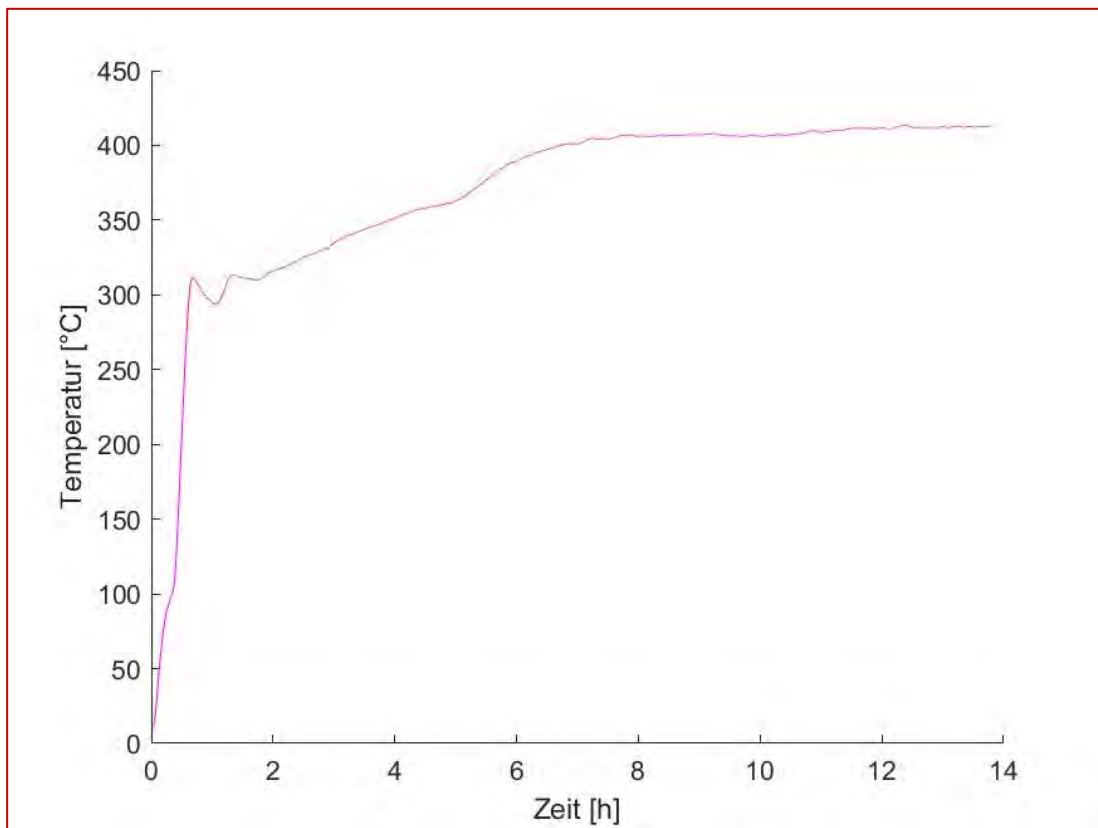
Abbildung 81 Detailfoto des getrockneten und pyrolysierten Bereichs.



2.3.3 Resultate Laborversuch 2

Beim zweiten Versuch wurde die Temperatur der Heizlanze auf 300°C in der Regelung vorgegeben. Wie aus Abbildung 82 ersichtlich ist, wurde diese Temperatur von der Regelung um bis zu 98 °C überschritten.

Abbildung 82 Gemessener Temperaturverlauf der Heizlanze beim zweiten Versuch.



In den Abbildungen 83 bis 86 sind jeweils die Temperaturen des Bodens mit identem Abstand zur Heizlanze zusammengefasst. Um den Einfluss des Feuerfestbetons zu erfassen, wurde auch ein Thermoelement zwischen Boden und Zustellung angebracht. Hier ist, analog zum Versuch 1, zu beobachten, dass es deutliche Abweichungen zwischen den Messwerten gibt. Bei einem Durchmesser des Kreises der Thermoelemente von 320 mm erwärmt sich das linke Thermoelement schneller als die beiden anderen, wobei bei einem Durchmesser von 520 mm sich das rechte Thermoelement langsamer erwärmt.

Abbildung 83 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 2, welche auf einem Kreis mit 320 mm angeordnet sind.

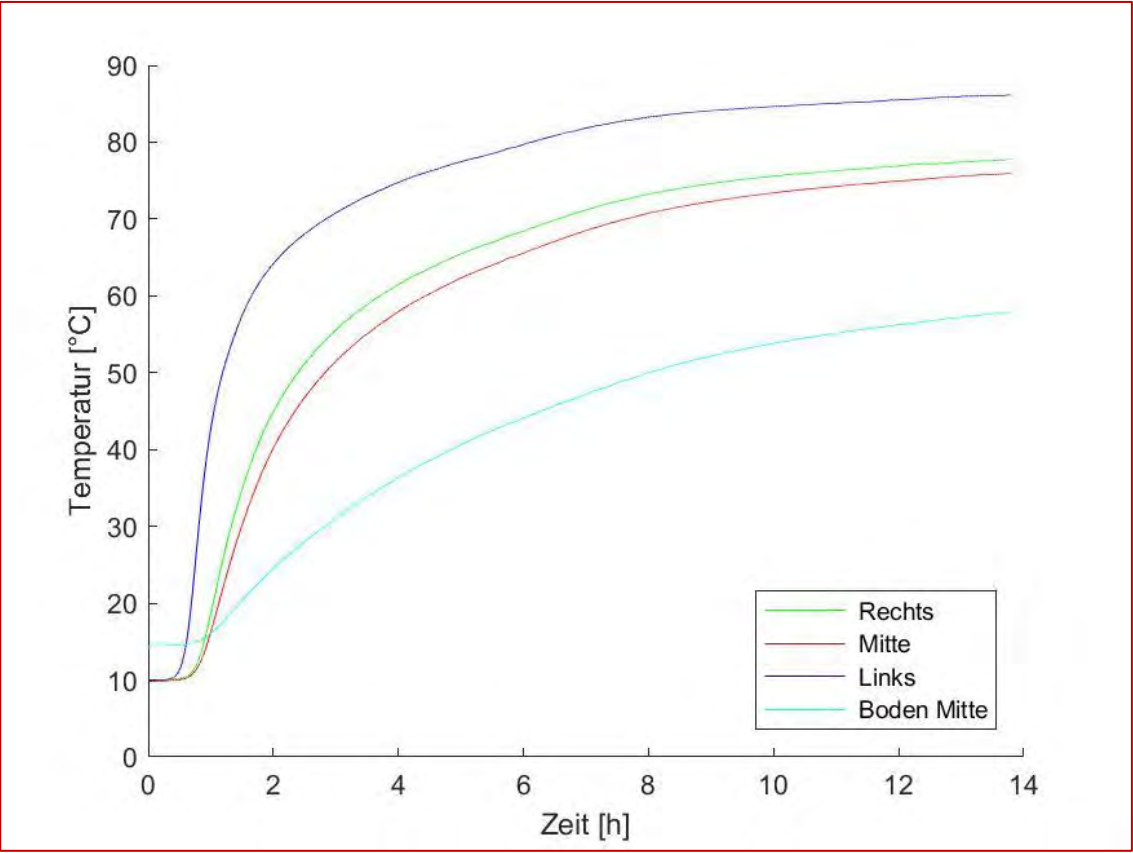


Abbildung 84 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 2, welche auf einem Kreis mit 520 mm angeordnet sind.

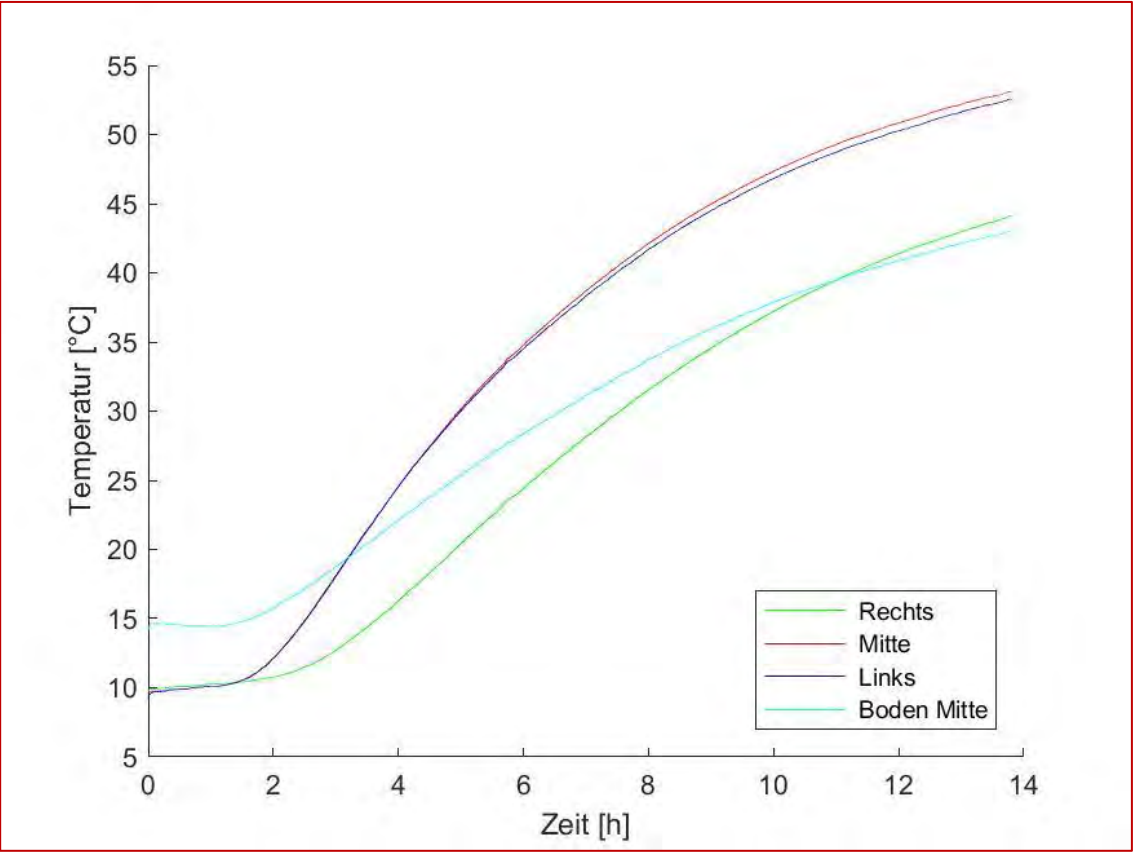


Abbildung 85 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 2, welche auf einem Kreis mit 720 mm angeordnet sind.

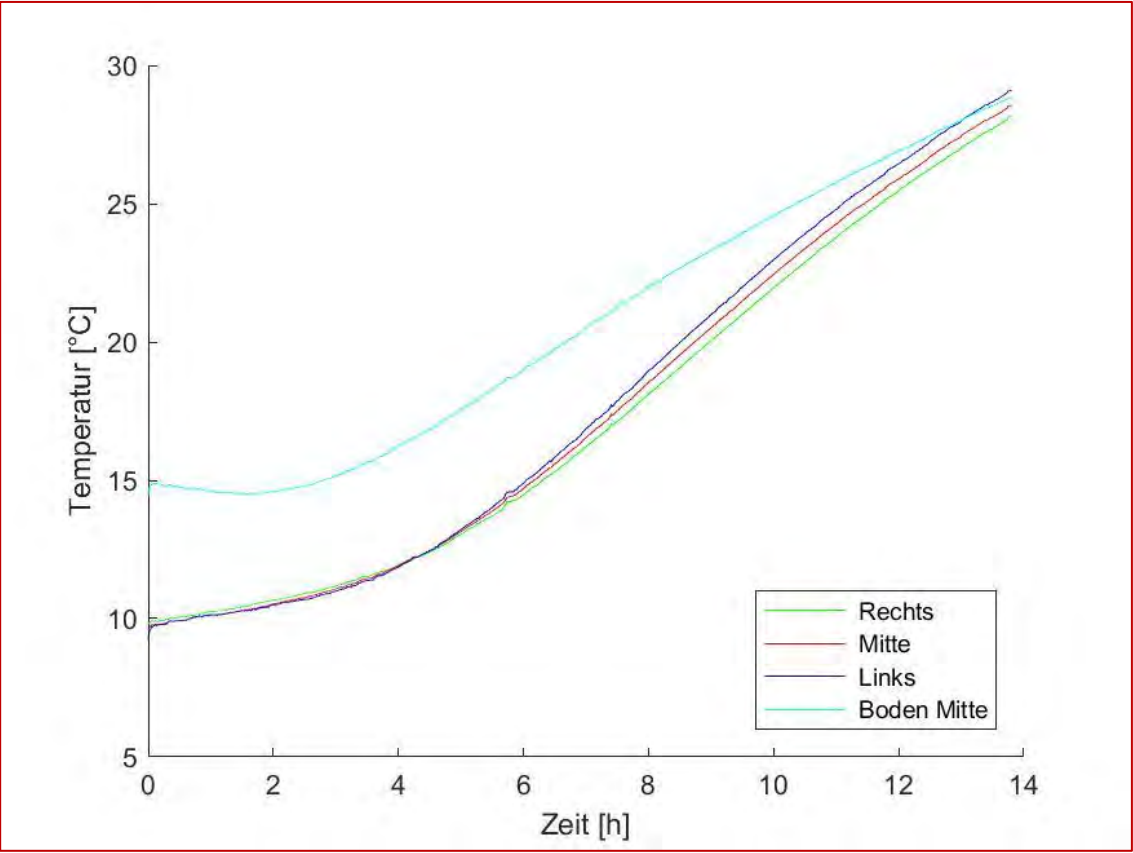
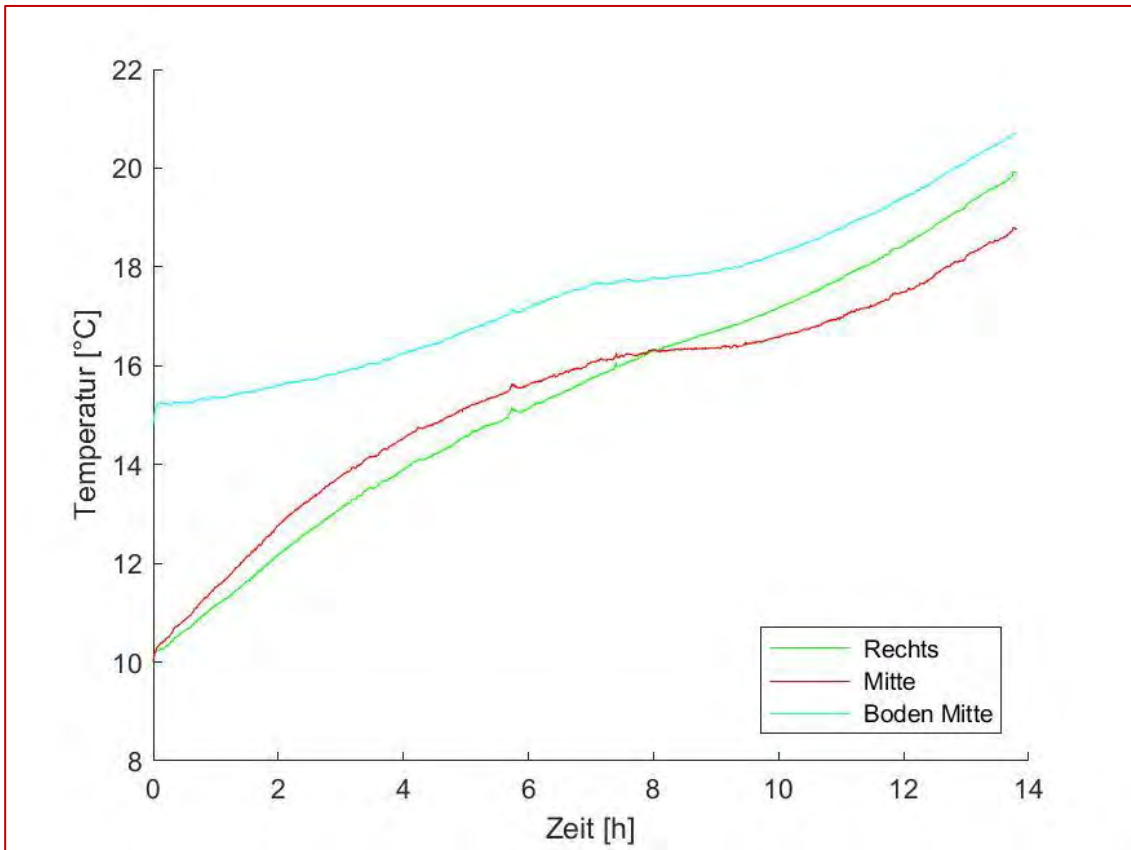


Abbildung 86 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 2, welche auf einem Kreis mit 920 mm angeordnet sind.



Die Abbildungen 87 und 88 zeigen den Boden nach dem Versuch. Sowohl der trockene Bereich als auch der Bereich der Pyrolyse breiten sich ringförmig aus. Nach der Versuchsdauer von 13 Stunden und 48 Minuten erreicht der trockene Bereich einen Durchmesser von 330 mm. Der Abbau der Organik ist selbst im lannennahen Bereich nicht vollständig.

Abbildung 87 Foto des gesamten Bodens nach dem zweiten Versuch.

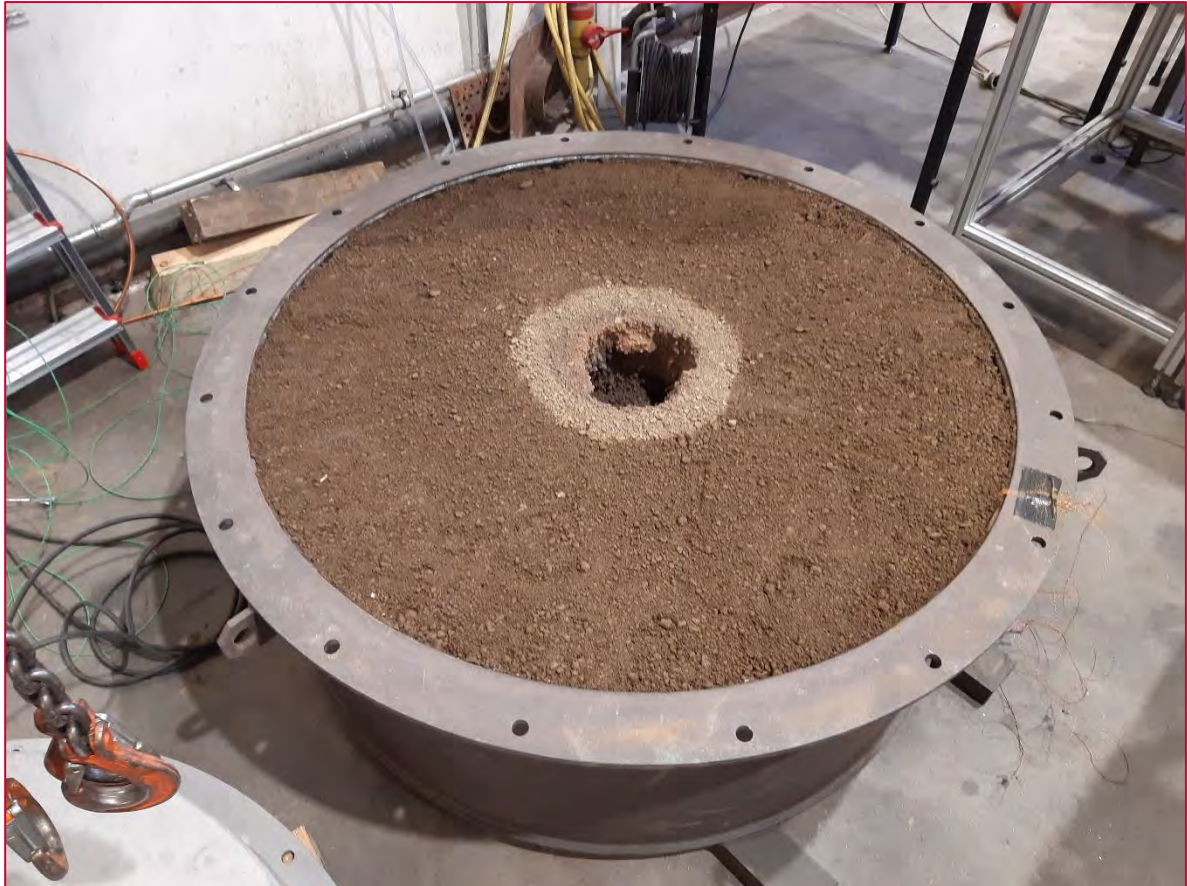


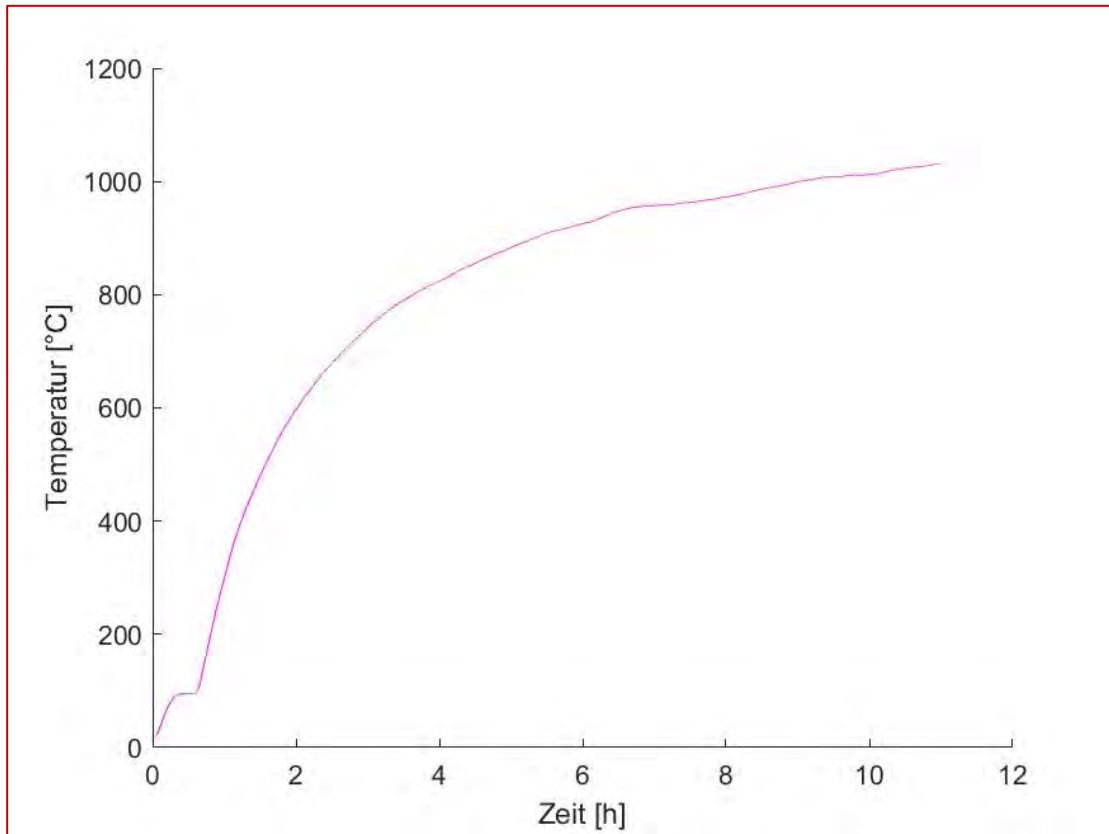
Abbildung 88 Detailfoto des getrockneten Bereichs. Es wird nahezu keine Organik abgebaut.



2.3.4 Resultate Laborversuch 3

Beim dritten Versuch wurde die Temperatur der Heizlanze auf 900°C in der Regelung vorgegeben. Wie aus Abbildung 89 ersichtlich ist, wurde diese Temperatur von der Regelung um bis zu 148 °C überschritten.

Abbildung 89 Gemessener Temperaturverlauf der Heizlanze beim dritten Versuch.



In den Abbildungen 90 bis 93 sind jeweils die Temperaturen des Bodenkörpers mit identem Abstand zur Heizlanze zusammengefasst. Bei einem Durchmesser von 320 mm erfolgt die Erwärmung des linken Thermoelements bis zur Siedetemperatur von Wasser deutlich schneller als bei den beiden anderen. Wenn der trockene Bereich das Thermoelement erreicht hat, kommt es zu einem Anstieg der Temperatur. Dieser Effekt wurde in den ersten beiden Messungen nicht beobachtet, da am Messpunkt der Thermoelemente (nicht an der Oberfläche) noch Bodenfeuchte vorhanden war. Das Verhalten des Erwärmens der Thermoelemente bei einem Durchmesser von 520 mm, 720 mm und 920 mm ist ident zu den beiden ersten Versuchen.

Abbildung 90 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 3, welche auf einem Kreis mit 320 mm angeordnet sind.

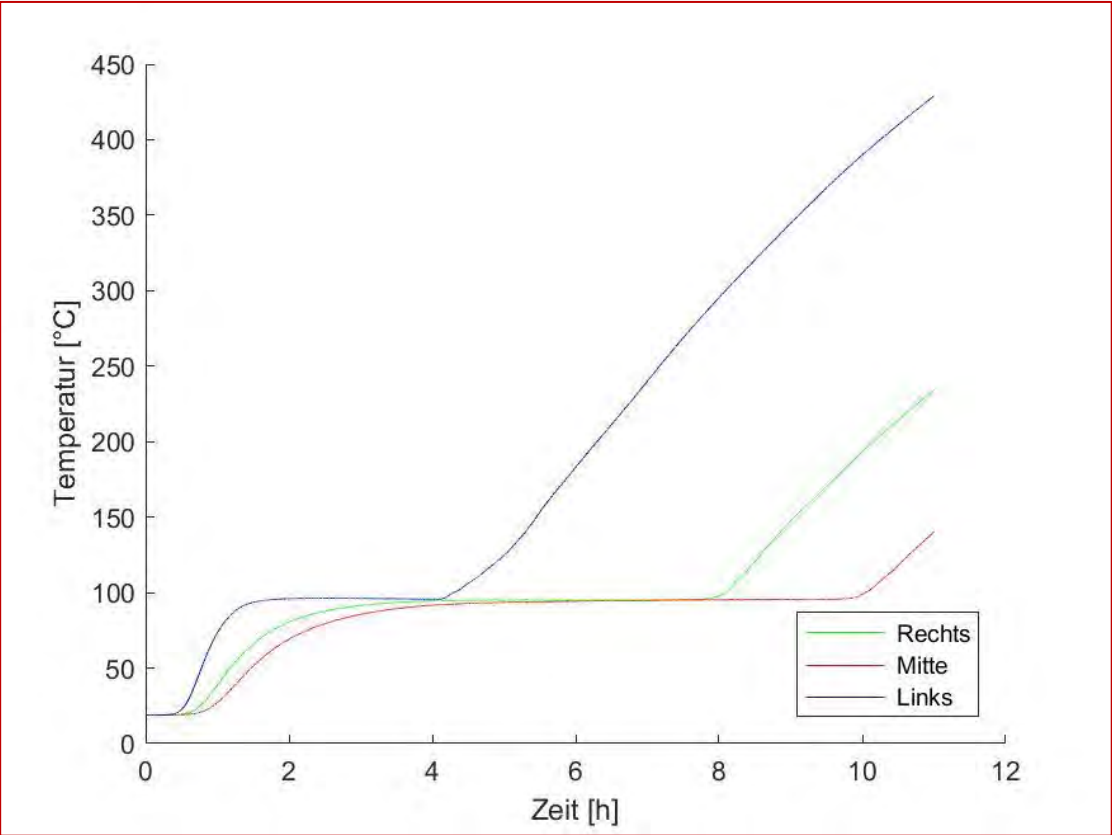


Abbildung 91 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 3, welche auf einem Kreis mit 520 mm angeordnet sind.

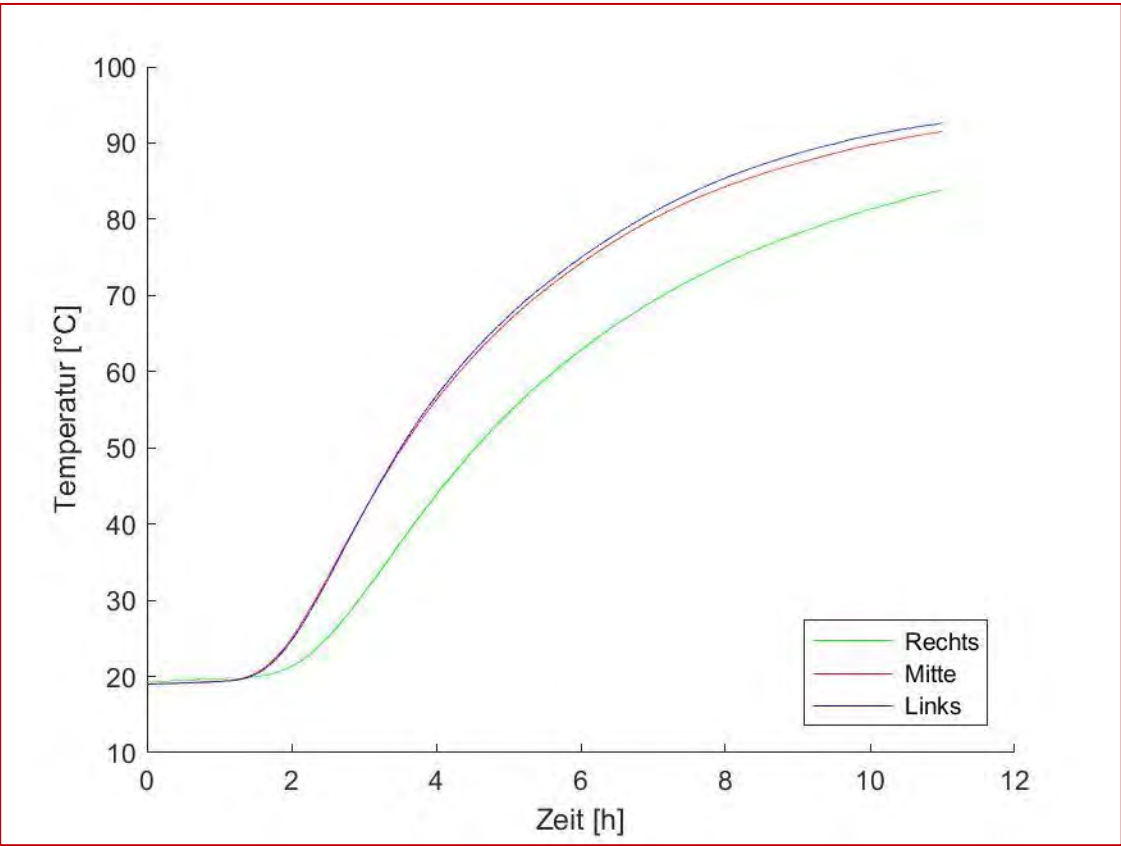


Abbildung 92 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 3, welche auf einem Kreis mit 720 mm angeordnet sind.

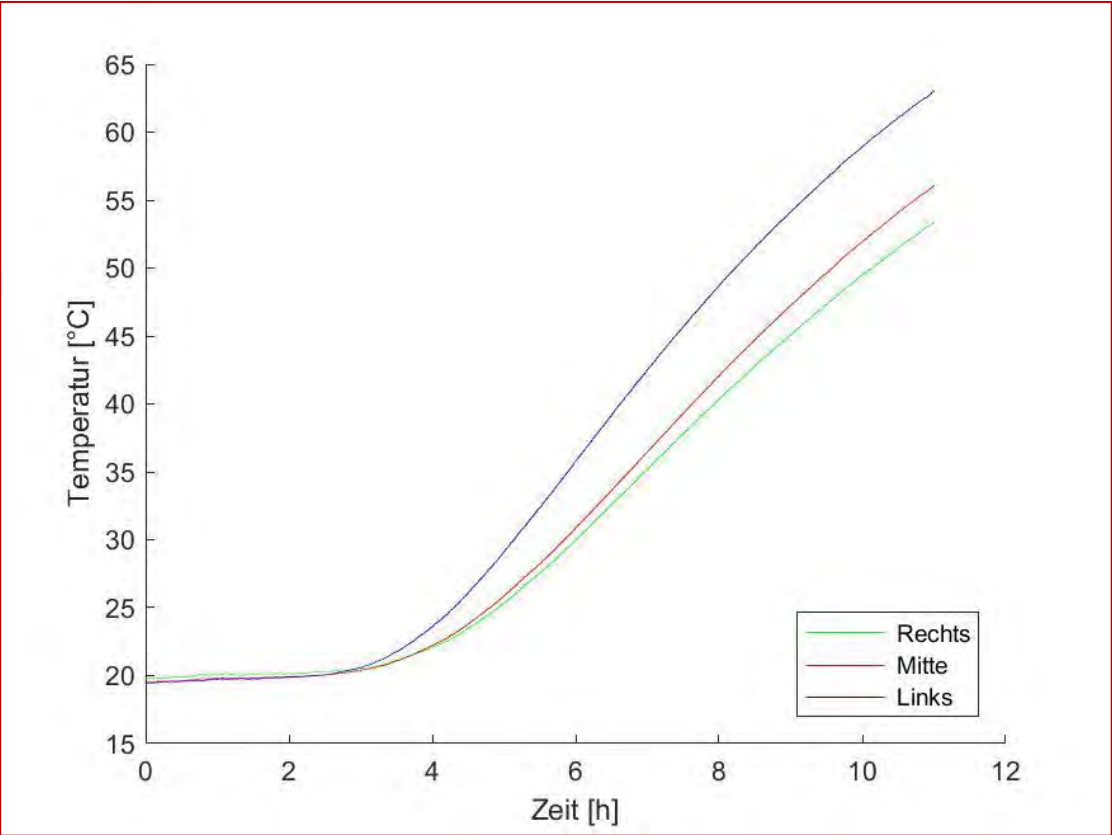
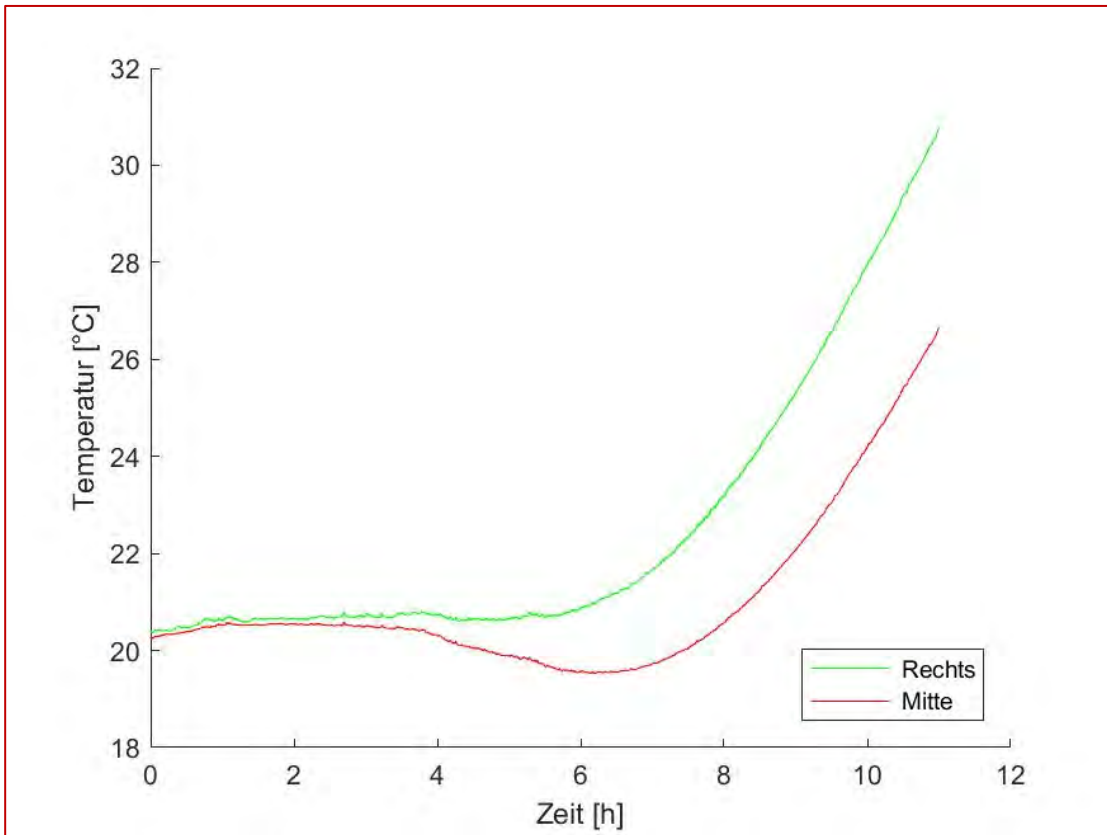


Abbildung 93 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 3, welche auf einem Kreis mit 920 mm angeordnet sind.



Der Boden in unmittelbarer Nähe der Lanze wurde aufgrund der hohen Temperaturen zum Teil aufgeschmolzen (Abbildung 94). Der getrocknete Bereich des Bodens besitzt einen Durchmesser von 570 mm an der Oberfläche (Abbildung 95). Die Organik ist in einem Bereich mit einem Durchmesser von 350 mm vollständig abgebaut. Der Beginn des Abbaus der Organik tritt im Versuch und im Modell bei 380 mm ein.

Abbildung 94 Foto des teilaufgeschmolzenen Bodens an der Lanze.



Abbildung 95 Foto des Bodens nach dem dritten Versuch.

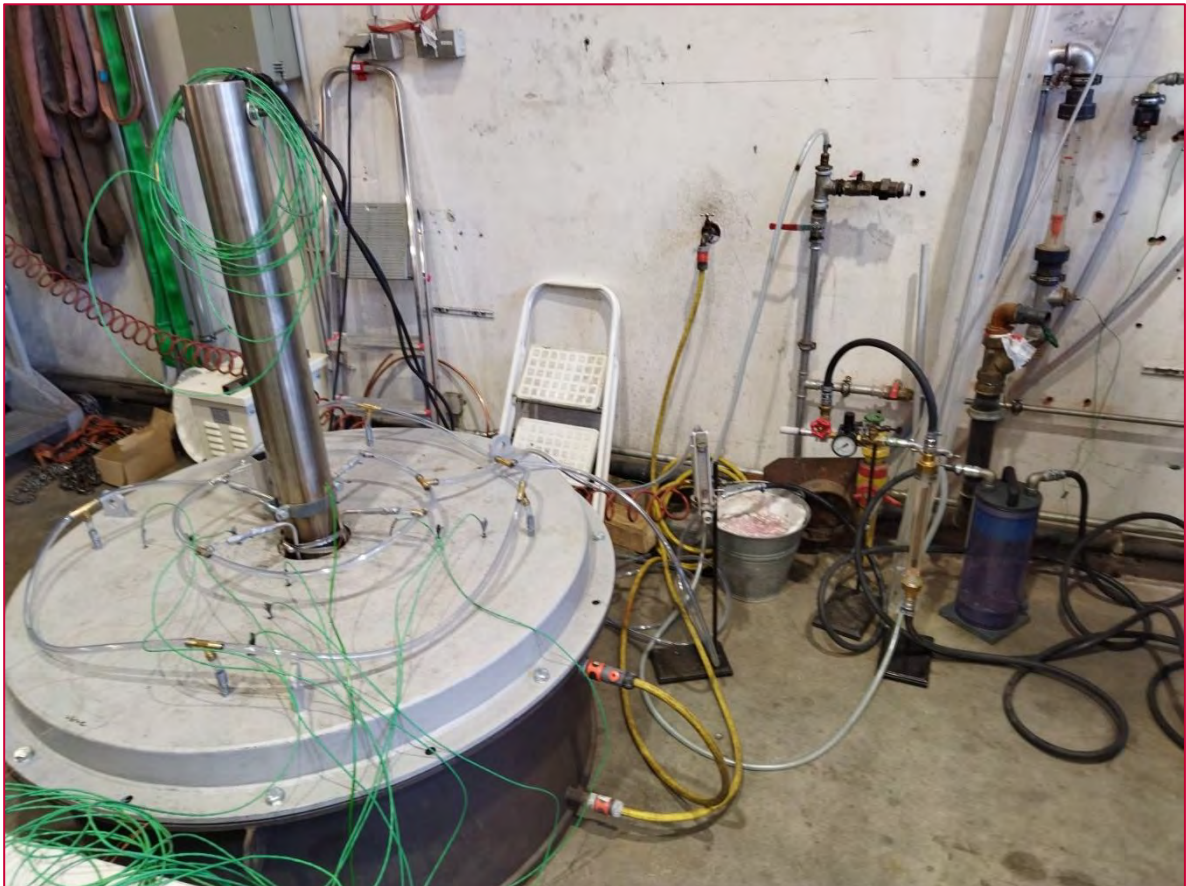


2.3.5 Versuchsaufbau und Resultate Laborversuch 4

Versuchsaufbau

Da die Wärmeleitung des trockenen Bodens den „Widerstand im Ringspalt“ darstellt, muss auf andere Mechanismen des Wärmetransports zurückgegriffen werden. Die Idee ist, durch eine gezielte Luftzufuhr und Absaugung ein Strömungsfeld zu erzeugen, in welchen die Wärme konvektiv transportiert wird. Hierzu wurden zwei 10 mm Ringleitungen installiert (Abbildung 96). In der inneren Ringleitung werden 75 NL/min Pressluft auf 4 Rohre verteilt. Diese sind durch Schellen mit der Lanze verbunden, sodass eine Luftvorerwärmung erfolgt. Um diese zu quantifizieren, wurden Thermoelemente am unteren Ende in die Rohre eingebracht. Diese Rohre enden genau in der Mitte des Bodens. An der äußeren Ringleitung werden 75 NL/min durch einen Injektor abgesaugt. Um den Durchflussmesser und Injektor vor Verschmutzung und Kondensat zu schützen, wurde ein Filter und ein Kondensatabscheider vorgeschaltet.

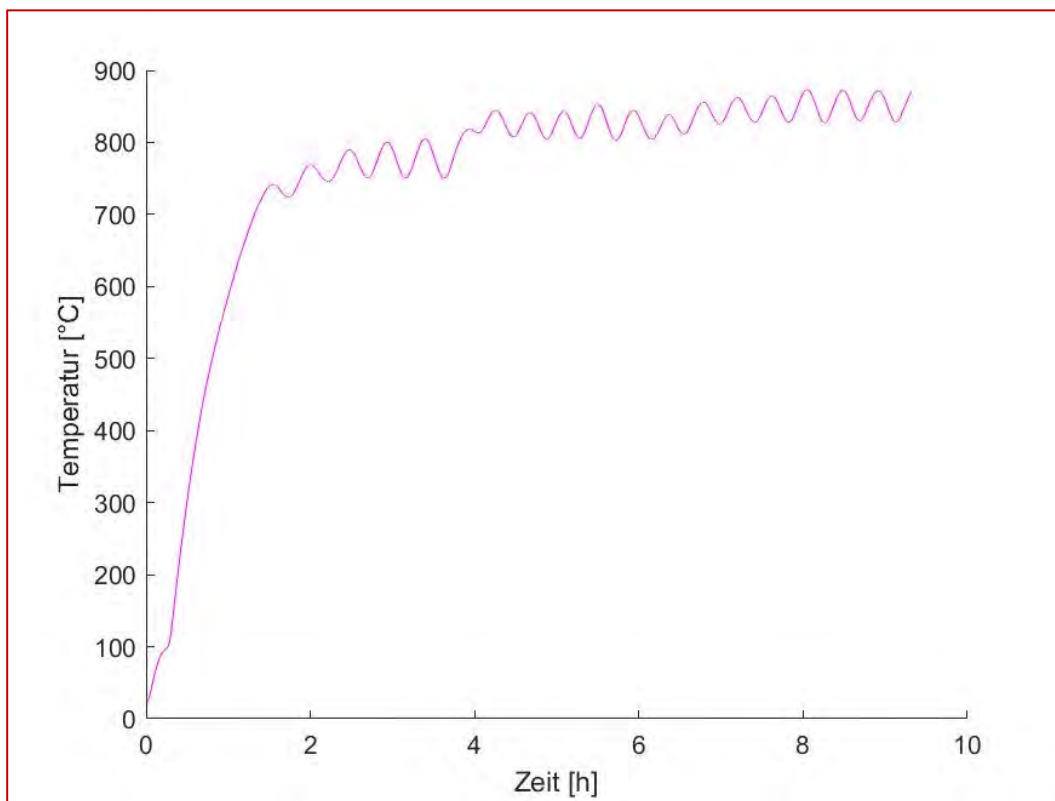
Abbildung 96 Aufbau vierter Versuch, bei dem der Boden konvektiv durchströmt wird



Resultate Versuche 4

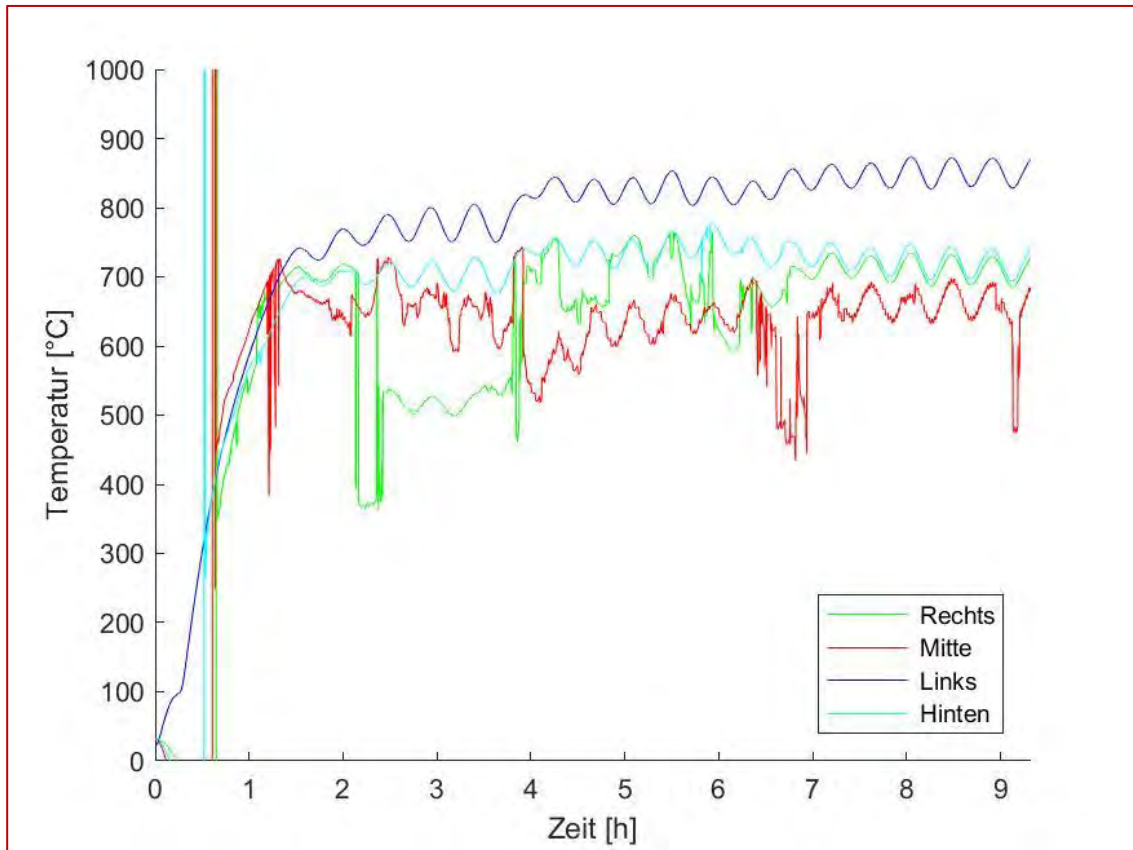
Beim vierten Versuch wurde die Temperatur der Heizlanze auf 600°C, analog zum Versuch 1 in der Regelung vorgegeben. Wie aus Abbildung 97 ersichtlich ist, wurde diese Temperatur von der Regelung um bis zu 238 °C überschritten. Zudem ist ein Wellenmuster der Regelung deutlich zu erkennen.

Abbildung 97 Gemessener Temperaturverlauf der Heizlanze beim dritten Versuch.



Die Temperaturen der in das Ende der inneren Rohre eingeführten Thermoelemente sind in Abbildung 98 dargestellt. Hierbei unterscheiden sich die einzelnen Temperaturen deutlich. Es ist ebenfalls das Regelverhalten der Lanze zu erkennen. Die Ausschläge in den Diagrammen sind auf Kontaktfehler der Thermoelemente zurückzuführen.

Abbildung 98 Gemessene Temperaturen der in das Ende der inneren Rohe eingeführten Thermolemente.



In den Abbildungen 99 bis 101 sind jeweils die Temperaturen des Bodens mit identem Abstand zur Heizlanze zusammengefasst. Bei einem Durchmesser von 320 mm erfolgt die Erwärmung bis zur Siedetemperatur von Wasser. Durch die Konvektion geschieht dies in ca. 1 Stunde und 20 Minuten. Diese konnte beim Versuch 1 mit derselben in der Regelung vorgegebenen Lanzentemperatur erst in 3 Stunden und 30 Minuten erreicht werden. Die Zeit, bis der Boden an der jeweiligen Messstelle trocken ist und die Temperatur weiter ansteigt, unterscheidet sich zwischen den Messungen. Das linke Thermolement erreicht diesen Punkt nach 2 Stunden und 45 Minuten, das rechte nach 6 Stunden und 50 Minuten. Dieser Punkt konnte in der Versuchsdauer von 11:25 Minuten beim Versuch 1 nicht erreicht werden.

Bei den Messungen mit einem Durchmesser von 520 mm, 720 mm und 920 mm kommt es zu einer Erwärmung, welche durch das Verdunsten des Wassers limitiert ist.

Abbildung 99 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 4, welche auf einem Kreis mit 320 mm angeordnet sind.

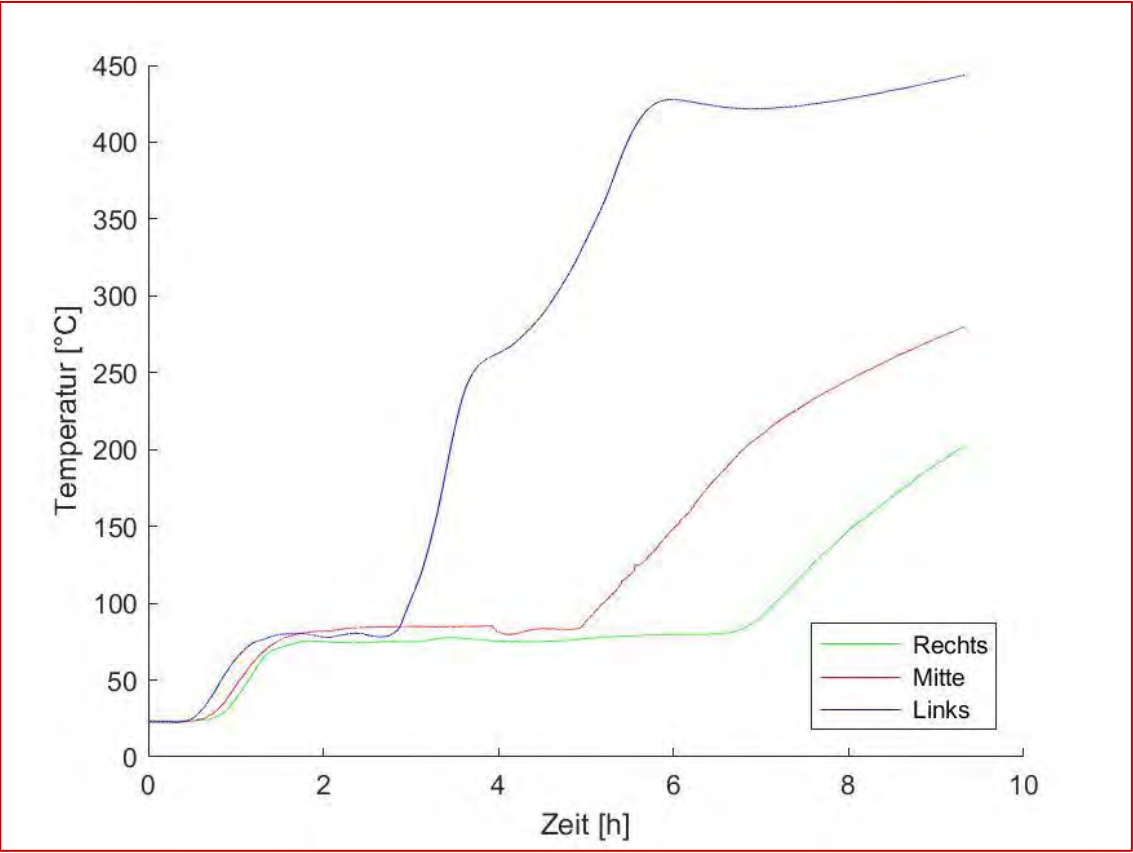


Abbildung 100 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 4, welche auf einem Kreis mit 520 mm angeordnet sind.

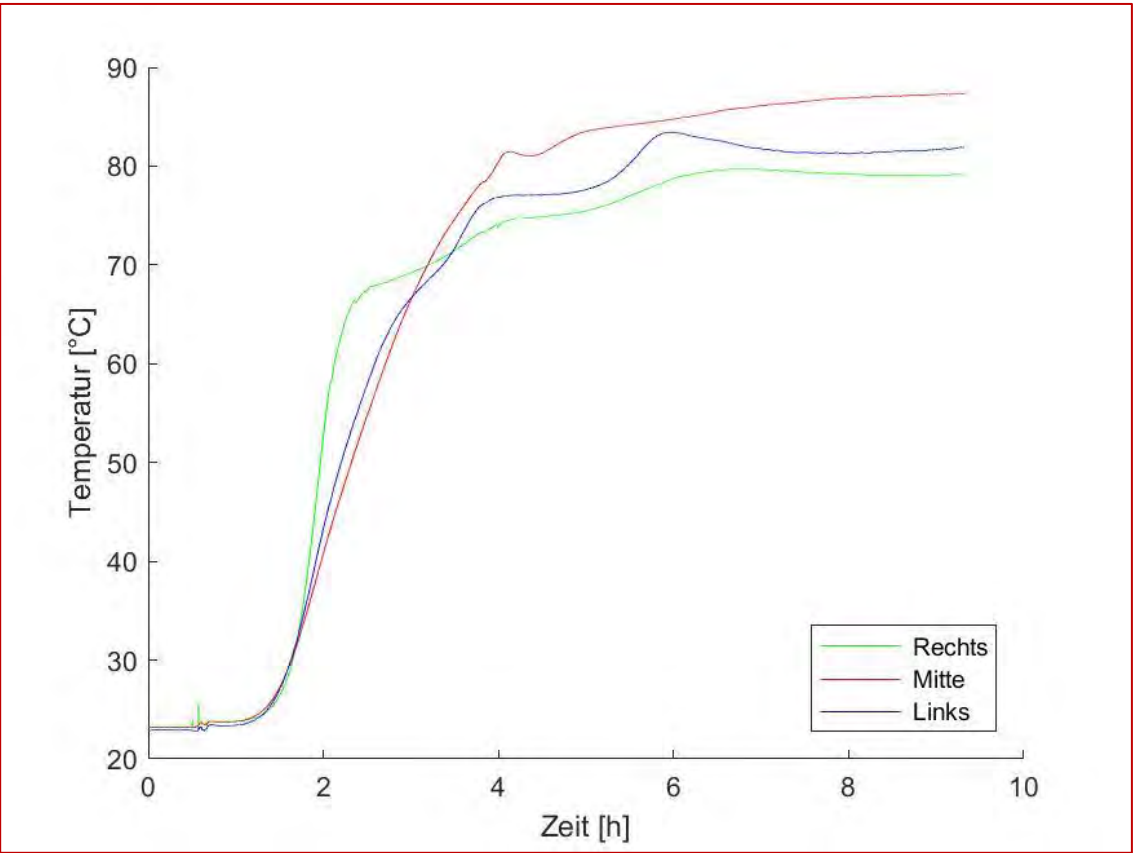
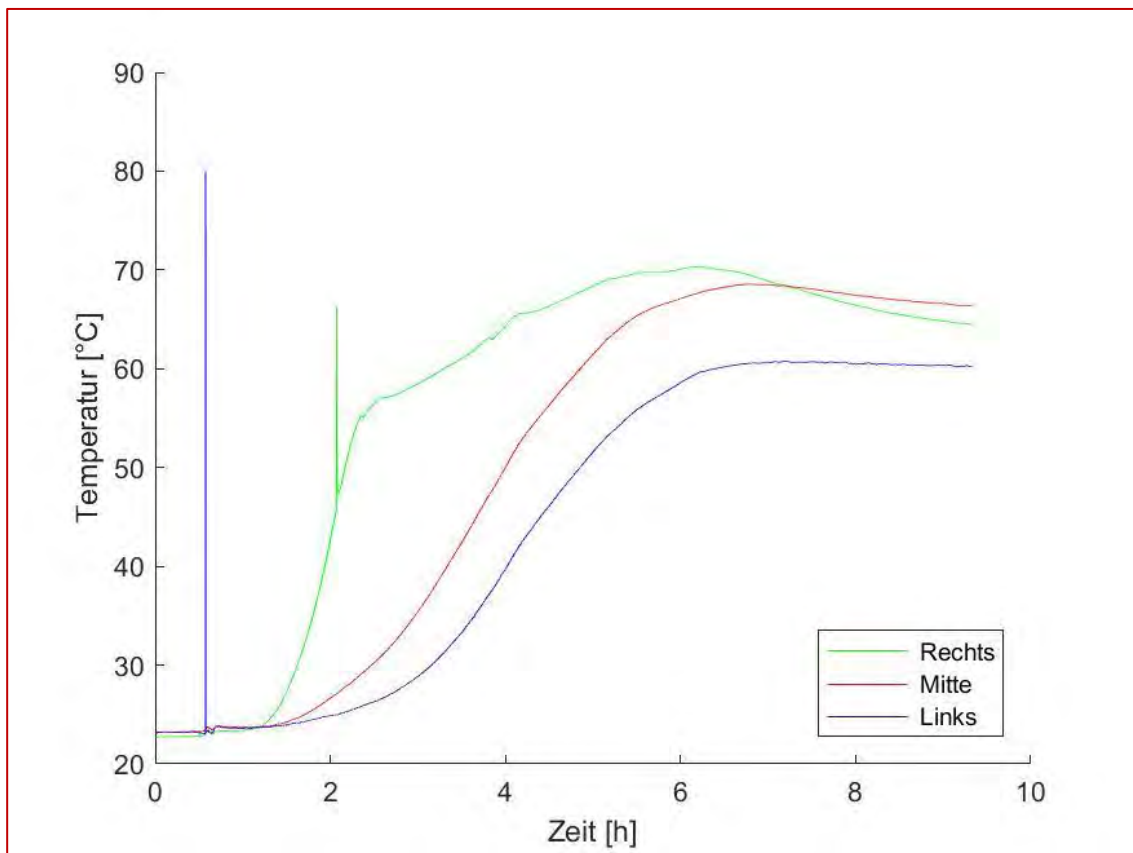


Abbildung 101 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 4, welche auf einem Kreis mit 720 mm angeordnet sind.



Die Abbildungen 102 und 103 zeigen die Oberfläche des Bodens nach dem Versuch. Hier ist zu erkennen, dass sich die Trocknung in Richtung der Ablaugungsstellen bewegt, wobei die Pyrolyse gleichmäßig ist. Der gemittelte Durchmesser des trockenen Bodens beträgt 850 mm, der Bereich der Pyrolyse erstreckt sich von 370 mm bis 430 mm. Der getrocknete und pyrolysierte Bereich nimmt Richtung Boden ab (Abbildung 104). Hier zeigt sich ein horizontal gespiegeltes Bild zur Modellierung des Versuchs. Es ist anzunehmen, dass sich die Strömung nahe an der Oberfläche des Bodens bewegt.

Abbildung 102 Foto des gesamten Bodens nach dem vierten Versuch.



Abbildung 103 Detailfoto des vierten Versuches, für die Position Mitte.



Abbildung 104 Profil des Bodens nach dem vierten Versuch, für die Position Mitte.



2.3.6 Anmerkungen zu den Messergebnissen

Unerwartete Messergebnisse

Die unterschiedlichen Temperaturen von Messtellen mit gleichem Abstand sind auf die Inhomogenität des Bodenmaterials zurückzuführen. Eine gleichmäßige radiale Ausbreitung wäre nur im Idealfall (keine Anisotropie, homogene Verdichtung der Probe) zu erwarten gewesen. Im Versuch wurde allerdings eine Originalprobe verwendet und die gemessenen Temperaturabweichungen spiegeln somit die Realität eines anisotropen, heterogenen Probenkörpers sehr gut wider.

Höhere Temperaturen an der Lanzenoberfläche

Die Differenz bei den gemessenen Temperaturen an der Lanzenoberfläche zwischen Handmessgerät und Regler ist auf eine fehlerhafte Kalibrierung des Reglers zurückzuführen. Dieser hat das vom Thermoelement erhaltene Signal in eine bis zu 100°C geringere Temperatur umgesetzt, so dass trotz Erreichen der Zieltemperatur die Lanzenheizung nicht bzw. zu spät abgeregelt wurde. Für die Versuchsdurchführung und Auswertung der Labortests war der Kalibrierungsfehler nicht von Bedeutung. Dieser führte lediglich zu einer Erweiterung des Temperaturbereichs, in dem die Labortests erfolgten. Für die Auswertung standen die realen, durch das Handmessgerät erfassten Temperaturen zur Verfügung.

Temperaturabfall

Der Temperaturabfall resultiert, wie angemerkt, aus der Wasserkühlung. Diese wurde bei einer Temperatur von ca. 10°C betrieben.

2.3.7 Verbesserung des Wärmeübergangs

Um Aussagen über die Verbesserung des Wärmetransportes treffen zu können, müssen die drei möglichen Mechanismen des Wärmetransports (Konduktion, Konvektion, Wärmestrahlung) in Bezug auf den Lanzenaufbau betrachtet werden. Wie aus den Versuchen ersichtlich wurde, ist die grundlegende Limitation des konduktiven Wärmetransportes im Boden dessen Austrocknung in Nahbereich der Lanze. Das bedeutet, dass die Erwärmung umso langsamer wird, je grösser der Anteil luftgefüllter Poren wird, d.h., je mehr Wasser aus dem Porenraum verdunstet. Der Bodenkörper lässt sich also konduktiv nicht schneller erwärmen, da der ausgetrocknete Nahbereich um die Lanze den Wärmetransport limitiert. Die Einbringung einer Schicht mit hoher Wärmeleitfähigkeit zur Verbesserung der Konduktion würde das Problem nur örtlich verlagern und ist in der Praxis ohnehin nur schwer umsetzbar. Der Wärmeeintrag durch Strahlung ist mit der vierten Potenz temperaturabhängig. Er wird nur im Bereich hoher Temperaturen nahe der Lanzenoberfläche einen nennenswerten Beitrag liefern. Die gezielte Luftführung (erzwungene Konvektion) ist daher, wie die Labortests zeigen, der vielversprechendste Weg zur Lösung dieses Problems. Die erhöhte Permeabilität des Bodens, die sich aus dem Verdampfen des Wassers und der Erhöhung der Porosität ergibt, lässt sich gezielt nutzen, um den Wärmetransport zu verbessern. Dies wurde im Versuch nachgewiesen und in der Simulation bestätigt. Auch die bereits in der Praxis zur Sanierung von Altlasten durchgeführte Injektion von Dampfluft beschreibt eine Ausnutzung der Konvektion zur Erwärmung des Untergrundes. Der Test auf Praxistauglichkeit der erzwungenen Konvektion wird in Kap. 4 beschrieben

2.3.8 Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit von Böden

Im Rahmen der Materialstudien sind die anisotropen Wärmeleitfähigkeiten von Bodenproben von Standorten mit Altlasten im Labor untersucht worden.

Probenentnahme

Für die Bestimmung der anisotropen Wärmeleitfähigkeit von Böden wurden Bodenproben mittels orientierter Stechzylinder an 4 Standorten mit Altlasten genommen. Es handelt sich um die Standorte Lederfabrik Schmidt Leibnitz (ST30), Halde Schrems (ST32), Glanzstoff –

Traisenau (N82) und BBU Miniumfabrik Saag (K29). Für jeden Messort wurde jeweils ein vertikal und horizontal gestochener Zylinder für die Messungen vorbereitet. Die entnommenen Bodenproben bestehen aus einem sehr inhomogenen Material mit Pflanzenanteilen und kleineren Steinen.

Methode

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit an den Bodenproben erfolgt nach dem Prinzip der instationären Linienquelle gemäß ASTM D5334-08. Als Linienquelle dient eine langgestreckte, dünne Nadelsonde. Diese Heizquelle wird in die Probe eingebracht und mit konstanter Leistung beheizt. Dabei wird die Temperatur gleichzeitig im Inneren der Heizquelle registriert. Die Wärmeleitfähigkeit kann dann aus dem registrierten Temperaturverlauf berechnet werden. Da eine exakte Lösung der zugehörigen Gleichung nicht möglich ist, werden Näherungsverfahren zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit verwendet. Für die folgenden Messungen wird das Auswerteverfahren SAM von TK04 verwendet, das auf einer mathematischen Näherung der Form des Temperaturverlaufes beruht und Störfaktoren berücksichtigt.

Messung

Die Messung wird mit der Messapparatur TK04 von Teka durchgeführt. Als Linienquelle wird eine Nadelsonde mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Länge von 60 mm verwendet. Um ein thermisches Gleichgewicht zwischen der Messapparatur und den Proben zu erreichen, befinden sich die Proben 12 Stunden unter atmosphärischen Bedingungen in der Nähe der Messapparatur. Die Messung selbst erfolgt in einem thermisch isolierten Schrank. Für alle Proben beträgt die Heizleistung 3 W/m über eine Heizdauer von 180 s. Die Auswertung der Messungen erfolgt automatisch mit der Methode SAM, wenn dies möglich ist.

Für jeden Zylinder wird eine Messung mit der Nadelsonde parallel zur Zylinderachse durchgeführt und 3 bis 4 Messungen mit der Nadelsonde senkrecht zur Zylinderachse an verschiedenen Positionen. Für die Messungen senkrecht zur Zylinderachse sind Löcher in die Zylinder gebohrt worden, um die Nadelsonde in die Probe einzubringen. Die Messebene ist senkrecht zur Achse der Nadelsonde. Für jede Messposition werden 3 Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Messergebnisse

Tabelle 12 fasst die Mittelwerte und Standardabweichungen der Messwerte für alle Positionen zusammen. Die Orientierung der jeweiligen Messebene ist über die Neigung zwischen -90° und 90° und den Azimut der Streichebene definiert. Eine Neigung von 0° ist als parallel zur Zylinderachse der vertikalen Zylinder definiert.

Die Qualität der Messwerte für die jeweilige Messebene ist in der letzten Spalte angegeben. Messungen, die nicht automatisch mit SAM ausgewertet werden konnten, wurden mit angepassten Parametern neu ausgewertet, falls dies möglich war. Bei der Neuauswertung sind längere Zeitintervalle benutzt worden, wodurch sich die Zuverlässigkeit der Auswertung verringert. Ein Grund für nicht zuverlässige oder auswertbare Messungen sind Kontaktprobleme zwischen der Nadelsonde und der Probe aufgrund von Steinen oder anderen Inhomogenitäten.

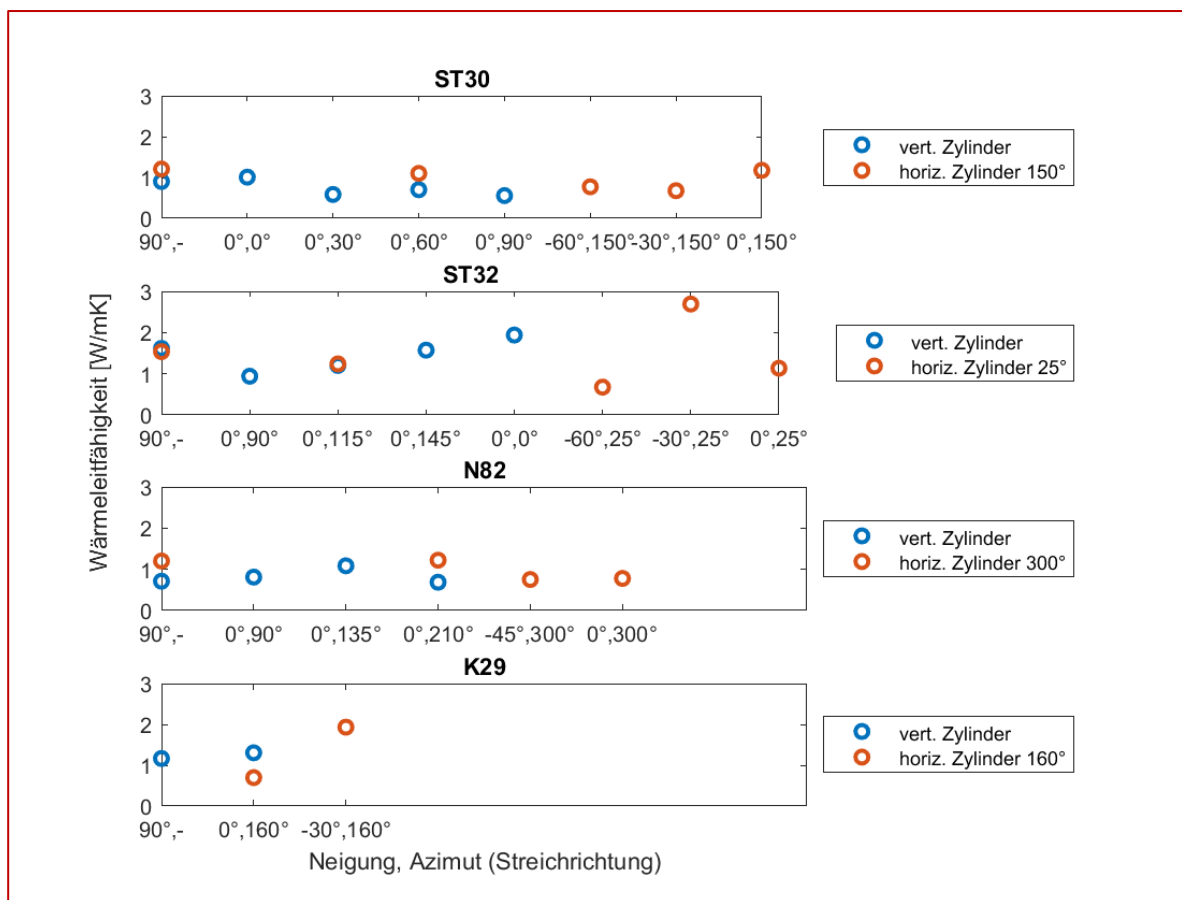
Tabelle 12 Gemittelte Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Qualität der Messung

Probe	Orientierung	Wärmeleitfähigkeit W/mK (Mittelwert)	Wärmeleitfähigkeit W/mK (Std)	Qualität der Messung
ST30 vertikaler Zyl.	$90^\circ,-$	0.902	0.129	große Streuung
ST30 vertikaler Zyl.	$0^\circ,0^\circ$	1.008	0.103	ok
ST30 vertikaler Zyl.	$0^\circ,30^\circ$	0.584	0.058	ok
ST30 vertikaler Zyl.	$0^\circ,60^\circ$	0.701	0.006	gut
ST30 vertikaler Zyl.	$0^\circ,90^\circ$	0.558	0.012	gut
ST30 horizontaler Zyl.	$0^\circ,60^\circ$	1.1	0.016	gut
ST30 horizontaler Zyl.	$90^\circ,-$	1.206	0.01	gut
ST30 horizontaler Zyl.	$-60^\circ,150^\circ$	0.772	0.013	gut
ST30 horizontaler Zyl.	$-30^\circ,150^\circ$	0.676	0.032	Neu ausgewertet
ST30 horizontaler Zyl.	$0^\circ,150^\circ$	1.174	0.044	gut
ST32 vertikaler Zyl.	$90^\circ,-$	1.616	0.041	ok, 2 Messungen

Probe	Orientierung	Wärmeleitfähigkeit W/mK (Mittelwert)	Wärmeleitfähigkeit W/mK (Std)	Qualität der Messung
ST32 vertikaler Zyl.	0°,90°	0.939	0.114	ok
ST32 vertikaler Zyl.	0°,115°	1.201	0.103	ok
ST32 vertikaler Zyl.	0°,145°	1.573	0.035	gut
ST32 vertikaler Zyl.	0°,0°	1.940	0.049	gut
ST32 horizontaler Zyl.	0°,115°	1.239	0.130	ok
ST32 horizontaler Zyl.	90°,-	1.537	0.148	2 Messungen
ST32 horizontaler Zyl.	-60°,25°	0.675	0.022	gut
ST32 horizontaler Zyl.	-30°,25°	2.692	0.141	große Streuung
ST32 horizontaler Zyl.	0°,25°	1.134	0.018	gut
N82 vertikaler Zyl.	90°,-	0.711	0.005	gut
N82 vertikaler Zyl.	0°,90°	0.811	0.036	gut
N82 vertikaler Zyl.	0°,135°	1.086	0.001	Ok, 2 Messungen
N82 vertikaler Zyl.	0°,210°	0.686	0.063	gut
N82 horizontaler Zyl.	0°,210°	1.222	0.06	2 Messungen
N82 horizontaler Zyl.	90°,-	1.201	0.015	gut
N82 horizontaler Zyl.	-45°,300°	0.753	0.03	gut
N82 horizontaler Zyl.	0°,300°	0.779		1 Messung
K29 vertikaler Zyl.	90°,-	1.165	0.0905	ok, 2 Messungen
K29 vertikaler Zyl.	0°,160°	1.305	0.1002	ok
K29 horizontaler Zyl.	-30°,160°	1.9330		Neu ausgewertet niedrig

Probe	Orientierung	Wärmeleitfähigkeit W/mK (Mittelwert)	Wärmeleitfähigkeit W/mK (Std)	Qualität der Messung
K29 horizontaler Zyl.	0°,160°	0.6970		Neu ausgewertet niedrig

Abbildung 105 Gemittelte Wärmeleitfähigkeitswerte in Abhängigkeit von der Orientierung der Messebene



Die Orientierung ist definiert als Neigung zwischen -90° und 90° und dem Azimut der Streichrichtung.

Abbildung 105 zeigt die gemittelten Wärmeleitfähigkeiten und die jeweils zugehörige Orientierung der Messebene als Neigung und Azimut der Streichebene für alle Bodenproben. Für die Proben ST30 und ST32 weisen die Wärmeleitfähigkeiten eine Richtungsabhängigkeit auf. Für die Proben K29 waren Messungen aufgrund des sehr inhomogenen Materials und größerer Steine für viele Positionen nicht möglich. Die

Messwerte für den horizontalen Zylinder sind von geringer Qualität aufgrund von Kontaktproblemen.

Diskussion

Die gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte befinden sich im Bereich von Literaturwerten, die für Böden zwischen 0.6 – 3 W/mK liegen (Zhang & Wang, 2014). Die vertikalen Zylinder der Proben ST30 und ST32 zeigen einen richtungsabhängigen Trend der Wärmeleitfähigkeit. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass dieser Trend durch die Inhomogenität der Probe verursacht wird und sich nicht auf eine Vorzugsrichtung auf einer größeren Skala übertragen lässt. Insgesamt sind die Inhomogenität des Materials und die großen Korngrößen problematisch für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und deren Anisotropie. Kleinere Steine verursachen zu dem Kontaktprobleme und erschweren die Positionierung der Nadelprobe.

3 Neukonzeption eines Planungstools zur TCH

Ziel für die Neukonzeption eines Planungstool ist die Auslegung von TCH-Sanierungen sowie die Bilanzierung der Wärme und Stoffströme mit hinreichender Genauigkeit in kurzer Rechenzeit.

3.1 Entwicklung eines benutzerfreundlichen Planungstools zur Dimensionierung der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung

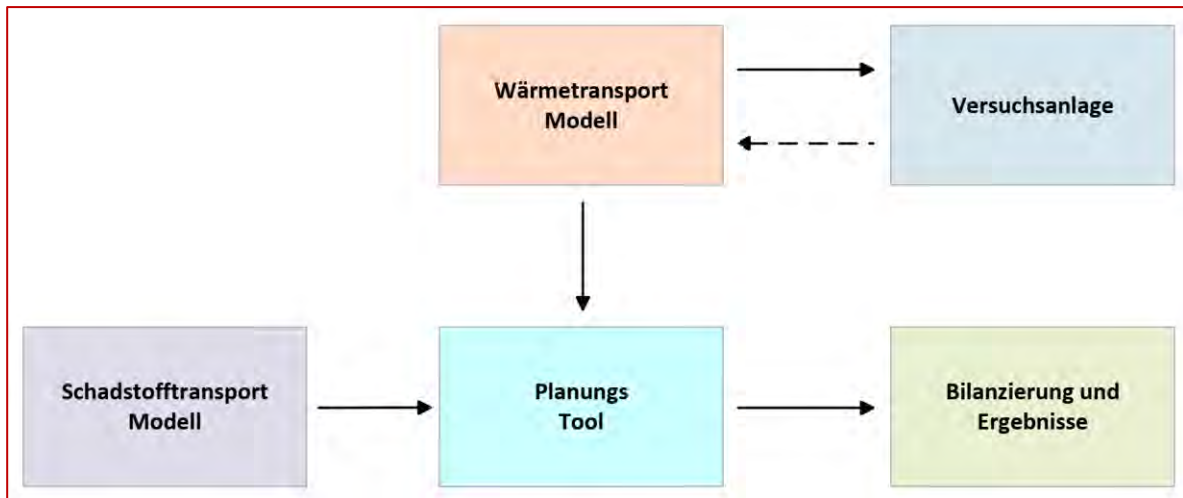
Das Planungstool besteht aus dem in Kap. 2.1.6 entwickelten vereinfachten Wärmetransportmodell, das mit den Ergebnissen aus der Versuchsanlage validiert wurde, und einem Schadstofftransportmodell zur Beschreibung des temperaturabhängigen Austrags von Schadstoffen bei der thermischen Sanierung (Kap. 3.2)

3.1.1 Entwicklung und Vorgehen

Die Anforderungen an das Planungstool sind brauchbare und hinreichend genaue Ergebnisse bei gleichzeitiger Benutzerfreundlichkeit und schneller Lieferung von Ergebnissen.

In Abbildung 106 ist das Vorgehen zur Entwicklung des Tools dargestellt. Als Berechnungsergebnisse werden eine Bilanzierung der Energie- und Schadstoffströme sowie die entsprechenden Eckdaten für die Auslegung einer TCH-Sanierung erhalten.

Abbildung 106 Entwicklung und Vorgehen für das Planungstool

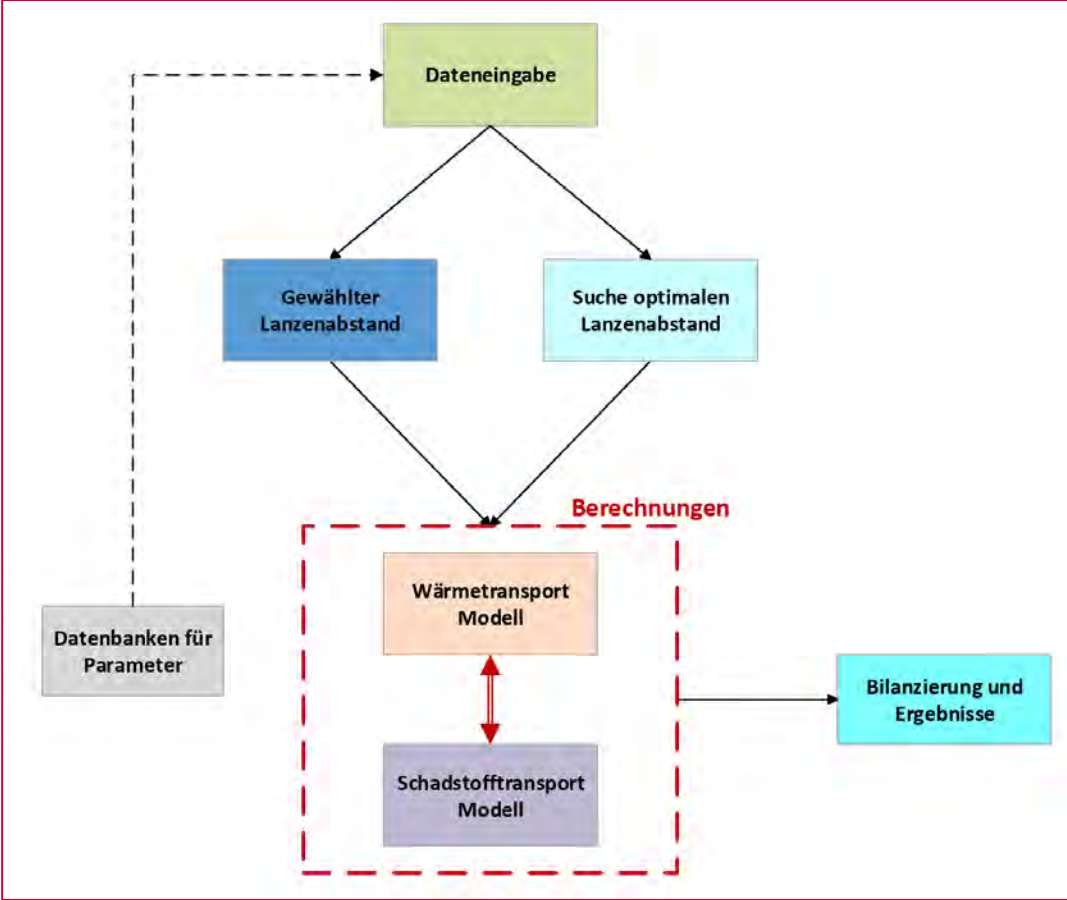


3.1.2 Aufbau und Struktur des Tools

Der grundsätzliche Aufbau des Planungstools ist in Abbildung 107 ersichtlich. Im Vordergrund steht die Abschätzung von optimalen Lanzenabständen, bei welchen der zur Sanierung eines belasteten Bodenkörpers erforderliche Schadstoffaustrag mit geringstem wirtschaftlichem Aufwand erreicht wird. Die zur Berechnung erforderliche Boden- und Schadstoffparameter werden in Datenbanken verwaltet.

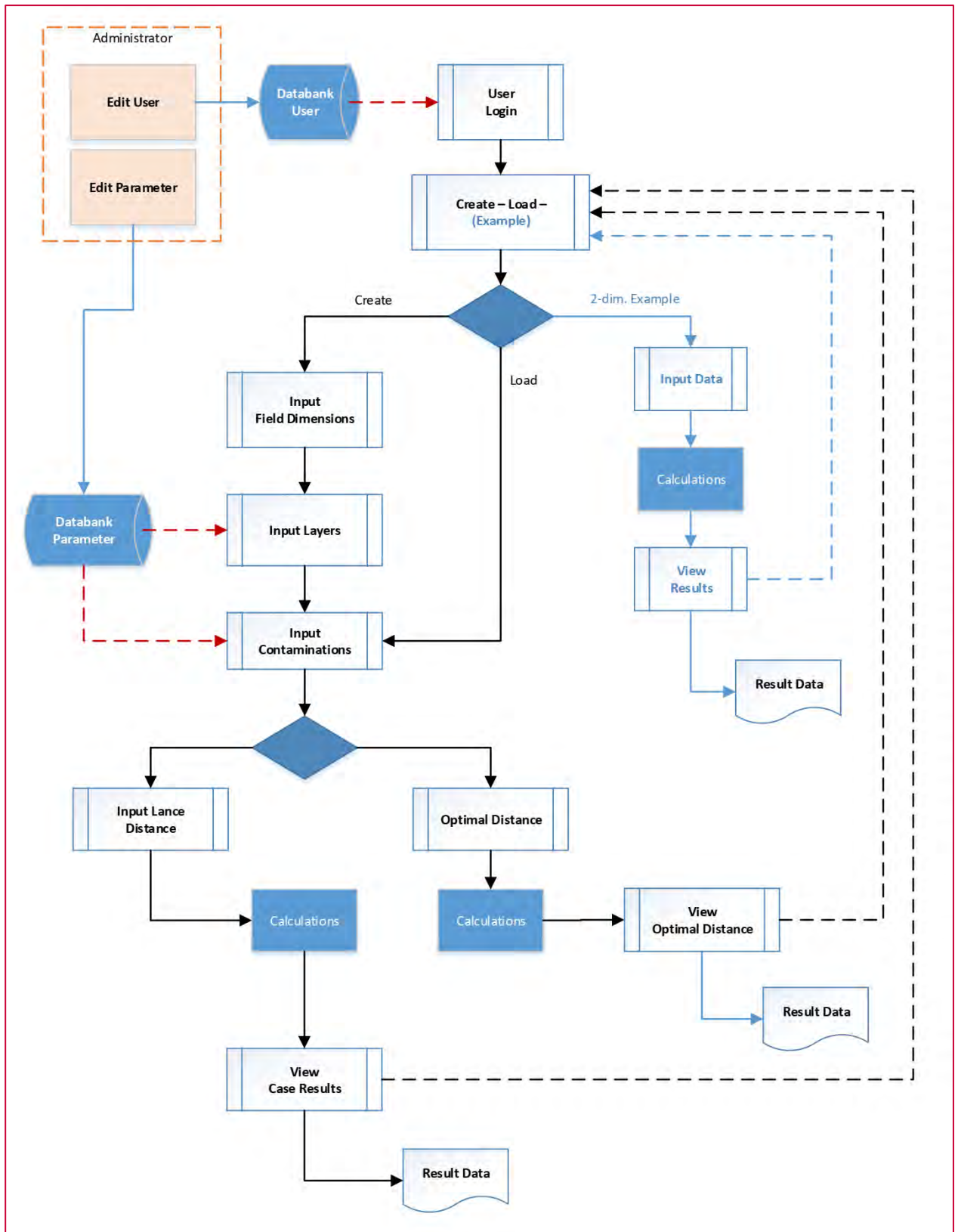
Für die weitergehenden Berechnungen zum Energiebedarf und zum Schadstoffaustrag innerhalb der Transportmodelle können statt dieser abgeschätzten Lanzenanordnungen auch manuell eingegebene Anordnungen verwendet werden.

Abbildung 107 Aufbau des Planungstools



Der strukturelle Aufbau des Tools ist in Abbildung 108 dargestellt. Einige Elemente (den Schadstofftransport betreffend) sind in Kap. 3.2 erläutert.

Abbildung 108 Struktureller Aufbau des Planungstools



User Login: Hier finden die Anmeldung zur Nutzung des Tools sowie die Zuweisung von gespeicherten Berechnungen des Users statt.

Create – Load – Example: Es erfolgt die Auswahl zur Erstellung einer neuen Berechnung (Sanierungsfeld) oder das Laden einer bereits bestehenden Berechnung des Users. Zudem besteht auch die Möglichkeit, ein Beispiel mit zweidimensionalem Aufbau zur Veranschaulichung zu starten.

Input Field Dimensions: In diesem Teil werden die Hauptabmessungen des Sanierungsfeldes (Länge, Breite und Tiefe) eingegeben.

Input Layers: Das Tool unterteilt das Sanierungsfeld tiefenmäßig in Schichten. Jede Schicht (Layer) kann über eine Bodenart aus der Datenbank definiert werden.

Input Contaminations: Hier werden die Kontaminationen der jeweiligen Bodenschicht eingetragen. Dazu werden sogenannte Erkundungsbohrungen mit Positionsdaten und Kontaminationen in den jeweiligen Tiefen eingesetzt.

Input Lance Distance: Es besteht die Möglichkeit die Abstände und Eckdaten der Heizlanzen manuell zu wählen. Danach erfolgt ein automatisches Erstellen der Positionen für die Heiz- und Absaugungslanzen. Nach den durchgeführten Berechnungen sind die Ergebnisse in **View Case Results** verfügbar.

Optimal Distance: Dieser Block berechnet innerhalb zu wählender Grenzen eine Anordnung mit optimalem Abstand zwischen den Heizlanzen. Als Kriterien gelten das zu erreichende Sanierungsziel sowie die Kosten für Heizlanzen je Meter und Heizstrom je kWh. Die Resultate aus diesen Berechnungen können anschließend in **View Optimal Distance** aufgezeigt werden.

Calculations: Hier werden die Berechnungen ausgeführt. Der Wärmetransport wurde um einen konduktiven Anteil in vertikaler Richtung erweitert. An der obersten Schicht (Erdoberfläche) erfolgt ein konvektiver Wärmetransport, welcher von der angegebenen Außentemperatur abhängt.

Result Data: Ausgabe von Ergebnissen zum zeitlichen Verlauf wesentlicher Parameter, welche in Form von csv-Dateien generiert und gespeichert werden können.

2-dim. Example: Hier besteht die Möglichkeit, den Wärmeeintrag sowie den Schadstoffaustrag von vier Luftinjektions-Heizlanzen und einer zwischenliegenden Absaugungslanze in einer Anordnung bei variablen Eingabeparametern zu berechnen. Dies dient zur Veranschaulichung als auch einer Vorabschätzung von Parametern.

View Results: Zur visuellen Darstellung der Temperaturverteilung des 2-dim. Examples dient ein Diagramm, welches die Temperaturen nach einem vorab gewählten Zeitraum (Heizdauer) zeigt. Die errechneten zeitlichen Verläufe von wesentlichen Parametern können separat generiert werden.

Edit User und **Edit Parameter** können vom User nicht benutzt werden. Hier erfolgen Hinzufügen, Bearbeitung und Löschen von Usern sowie Boden- und Schadstoffparametern durch den Administrator.

Databank User: In dieser Datenbank sind die Benutzer mit Benutzername und jeweiligem Passwort gespeichert. Mit Hilfe des Benutzernamens erfolgt eine Zuweisung zu bereits vorhandenen Berechnungen dieses Benutzers. Neue Berechnungen (Sanierungsfelder) können so diesem Benutzer zugeordnet und gespeichert werden. Eine Bearbeitung von bestehenden sowie ein Hinzufügen von neuen Benutzern sind durch den Administrator möglich.

Datenbank Parameter: Zwei Datenbanken sind in das Planungstool integriert. Die Parametersammlung für Bodenparameter beinhaltet alle notwendigen Daten zur Beschreibung der unterschiedlichen Böden. Für die Schadstoffe wird eine Datensammlung bereitgestellt, die für die Berechnungen zum Schadstoffaustrag notwendigen Schadstoff spezifischen Parametern enthält. Die Inhalte der Datenbank für Bodenparameter sind in Abbildung 109 aufgezeigt.

Abbildung 109 Struktur der Datenbank für Bodenparameter

Bodenart	rho	por	kfW	cp0	cp1	cp2	ah0	ah1	ah2	av0	av1	av2	feldkap	
Ton	1600	0,04	8,64E-7	900	0,02	-0,00001	1,8	-0,0015	0,000002	1	-0,001	0,0000012	0,30	Bearbeiten Löschen
Schluff	1550	0,08	8,64E-3	900	0,02	-0,00001	1,6	-0,0015	0,000002	1	-0,001	0,0000012	0,28	Bearbeiten Löschen
Feinsand	1850	0,1	0,864	840	0,02	-0,00001	1,2	-0,0015	0,000002	1	-0,001	0,0000012	0,25	Bearbeiten Löschen
Mittelsand	1700	0,13	8,64	840	0,02	-0,00001	1,2	-0,0015	0,000002	1	-0,001	0,0000012	0,20	Bearbeiten Löschen
Grobsand	1650	0,2	17,28	840	0,02	-0,00001	1,2	-0,0015	0,000002	1	-0,001	0,0000012	0,15	Bearbeiten Löschen
Bodenart:	rho:	por:	kfW:	cp0:	cp1:	cp2:	ah0:	ah1:	ah2:	av0:	av1:	av2:	feldkap:	
														<input type="button" value="Add"/>

Für jede Bodenart sind Parameter wie Dichte, Porosität und der kf-Wert vorgesehen. Die spezifische Wärmekapazität sowie die horizontale und vertikale Wärmeleitfähigkeit der jeweiligen Bodenart beinhalten Polynomparameter, mit welchen die temperaturabhängigen Werte im Tool errechnet werden können. Diese Datenbank kann direkt vom Administrator erweitert und bearbeitet werden.

Eine ähnliche Struktur hat die Datenbank für die Schadstoffe (Abbildung 110). Neben der Molmasse befinden sich die Antoine-Parameter für die Berechnung der Dampfdrücke. Die Wasserlöslichkeit und die Siedetemperatur sind als Konstanten eingetragen. Für die Berechnung der druckabhängigen Gemischsiedetemperatur sind die Parameter für die Approximationsfunktion aT2 bis aT0 vorgesehen. Mit Hilfe von kDS lässt sich der freie Diffusionskoeffizient des Schadstoffes berechnen.

Abbildung 110 Struktur der Datenbank für Schadstoffparameter

Name	Formula	MG	A	B	C	Sol	Tboil	aT2	aT1	aT0	kDS	Density	
DCM	CH2Cl2	84,93	4,07622	1070,07	223,24	0,0169	39,64	-12,1875808125421	52,424579139348	-2,77071738770657	4,89195583681169E-10	1330	Bearbeiten Löschen
CF	CHCl3	119,4	3,96288	1106,904	218,552	0,00845	61,18	-12,7798581648906	54,6211080263198	13,6823298569772	4,23718936925954E-10	1480	Bearbeiten Löschen
PCE	C2Cl4	165,8	4,18056	1440,819	223,979	0,0002	121,05	-12,7261582537247	53,9439740314458	46,4703459008908	3,54966686720638E-10	1620	Bearbeiten Löschen
Name:	Formula:	MG:	A:	B:	C:	Sol:	Tboil:	aT2:	aT1:	aT0:			
											kDS:	Density:	<input type="button" value="Add"/>

3.1.3 Anwendung des Tools und Ergebnisse

Das Tool wird als Online-Anwendung ausgeführt und ist über eine ASP.NET (Active Server Pages .NET) Oberfläche programmiert. Dabei können zusätzlich Codes in „Code-Behind“-Dateien zum Einsatz kommen. Hier sind die Algorithmen des Tools und die numerischen Berechnungen in der Programmiersprache C# ausgeführt.

Es werden folgend kurz die Anwendungen und Ergebnisse des Tools gezeigt und anhand eines Beispiels erläutert.

Der Einstiegslink www.tools-s-pec.net führt zum Online-Tool und weiter zur „Login“ Maske, um die Benutzung zu ermöglichen und die Session einem Benutzer zuzuordnen. So können etwaige Speicherungen von ausgeführten Berechnungen beim nächsten Einstieg wieder aufgerufen werden.

Abbildung 111 User Login Maske des Tools

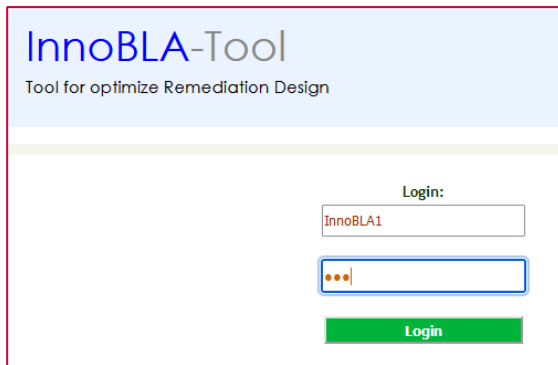


Abbildung 111 zeigt den Login Bereich. Für die Nutzung innerhalb des Projektes kann mit den Benutzernamen „InnoBLA1“ und „InnoBLA2“ sowie jeweils mit dem zugehörigen Passwort „123“ eingeloggt werden.

Abbildung 112 Auswahlmaske für Berechnungen



Nach dem Login erscheint eine Auswahlmaske (siehe Abbildung 112), mit welcher man die Ergebnisse der Berechnungen einsehen kann oder direkt zum Beispiel „2-dim. Example“ gelangt, welches die Kombination von Heizlanzen mit Luftinjektion und Absaugung berechnet. Bei der Auswahl von „Load Calculation“ erscheint eine Auswahlliste von bereits gerechneten Beispielfeldern, welche von „InnoBLA“ – Nutzern eingesehen werden können.

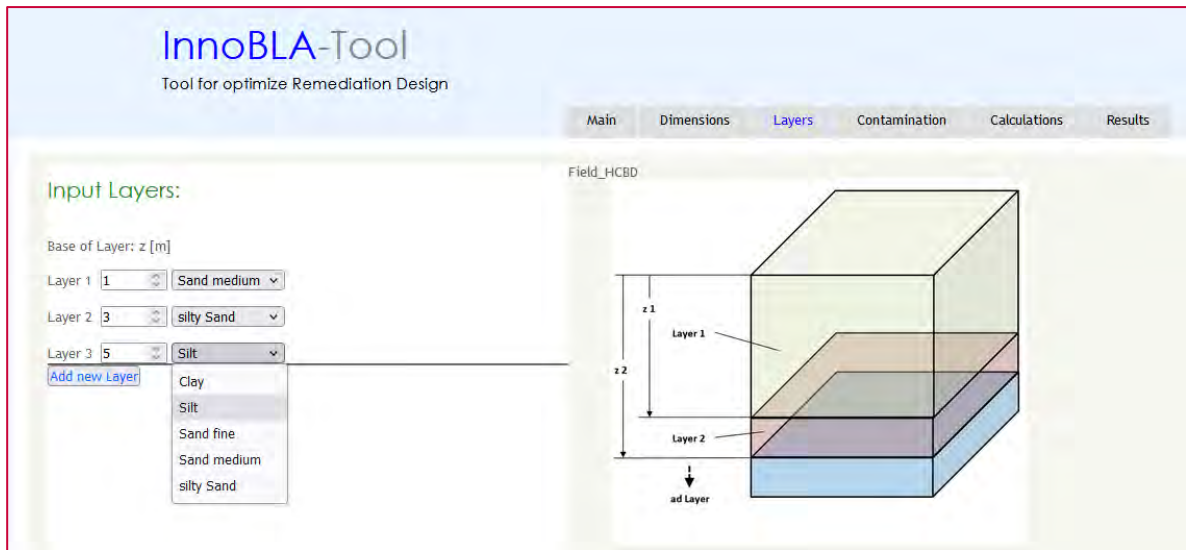
Abbildung 113 Maske für Benennung und Feldabmessungen

The screenshot shows the 'InnoBLA-Tool' interface. At the top, it says 'Tool for optimize Remediation Design'. There are navigation tabs: 'Main', 'Dimensions' (selected), 'Layers', 'Contamination', 'Calculations', and 'Results'. Under 'Input Calculation-Name:', there is a text box containing 'Field_HCBD'. Below that, under 'Input Field-Dimensions:', there are three input fields: 'Length: 20 m', 'Width: 20 m', and 'Depth: 5 m'. A 'Go To Next Step' button is located below these fields. To the right of the input fields is a 3D diagram of a rectangular prism. The top edge is labeled 'Length', the left edge is labeled 'Width', and the right vertical edge is labeled 'Depth'.

Startet man eine neue Berechnung, ist vorab der Berechnungsname anzugeben, unter welchem die dazugehörigen Dateien gespeichert werden. Die Feldabmessungen werden ebenso hier eingetragen (Abbildung 113). Nach Eingabe aller Abmessungen kann mit dem Button „Got To Next Step“ weiterverfahren werden.

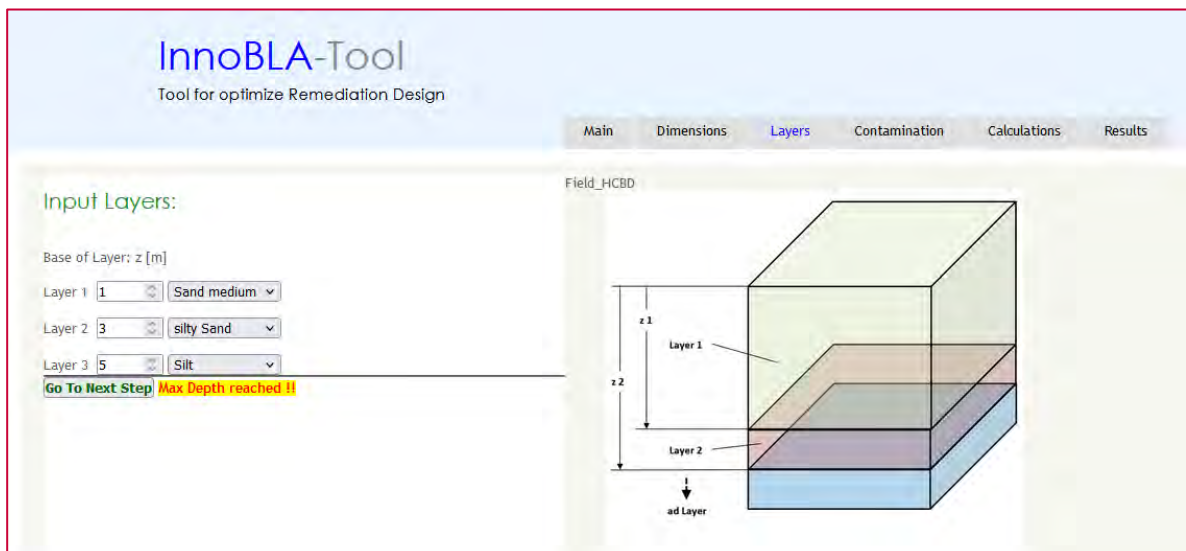
Man gelangt direkt in den Eingabebereich für die unterschiedlichen Bodenschichten (Abbildung 114). Für jede Schicht kann eine Bodenart ausgewählt werden. Die Dicke dieser Schicht wird über die Tiefe der Unterkante dieser Schicht festgelegt.

Abbildung 114 Eingabe der Bodenschichten



Für die jeweiligen Schichten werden so die Parameter zur zugehörigen Bodenart zugewiesen. Ist die Tiefe des Feldes erreicht, ist hier die Eingabe abgeschlossen und es erscheint ein Hinweis (Abbildung 115).

Abbildung 115 Abschluss der Eingabe für den Bodenaufbau



Mit der Bestätigung des „Go To Next Step“ Button gelangt man in den Eingabebereich für die Schadstoffe, die bei der Sanierung entfernt werden sollen.

Die Eingabe der Schadstoffe erfolgt über einen Ansatz, bei welchem Daten aus Erkundungsbohrungen verwendet werden können. Vorab kann man aus dem Dropdown Menü einen Schadstoff (hier HCBd) wählen (Abbildung 116). Man setzt eine „New Drilling“ als „Exploration drilling“ und benennt diese. Die Positionskordinaten werden über die Feldkoordinaten eingetragen (Position X und Position Y). Als „Range“ wird die Reichweite der Kontaminationen im Umfeld der Erkundungsbohrung eingetragen. Innerhalb dieser Reichweite interpoliert später das Schadstoffmodell die Schadstoffverteilung.

Abbildung 116 Eingabe der Schadstoffe

The screenshot shows the InnoBLA-Tool interface. At the top, the title is "InnoBLA-Tool" with the subtitle "Tool for optimize Remediation Design". Below the title is a navigation bar with tabs: "Main", "Dimensions", "Layers", "Contamination" (selected), "Calculations", and "Results".

In the "Contamination" tab, there is a "Select Contaminant ->" dropdown menu set to "HCBd". Below this is the "Exploration drillings:" section. It contains a form with the following fields and values:

- Name: E1
- Pos. X [m]: 7,5
- Pos. Y [m]: 7,5
- Range [m]: 2,5

There are buttons for "Edit drilling", "New drilling", and "Save drilling". Below the form is a table for "Contaminations [mg/kg]":

Depth [m]	Concentration [mg/kg]
0 - 1 m	
1 - 2 m	1000
2 - 3 m	1000
3 - 4 m	
4 - 5 m	

At the bottom left of the form is a "Go To Next Step" button. To the right of the form is a graph titled "Field_HCBd" and "Exploration drillings". The graph shows a 20x20 grid with "Width [m]" on the y-axis and "Length [m]" on the x-axis. A red square is drawn on the grid, representing the drilling area, centered at (7.5, 7.5) with a side length of 2.5m.

Die Schadstoffe selbst werden für jede Tiefe aus den Konzentrationsdaten der Erkundungsbohrung in mg Schadstoff je kg Boden eingetragen.

Mit „Save drilling“ erfolgt ein Speichern der Daten und die „Exploration drilling“ mit der jeweiligen Reichweite wird im Diagramm graphisch dargestellt (Abbildung 117).

Zudem besteht die Möglichkeit bereits gespeicherte Bohrungen mit „Edit drilling“ auszuwählen und zu ändern (Abbildung 118).

Abbildung 117 Darstellung der Erkundungsbohrung

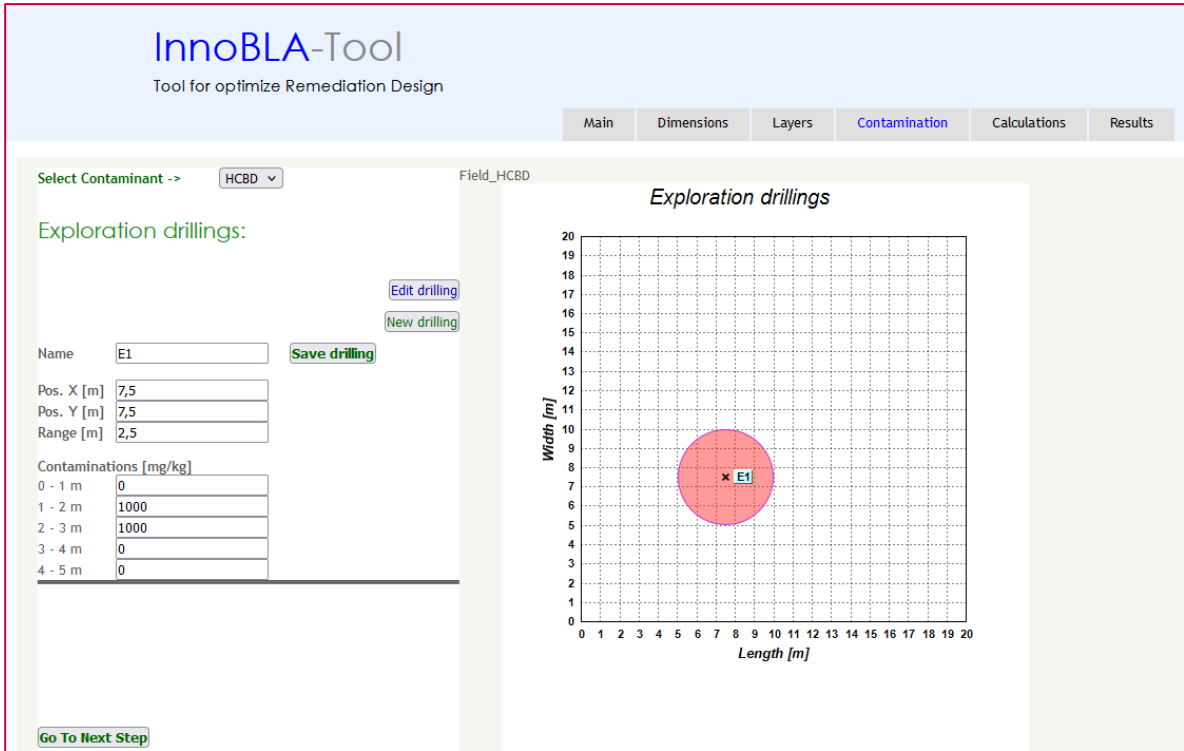
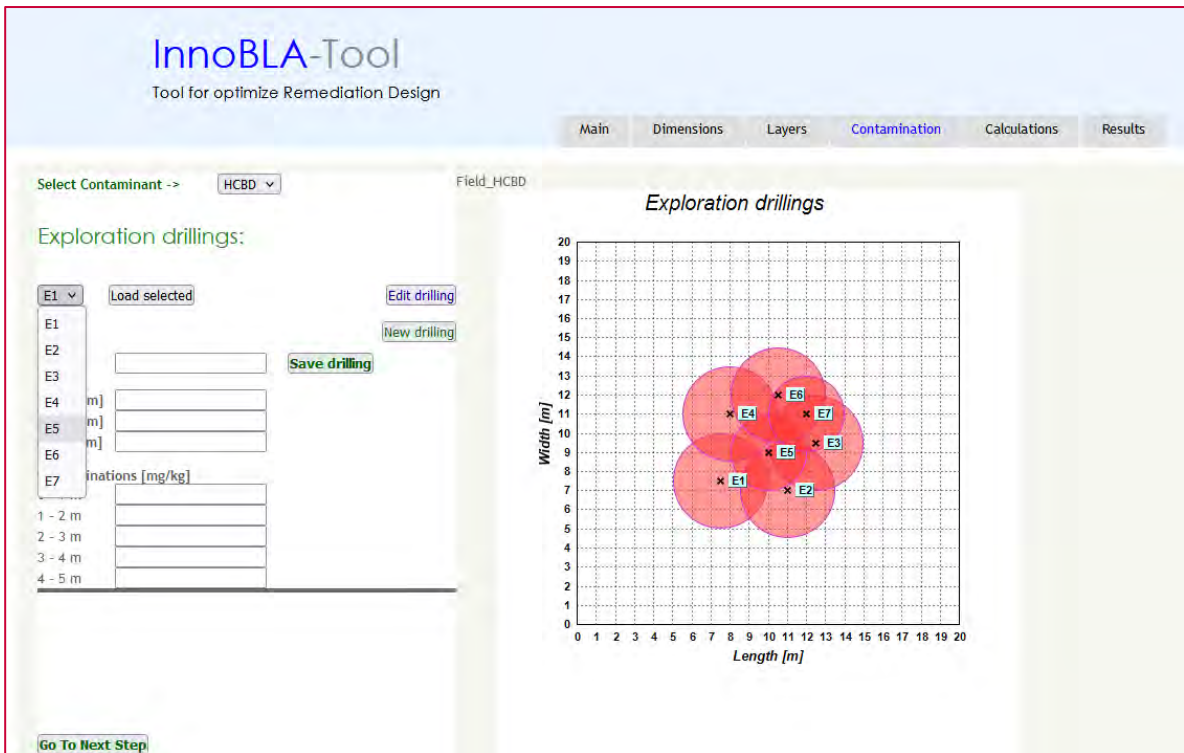


Abbildung 118 Laden von Erkundungsbohrungen



Nach Eingabe der bekannten oder angenommenen Schadstoffe sind nun alle Rahmenparameter des Feldes bekannt und man gelangt in den Bereich zur Berechnung eines manuell einzugebenden Falles „Calculate Case“ oder der Bestimmung des optimalen Lanzenabstandes „Calculate Optimum“. Abbildung 119 zeigt die Auswahlmöglichkeit von Berechnungen und die Möglichkeit zum direkten Zugang der Ergebnisse bereits ausgeführter Berechnungen „Results Case“ und „Results Optimum“.

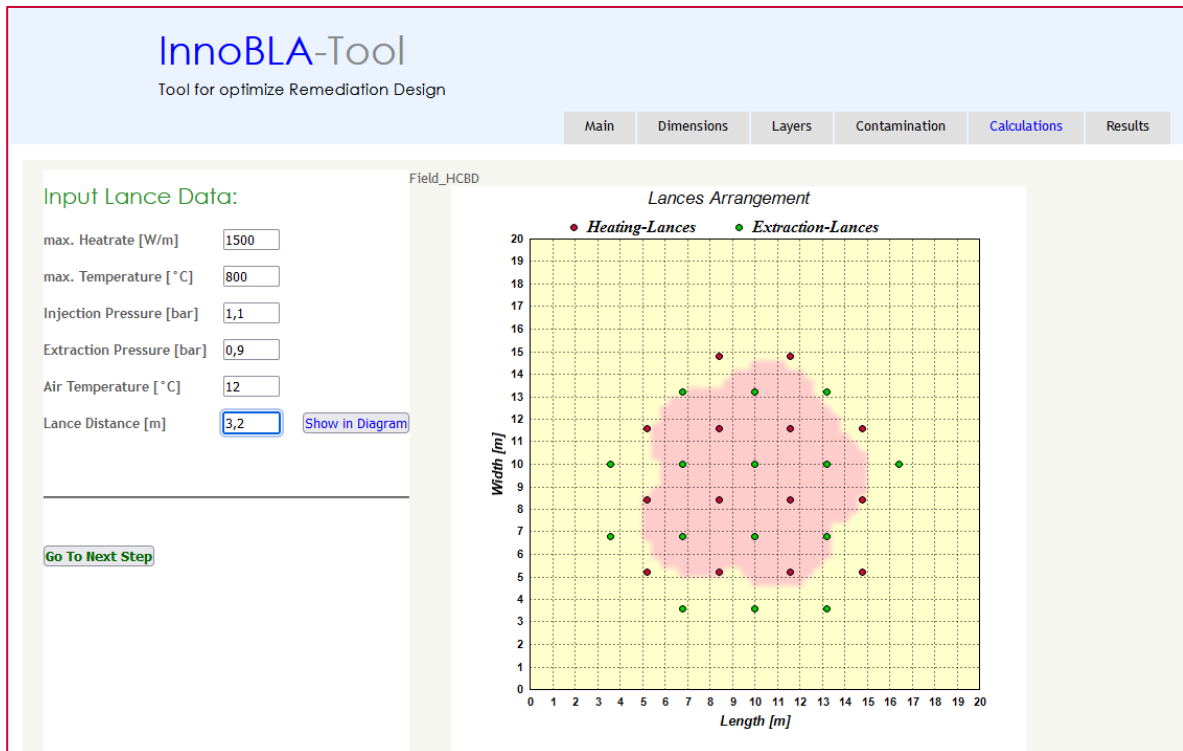
Abbildung 119 Auswahl von Berechnungen und Ergebnissen



3.1.4 Berechnung Fallbeispiel "Calculate Case"

Mit der Auswahl von „Calculate Case“ öffnet sich ein Bereich für die Eingabe der Lanzendaten (Abbildung 120).

Abbildung 120 Eingabe der Lanzendaten für eine Berechnung „Case“



Die erforderlichen Daten für die Heiz- und Absaugungslanzen sind:

- **max. Heatrate:** Die maximale Heizrate in Watt für eine Heizlanze / Meter Länge.
- **max. Temperature:** Die maximal zu erreichende Temperatur der Heizlanze in °C.
- **Injection Pressure:** Absolutdruck an den Luftinjektionslanzen (Heizlanzen) in bar.
- **Extraction Pressure:** Absolutdruck an den Absaugungslanzen in bar.
- **Air Temperature:** Lufttemperatur der Außenluft °C.
- **Lance Distance:** Abstand zwischen den Heizlanzen in Meter.

Durch Drücken des Buttons „Show in Diagram“ wird eine Anordnung von Heiz- und Absaugungslanzen dargestellt. Der rötlich angezeigte Bereich im Feld ist jener, innerhalb welchem Schadstoffe vorhanden sind. An diesem Bereich orientiert sich der Algorithmus für die Erstellung der Lanzenanordnung.

Bevor eine Berechnung starten kann, sind noch zwei weitere Parameter zu setzen. Die Betrachtungsdauer für die Berechnung richtet sich einerseits nach dem vorzugebenden maximalen Zeitraum, andererseits sollte die Berechnung bei Erreichen eines Sanierungsziels stoppen. Die Eingabe der Werte erfolgt wie in Abbildung 121 dargestellt. Im vorliegenden Fall sollte die Berechnung für 14 Tage erfolgen. Somit wird ein sehr hohes Sanierungsziel von 99% gesetzt, welches innerhalb von 14 Tagen nicht erreicht werden kann.

Abbildung 121 Eingabe der Betrachtungsdauer für eine Berechnung „Case“

The screenshot shows the InnoBLA-Tool interface with the 'Calculations' tab selected. The 'Calculation Data' section contains two input fields: 'Max. Time [days]' with the value '14' and 'Remediation Goal [%]' with the value '99'. A 'Start Calculation' button is located below these fields. The background shows a large empty area labeled 'Field_HCBD'.

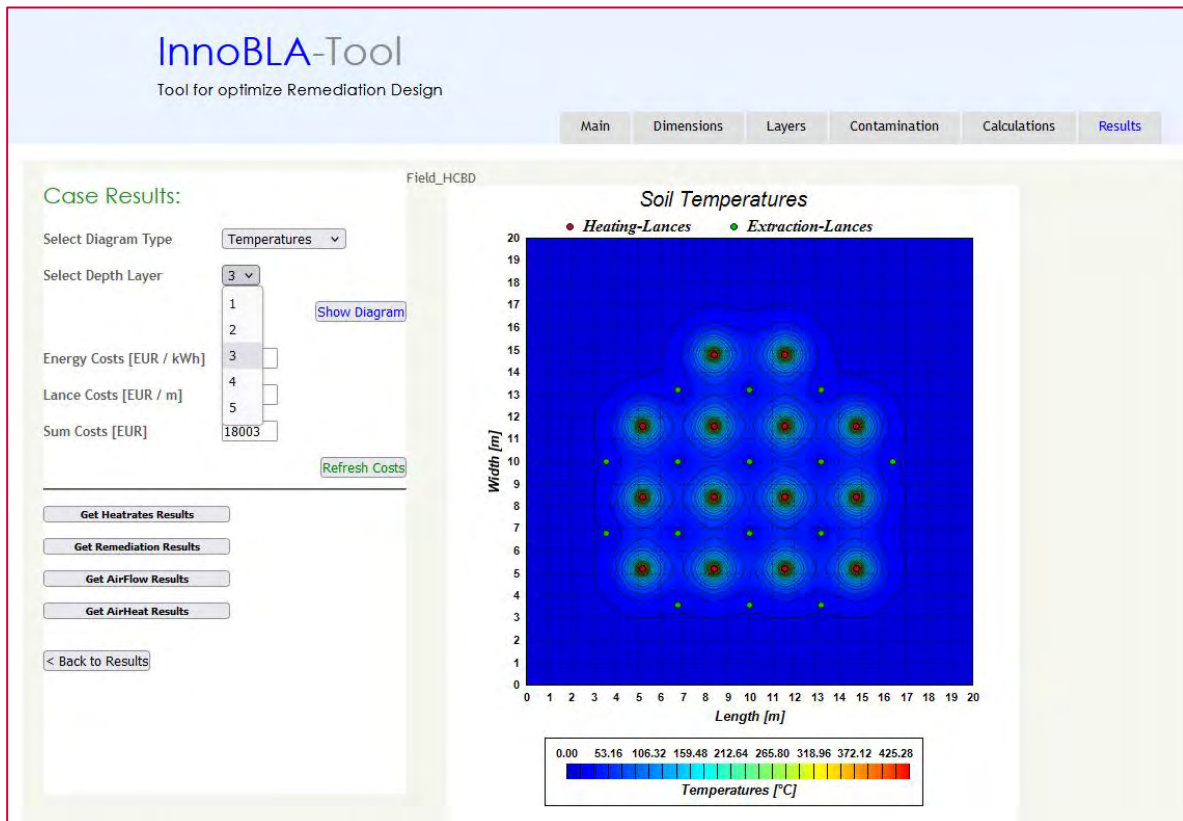
Mit „Start Calculation“ wird die Berechnung gestartet und nach Abschluss gelangt man zu den Ergebnissen (Abbildung 122).

Abbildung 122 Ergebnisse für eine Berechnung „Case“

The screenshot shows the InnoBLA-Tool interface with the 'Results' tab selected. The 'Case Results' section displays several cost values: 'Energy Costs [EUR / kWh]' is 0,3, 'Lance Costs [EUR / m]' is 1000, and 'Sum Costs [EUR]' is empty. There are buttons for 'Show Diagram', 'Refresh Costs', and 'Get Results' for various categories: 'Get Heurates Results', 'Get Remediation Results', 'Get AirFlow Results', and 'Get AirHeat Results'. A '< Back to Results' button is also present. The background shows a large empty area labeled 'Field_HCBD'.

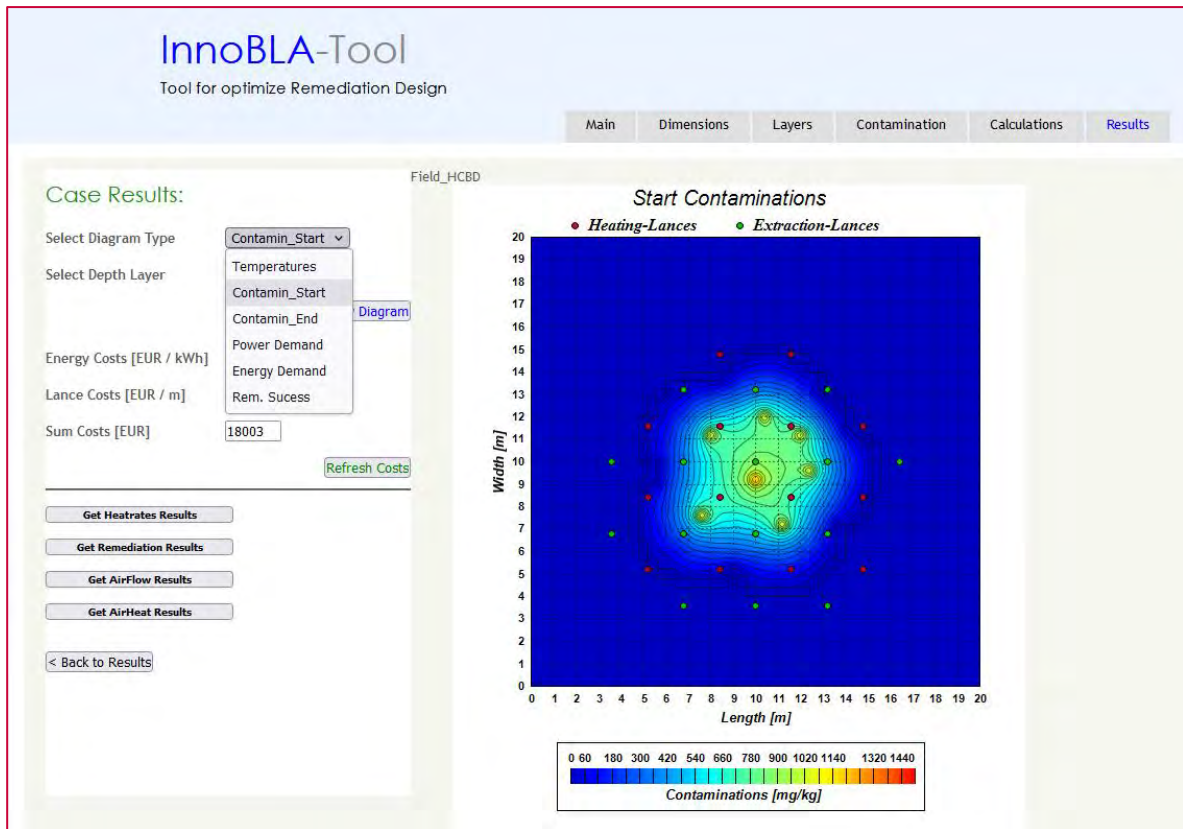
Hier können unterschiedliche Diagramme über eine Dropdown-Liste gewählt werden. Zudem können auch die jeweiligen Tiefen des Feldes ausgewählt und betrachtet werden. In Abbildung 123 ist beispielhaft die Temperaturverteilung am Ende der Betrachtungsdauer in einer Tiefe von 2 bis 3 Metern dargestellt.

Abbildung 123 Temperaturverteilungen für eine Berechnung „Case“



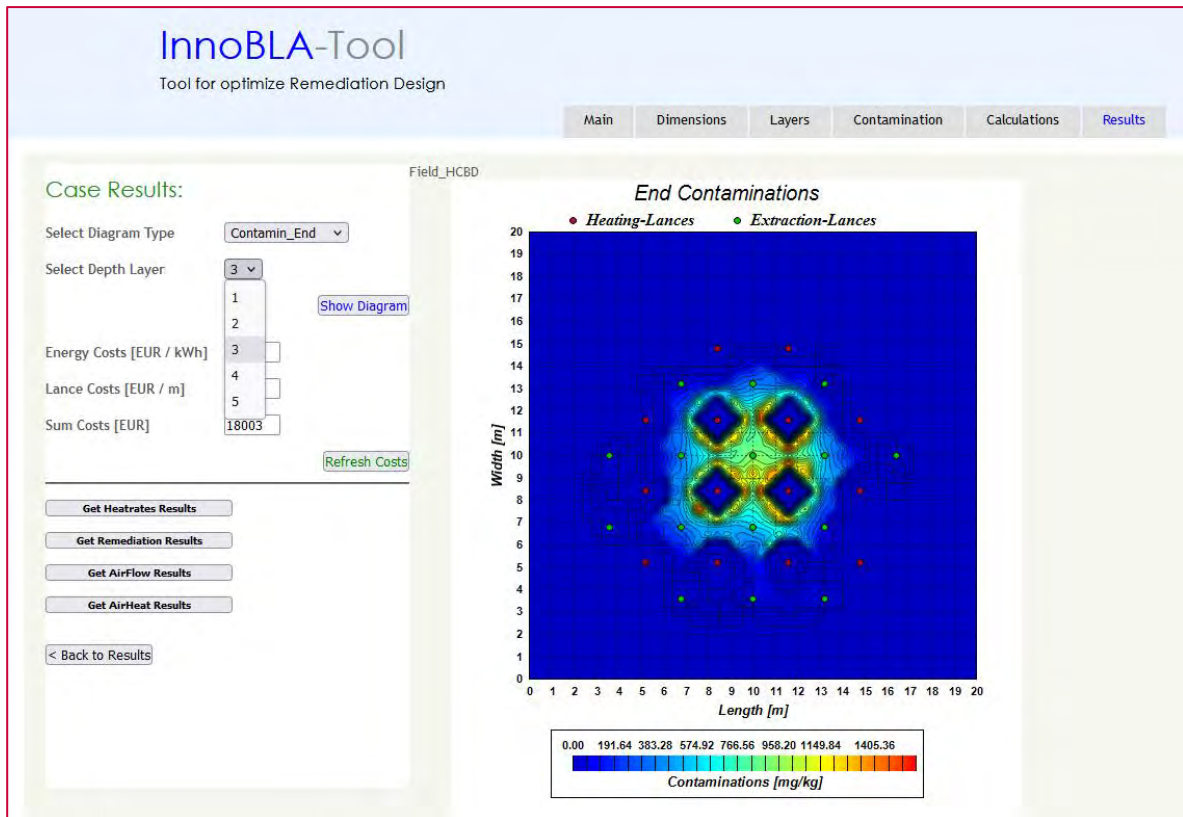
Bei den Kontaminationen können für jede Tiefe auch die Startkontaminationsverteilung veranschaulicht werden. Für die Tiefe 2-3 m sind die Startkontaminationen in Abbildung 124 ersichtlich.

Abbildung 124 Verteilung der Startkontaminationen für eine Berechnung „Case“



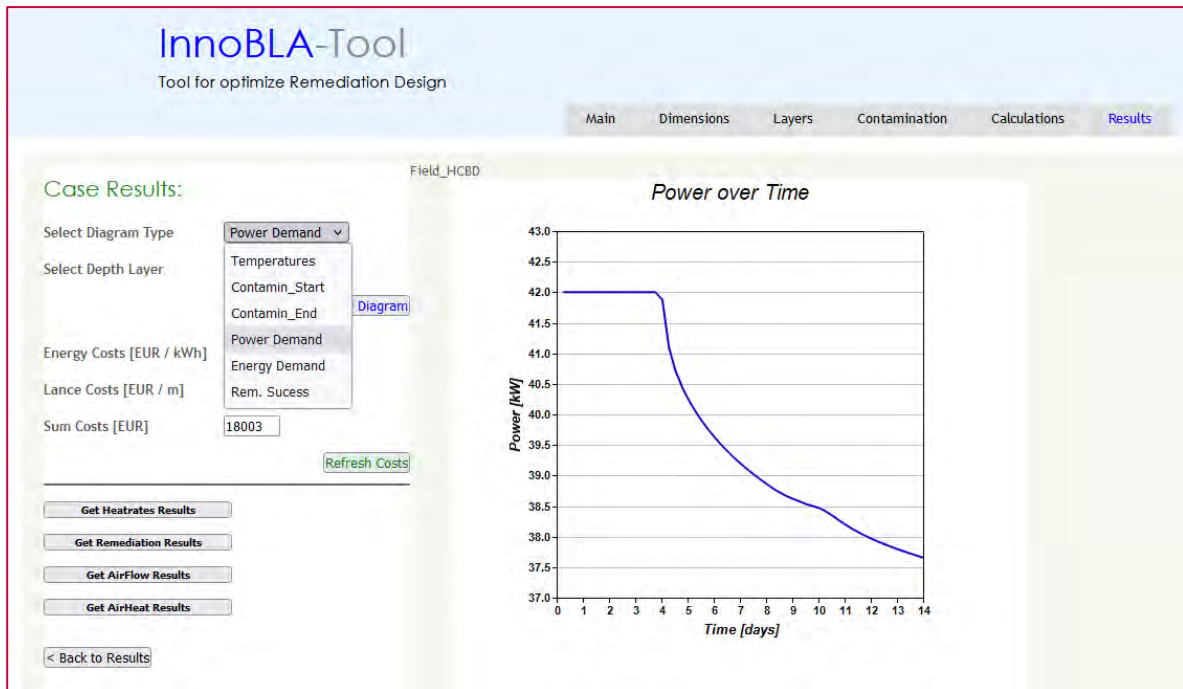
Die Verteilung der Schadstoffe am Ende der Betrachtungsdauer kann über „Contamin_End“ gewählt werden. Auch hier ist diese für die Tiefe 2-3 m in Abbildung 125 abgebildet. Gut erkennbar sind der fortschreitende Schadstofftransport und eine Verschiebung der Schadstoffe zu den Absaugungslanzen hin.

Abbildung 125 Schadstoffverteilung nach Betrachtungsdauer für eine Berechnung „Case“



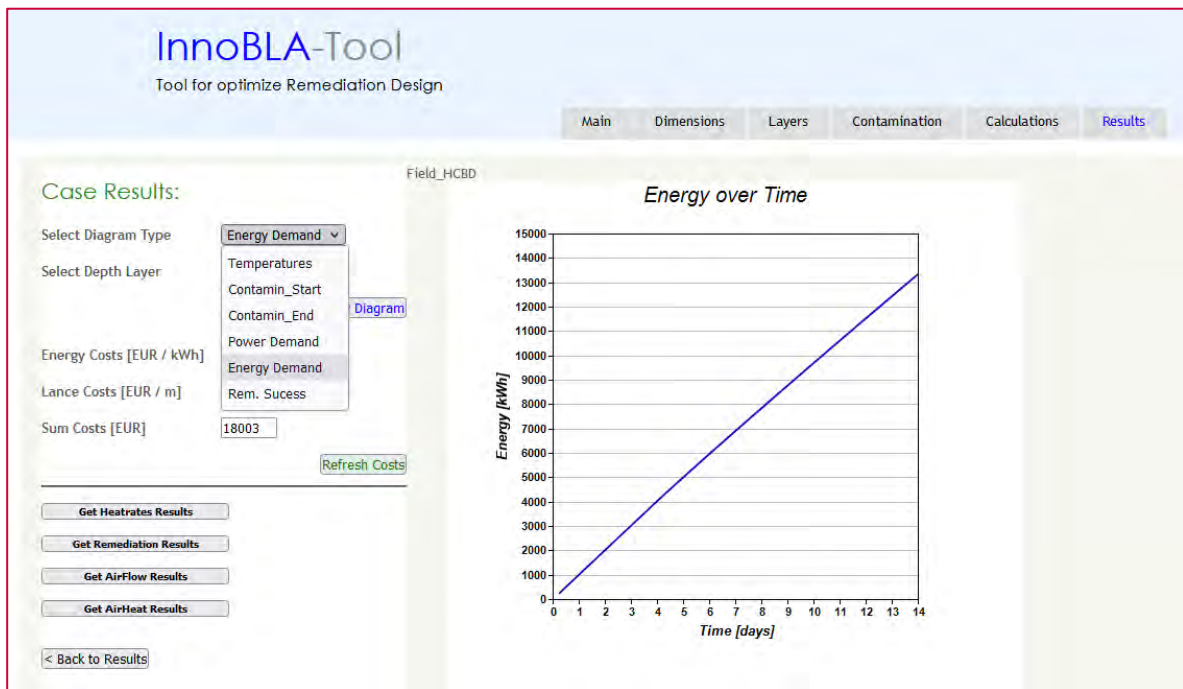
Der zeitliche Verlauf der Heizleistung ist von wesentlicher Bedeutung und kann über die Auswahl „Power demand“ dargestellt werden (Abbildung 126). Hier werden bei Erreichen der maximalen Lanzentemperatur die Heizleistungen der jeweiligen Heizlanzen gedrosselt, um die maximale Lanzentemperatur nicht zu überschreiten.

Abbildung 126 Zeitlicher Verlauf der Heizleistungen für eine Berechnung „Case“



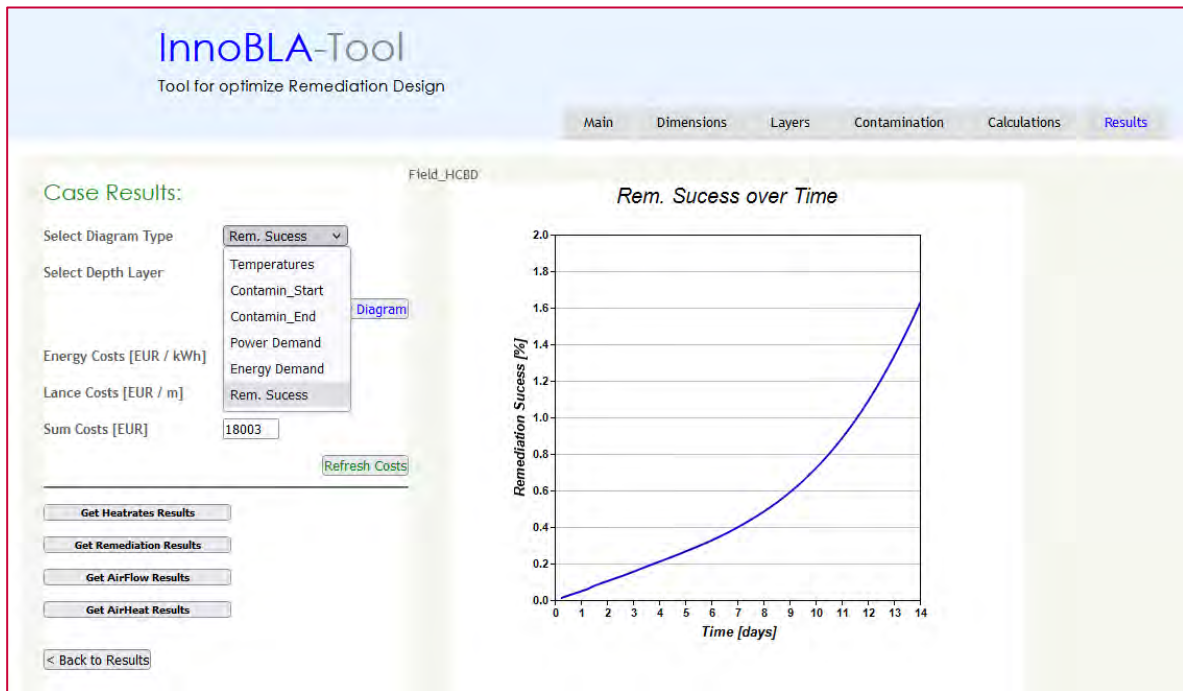
Der Verlauf der aufsummierten in den Boden eingetragene Heizenergie der Heizlanzen kann über den Verlauf von „Energy Demand“ dargestellt werden (Abbildung 127)

Abbildung 127 Verlauf der gesamten Heizenergie für eine Berechnung „Case“



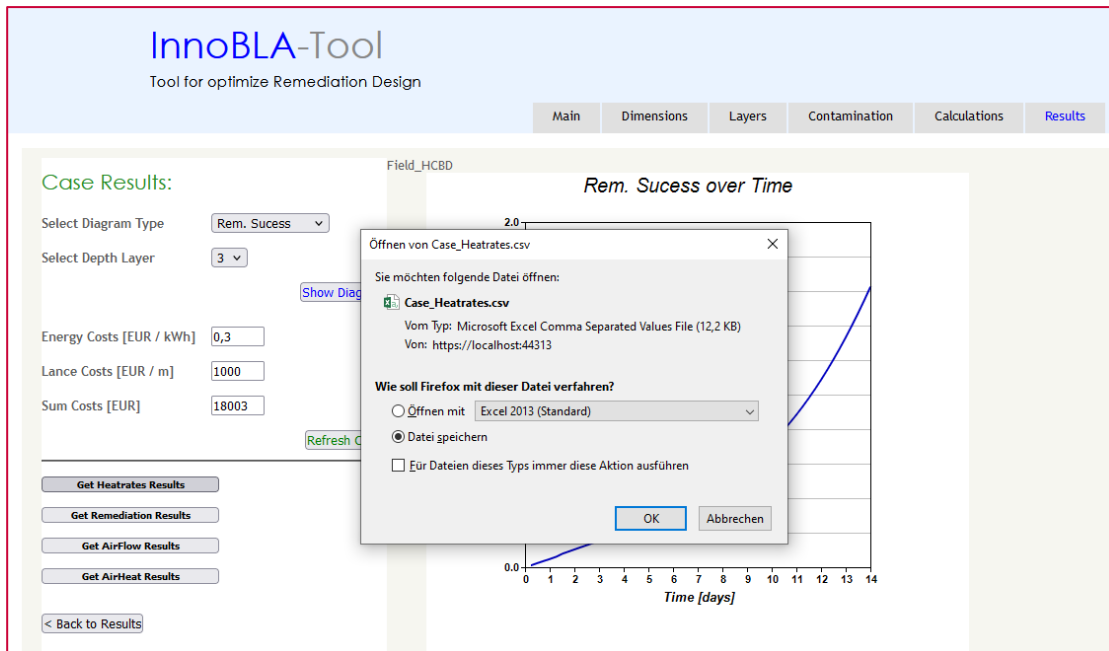
Zuletzt kann ein Diagramm zur Darstellung des zeitlichen Sanierungserfolges erstellt werden. Mit der Auswahl von „Rem. Sucess“ wird der relative Austrag von Kontaminationen aus dem Feld über den Betrachtungszeitraum aufgetragen und dargestellt (Abbildung 128).

Abbildung 128 Verlauf des Sanierungserfolges für eine Berechnung „Case“



Um gezielt Daten für eine weitere Verwendung zur Verfügung zu haben, besteht die Möglichkeit, wesentliche Datensätze downzuloaden. Diese Daten sind in csv-Dateiformat verfügbar und werden über die Buttons „Get xxx Results“ abgerufen (Abbildung 129).

Abbildung 129 Ergebnisdaten Dateidownload für eine Berechnung „Case“



In der Datei „Case_Heatrates.csv“ sind neben den Heizlanceparametern die zeitlichen Heizleistungen der jeweiligen Heizlancen aufgelistet. Hier ist die Drosselung der Heizleistungen, aufgrund des Erreichens der maximalen Lanzentemperatur ab 96 Stunden Betrieb gut erkennbar. Zudem wird der gesamte Einsatz an Heizenergie angezeigt (Abbildung 130).

Abbildung 130 Ergebnisdaten „Heat Rates Results“

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	Distance Lances [m]		3,2								
2	Max Heat Rate [W/m]		1500								
3	Max Lance Temp. [C]		800								
4	Air Temperature [C]		12	Total Energy [kWh]			13342				
5	Pressure Lances [bar]		1,1								
6	Pressure Out [bar]		0,9								
7											
8	Time [h]	P_L1 [W]	P_L2 [W]	P_L3 [W]	P_L4 [W]	P_L5 [W]	P_L6 [W]	P_L7 [W]	P_L8 [W]	P_L9 [W]	P_L10
9	6	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
10	12	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
11	18	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
12	24	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
13	30	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
14	36	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
15	42	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
16	48	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
17	54	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
18	60	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
19	66	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
20	72	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
21	78	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
22	84	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
23	90	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
24	96	3000	3000	2995,9418	2983,49851	2983,36523	2998,38634	2986,71489	2984,55086	2983,95735	
25	102	2945,46303	2945,46101	2936,88331	2929,81031	2929,72693	2939,22654	2931,68591	2930,38717	2930,05545	2941
26	108	2913,24843	2913,24142	2909,84807	2904,88921	2904,81656	2911,19725	2906,51672	2905,38341	2905,09956	2912
27	114	2892,37507	2892,36487	2891,01991	2887,25079	2887,18259	2891,94495	2888,80473	2887,71948	2887,45127	2892
28	120	2875,99057	2875,97855	2875,79206	2872,79098	2872,7256	2876,46292	2874,31404	2873,24509	2872,98568	2876
29	126	2862,20123	2862,18821	2862,76409	2860,28573	2860,22241	2863,26041	2861,79764	2860,72902	2860,47586	2863

Die Daten zum zeitlichen Schadstoffaustrag können aus „Remediation Results“ ausgelesen werden (Abbildung 131). Hier sind auch die einzelnen Absaugungslanzen mit ihren jeweiligen Schadstoffausträgen dargestellt.

Abbildung 131 Ergebnisdaten „Remediation Results“

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Distance Lances [m]		3,2							
2	Max Heat Rate [W/m]		1500							
3	Max Lance Temp. [C]		800							
4	Air Temperature [C]		12		S-Masse Beginn [kg]		112			
5	Pressure Lances [bar]		1,1		S-ausgetragen [kg]		2			
6	Pressure Out [bar]		0,9		Sanierungserfolg [%]		2			
7										
8	Time [h]	S_out_E1 [kg	S_out_E2 [kg	S_out_E3 [kg	S_out_E4 [kg	S_out_E5 [kg	S_out_E6 [kg	S_out_E7 [kg	S_out_E8 [kg	S_out_E9 [kg
9	6	3,78E-08	6,67E-08	3,03E-08	1,57E-08	6,25E-08	6,33E-08	6,35E-08	8,76E-09	1,70E-08
10	12	3,91E-08	6,79E-08	3,11E-08	1,77E-08	6,38E-08	6,45E-08	6,48E-08	1,20E-08	2,16E-08
11	18	3,72E-08	6,37E-08	2,88E-08	1,26E-08	5,92E-08	5,99E-08	6,03E-08	1,69E-08	1,96E-08
12	24	3,66E-08	6,11E-08	2,76E-08	1,48E-08	5,65E-08	5,71E-08	5,76E-08	1,90E-08	2,54E-08
13	30	3,81E-08	5,93E-08	2,69E-08	1,50E-08	5,45E-08	5,51E-08	5,57E-08	2,76E-08	4,76E-08
14	36	4,09E-08	5,78E-08	2,65E-08	1,67E-08	5,30E-08	5,35E-08	5,42E-08	5,16E-08	1,01E-07
15	42	3,28E-08	5,67E-08	2,63E-08	2,42E-08	5,19E-08	5,23E-08	5,31E-08	1,41E-08	1,97E-08
16	48	3,25E-08	5,58E-08	2,65E-08	3,98E-08	5,10E-08	5,15E-08	5,22E-08	1,47E-08	2,10E-08
17	54	3,23E-08	5,52E-08	2,69E-08	3,48E-08	5,04E-08	5,08E-08	5,16E-08	1,55E-08	2,25E-08
18	60	3,23E-08	5,48E-08	2,77E-08	1,83E-08	5,00E-08	5,04E-08	5,12E-08	1,66E-08	2,42E-08
19	66	3,34E-08	5,63E-08	2,99E-08	1,55E-08	5,16E-08	5,21E-08	5,27E-08	1,91E-08	2,73E-08
20	72	3,51E-08	5,83E-08	3,30E-08	1,46E-08	5,39E-08	5,44E-08	5,49E-08	2,53E-08	3,32E-08
21	78	3,66E-08	6,02E-08	3,66E-08	7,44E-08	5,58E-08	5,65E-08	5,68E-08	3,41E-08	3,92E-08

Die Daten für die Luftströmung sind auf zwei Dateien aufgeteilt. Die zeitlichen Massenströme für alle Heiz- und Absaugungslanzen sind in „AirFlow Results“ enthalten. Die Daten zu den austretenden Energieströmen, welche über die Absaugungslanzen ausgetragen werden, befinden sich in „AirHeat Results (Abbildung 132, Abbildung 133).

Abbildung 132 Ergebnisdaten „AirFlow Results“

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	Distance Lances [m]		3,2								
2	Max Heat Rate [W/m]		1500								
3	Max Lance Temp. [C]		800								
4	Air Temperature [C]		12		Total Air Input [kg]		-2092				
5	Pressure Lances [bar]		1,1		Total Air Output [kg]		2268				
6	Pressure Out [bar]		0,9								
7											
8	Time [h]	A_L1 [kg/s]	A_L2 [kg/s]	A_L3 [kg/s]	A_L4 [kg/s]	A_L5 [kg/s]	A_L6 [kg/s]	A_L7 [kg/s]	A_L8 [kg/s]	A_L9 [kg/s]	A_L10 [kg/s]
9	6	-0,00013631	-0,00013622	-0,00016159	-0,00016096	-0,0001606	-0,00015937	-0,00017239	-0,00016336	-0,0001618	-0,0001618
10	12	-0,00014097	-0,00014087	-0,00016744	-0,00016549	-0,00016504	-0,00016515	-0,00017844	-0,00016778	-0,00016618	-0,00016618
11	18	-0,00012243	-0,00012233	-0,00014518	-0,00014613	-0,0001458	-0,00014313	-0,00015554	-0,00014854	-0,00014708	-0,00014708
12	24	-0,00011719	-0,0001171	-0,00013829	-0,00014007	-0,00013973	-0,00013632	-0,00014823	-0,00014259	-0,00014118	-0,00014118
13	30	-0,00011323	-0,00011314	-0,00013301	-0,00013519	-0,00013486	-0,00013113	-0,0001425	-0,0001377	-0,00013634	-0,00013634
14	36	-0,00011016	-0,00011007	-0,00012894	-0,00013138	-0,00013106	-0,00012713	-0,00013805	-0,00013384	-0,00013253	-0,00013253
15	42	-0,00010772	-0,00010763	-0,00012574	-0,0001284	-0,00012809	-0,00012399	-0,00013458	-0,00013081	-0,00012954	-0,00012954
16	48	-0,00010577	-0,00010568	-0,00012322	-0,0001261	-0,0001258	-0,00012152	-0,00013186	-0,00012847	-0,00012723	-0,00012723
17	54	-0,00010422	-0,00010413	-0,00012127	-0,00012439	-0,00012409	-0,00011961	-0,00012976	-0,00012671	-0,0001255	-0,0001255
18	60	-0,00010301	-0,00010293	-0,00011981	-0,00012319	-0,0001229	-0,00011818	-0,00012822	-0,00012549	-0,00012429	-0,00012429
19	66	-0,00010822	-0,00010814	-0,00012595	-0,00012922	-0,00012892	-0,00012426	-0,00013461	-0,00013154	-0,00013031	-0,00013031
20	72	-0,00011341	-0,00011332	-0,00013237	-0,00013534	-0,00013511	-0,00013063	-0,00014136	-0,00013764	-0,00013639	-0,00013639
21	78	-0,00011651	-0,00011642	-0,00013651	-0,00013966	-0,00013946	-0,00013474	-0,00014578	-0,00014232	-0,00014114	-0,00014114

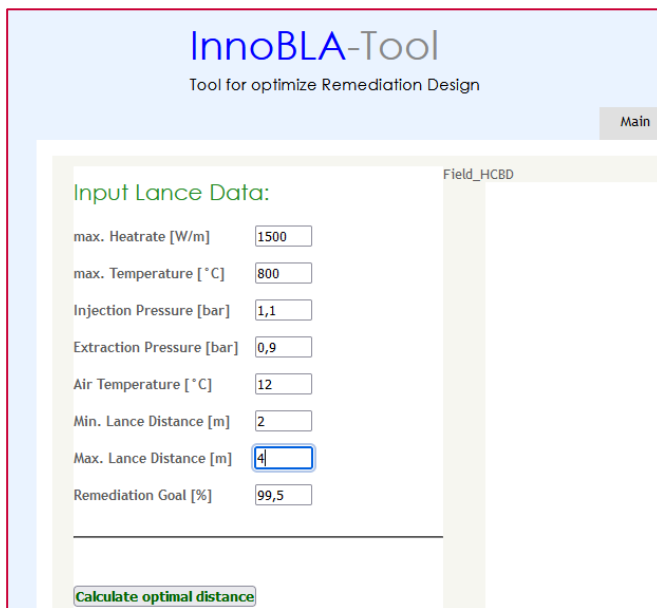
Abbildung 133 Ergebnisdaten „AirHeat Results“

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	Distance Lances [m]		3,2								
2	Max Heat Rate [W/m]		1500								
3	Max Lance Temp. [C]		800								
4	Air Temperature [C]		12								
5	Pressure Lances [bar]		1,1								
6	Pressure Out [bar]		0,9								
7											
8	Time [h]	P_out_E1 [W]	P_out_E2 [W]	P_out_E3 [W]	P_out_E4 [W]	P_out_E5 [W]	P_out_E6 [W]	P_out_E7 [W]	P_out_E8 [W]	P_out_E9 [W]	P_out_E10 [W]
9	6	-0,33546803	-0,35989278	-0,33640784	-0,2828524	-0,33663655	-0,34095844	-0,34220835	-0,30760033	-0,28084565	-0,28084565
10	12	-0,3402658	-0,36572352	-0,34117169	-0,28634766	-0,34307687	-0,34709219	-0,34839195	-0,31093004	-0,28432713	-0,28432713
11	18	-0,32069735	-0,34129243	-0,32171966	-0,27178285	-0,31642552	-0,32044092	-0,32234827	-0,29717148	-0,26960486	-0,26960486
12	24	-0,30738781	-0,32578202	-0,30849595	-0,26173099	-0,3000895	-0,30345118	-0,30628026	-0,28697493	-0,2595628	-0,2595628
13	30	-0,29684235	-0,31381925	-0,29799218	-0,25391246	-0,28789616	-0,29084795	-0,29415854	-0,27879242	-0,25184804	-0,25184804
14	36	-0,28795326	-0,30378968	-0,28911691	-0,24742357	-0,2778989	-0,2805372	-0,28414992	-0,27191383	-0,24550123	-0,24550123
15	42	-0,28009696	-0,29485886	-0,28125807	-0,24176031	-0,26917423	-0,27155829	-0,27535851	-0,26586252	-0,2399931	-0,2399931
16	48	-0,27274223	-0,28634087	-0,27388978	-0,23653758	-0,26101888	-0,2632016	-0,26708635	-0,26024044	-0,23491677	-0,23491677
17	54	-0,26539461	-0,27759382	-0,26651785	-0,23142718	-0,25280935	-0,25483864	-0,25870851	-0,25469565	-0,22993834	-0,22993834
18	60	-0,25758227	-0,26799804	-0,25867028	-0,22613194	-0,24396369	-0,24587841	-0,24963244	-0,2489046	-0,22476088	-0,22476088
19	66	-0,25505634	-0,26470595	-0,25607437	-0,22486709	-0,24224371	-0,24430396	-0,24748619	-0,24688602	-0,22360986	-0,22360986
20	72	-0,25237481	-0,26038321	-0,25329741	-0,22395308	-0,23988008	-0,24219881	-0,24451863	-0,24526103	-0,22278571	-0,22278571
21	78	-0,24565884	-0,25014001	-0,24647764	-0,22055962	-0,23140262	-0,23278962	-0,2355444	-0,24124125	-0,21842441	-0,21842441

3.1.5 Berechnungen für optimalen Abstand der Heizlanzen

Wählt man bei der Auswahl von Berechnungen (Abbildung 119) die Berechnung des optimalen Lanzenabstandes, so gelangt man auf die Oberfläche für die Eingabe der Rechenparameter (Abbildung 134). Hier werden neben den bereits oben erwähnten Heizlanzenparametern ein minimaler und ein maximaler Lanzenabstand vorgegeben. Als Bedingung für das jeweilige Beenden der Sanierungsberechnungen wird auch hier ein Sanierungsziel gewählt.

Abbildung 134 Eingabe der Parameter für eine Berechnung „Optimum Distance“



The screenshot shows the 'InnoBLA-Tool' interface, titled 'Tool for optimize Remediation Design'. The main window is titled 'Input Lance Data:' and contains several input fields with numerical values:

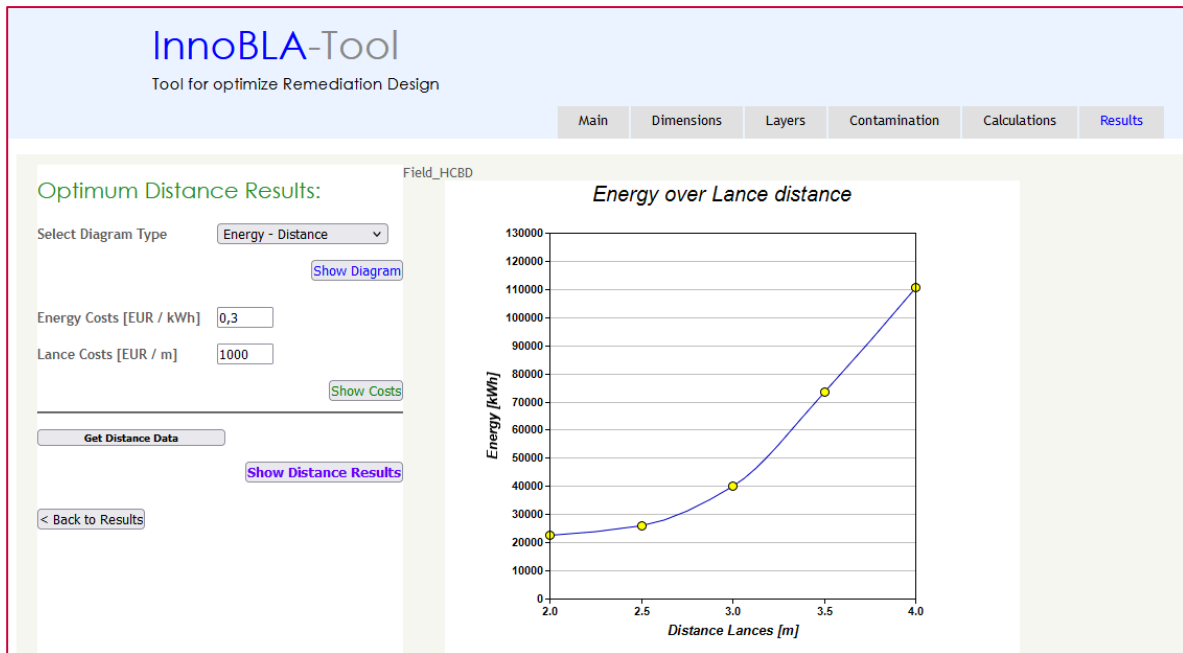
Parameter	Value
max. Heatrate [W/m]	1500
max. Temperature [°C]	800
Injection Pressure [bar]	1,1
Extraction Pressure [bar]	0,9
Air Temperature [°C]	12
Min. Lance Distance [m]	2
Max. Lance Distance [m]	4
Remediation Goal [%]	99,5

At the bottom of the input area, there is a button labeled 'Calculate optimal distance'. To the right of the input fields, there is a vertical column labeled 'Field_HCBD'.

Es erfolgen nun Berechnungen für unterschiedliche Abstände innerhalb der gewählten Bandbreite.

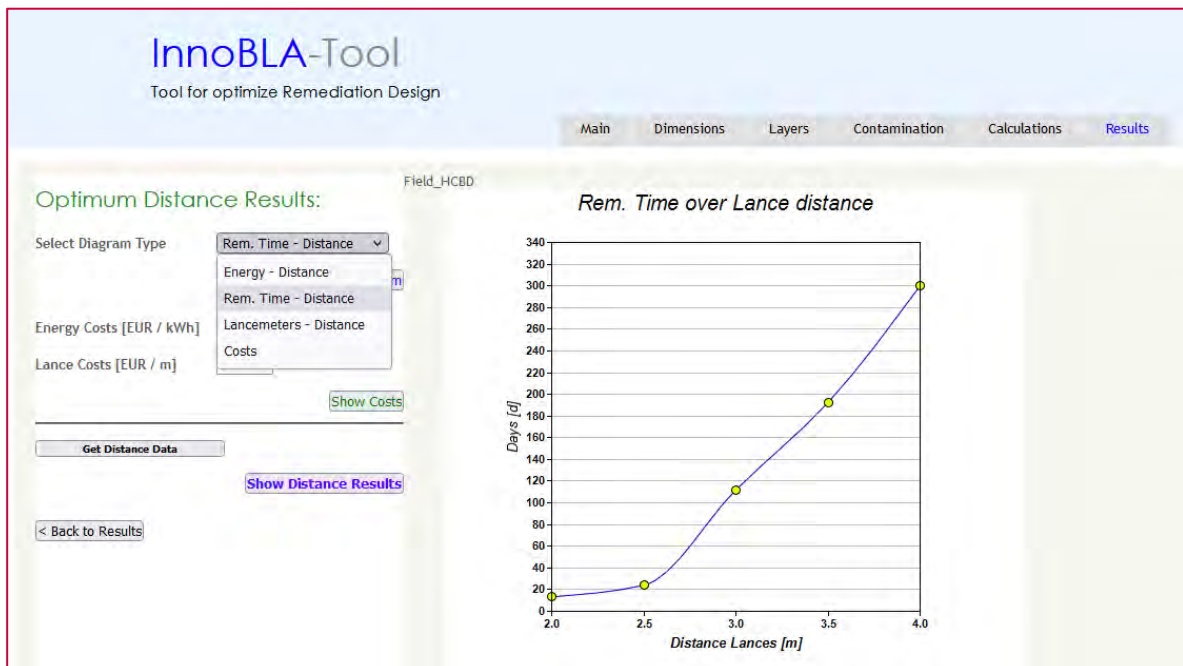
Nach Abschluss der Berechnungen wird eine Ergebnisseite angezeigt, welche wiederum die Möglichkeit zur Darstellung von Diagrammen liefert. Das Diagramm „Energy-Distance“ zeigt für unterschiedliche Heizlanzenabstände den jeweiligen gesamten Heizenergiebedarf (Abbildung 135).

Abbildung 135 Ergebnisse Energiebedarf für „optimalen Heizlanzenabstand“



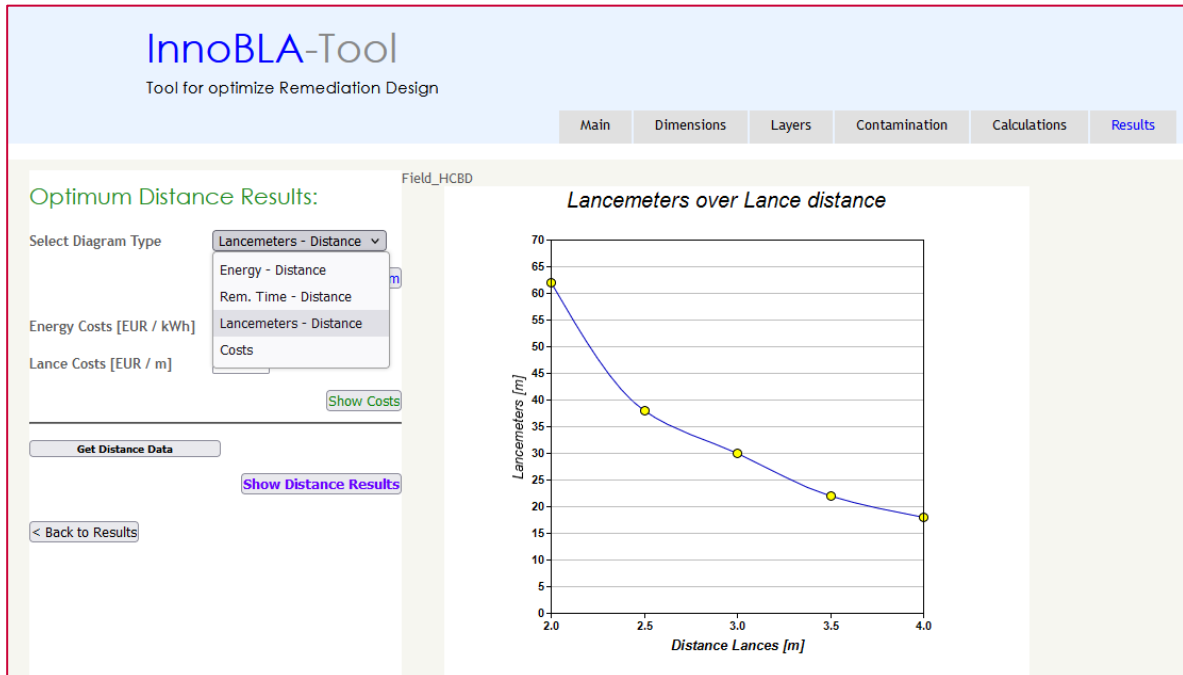
Auch die jeweiligen notwendigen Sanierungszeiten der einzelnen Heizlanzenabstände können über die Auswahl dargestellt werden (Abbildung 136).

Abbildung 136 Diagramm Sanierungszeiten für Heizlanzenabstände



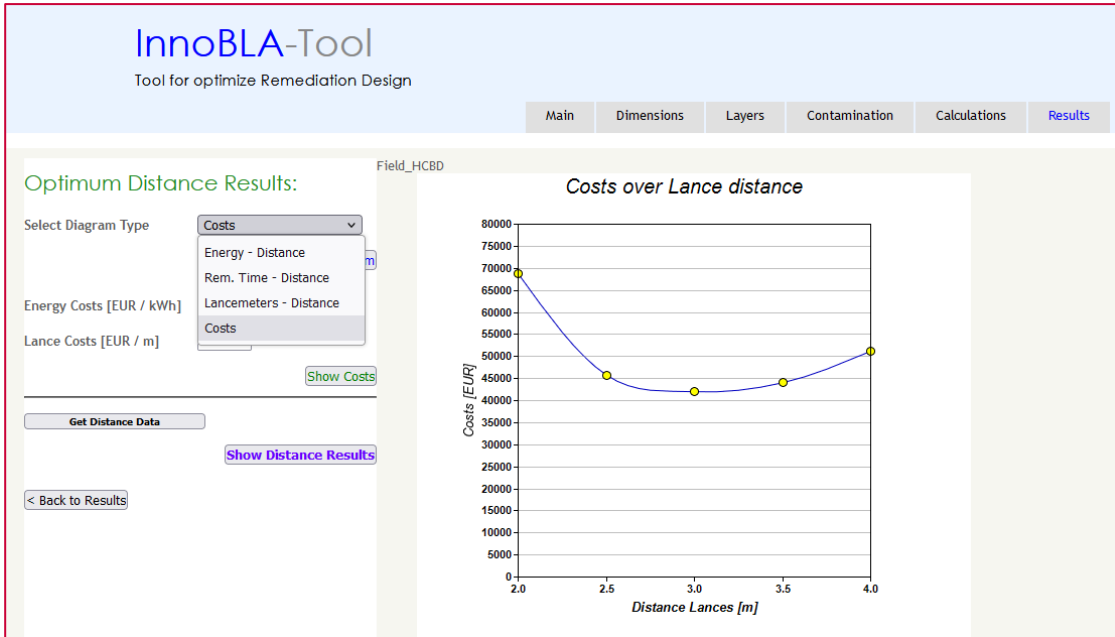
Für die Ermittlung der Materialkosten haben die Anzahl und Länge der Heizlanzen einen wesentlichen Einfluss. Hier werden dazu sogenannte „Lanzenmeter“ verwendet. Dies entspricht der Gesamtlänge an Heizelementen in den Heizlanzen (Abbildung 137).

Abbildung 137 Diagramm Lanzenmeter für Heizlanzenabstände“



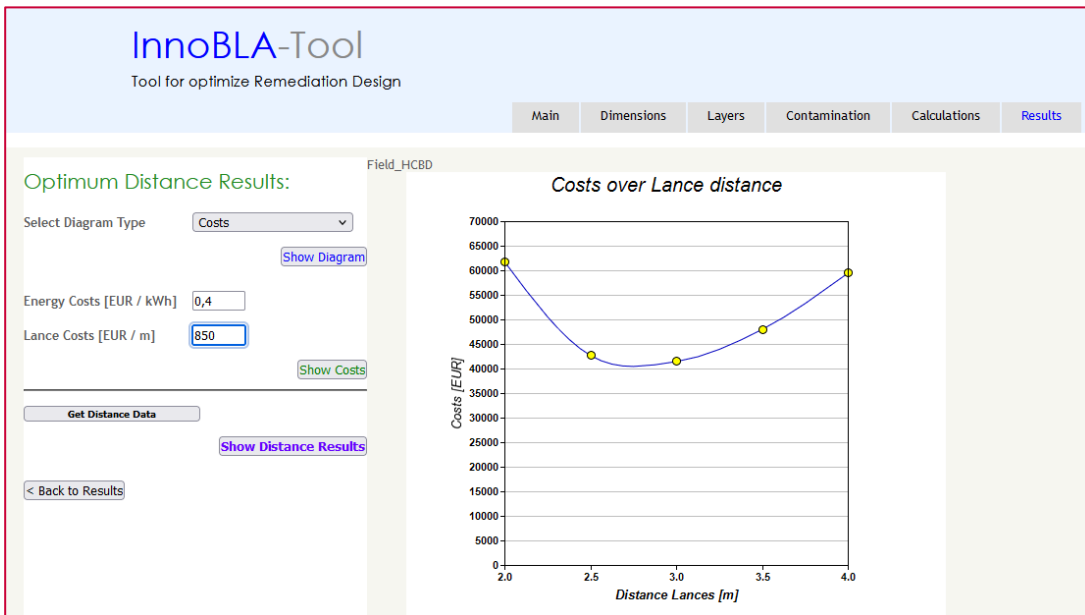
Über die Eingabefelder „Energy Costs“ und „Lance Costs“ können Werte für Strompreis und Kosten je Lanzenmeter eingesetzt werden. In dem Ergebnisdigramm „Costs“ werden die für die jeweiligen Abstände errechneten Gesamtkosten dargestellt (Abbildung 138). Der Verlauf der Kosten liefert bei einem Minimum der Kurve einen wirtschaftlich optimalen Wert. Dieser Heizlanzenabstand stellt somit kostenmäßig einen optimalen Abstand dar.

Abbildung 138 Diagramm Kosten für Heizlanzenabstände



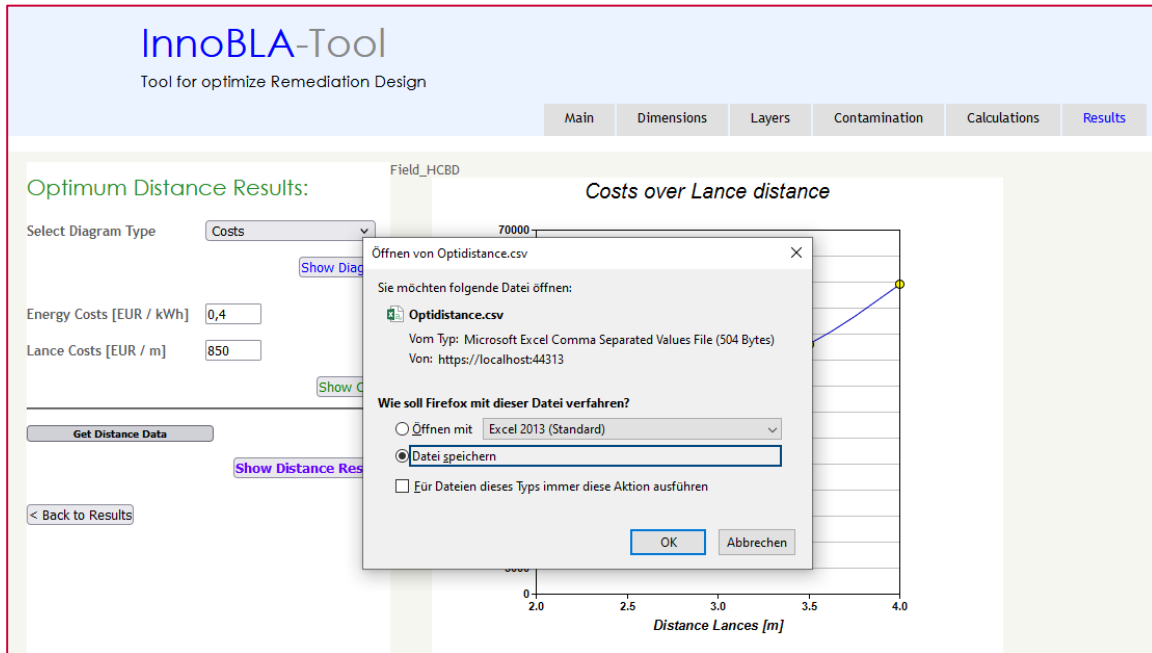
Da die Berechnungen der Sanierungsverläufe unabhängig von Kosten ausgeführt wurden, kann ein optimaler Heizlanzenabstand bei Änderungen der Preise sofort angezeigt werden. In Abbildung 139 ist eine Variante mit höheren Stromkosten und geringeren Heizlanzenkosten aufgezeigt.

Abbildung 139 Diagramm Kosten – Variante 2 für Heizlanzenabstände



Die Eckdaten der Berechnungen stehen auch hier zum Download zur Verfügung. Über den „Get Distance Data“ Button können die Ergebnisse in Form einer csv-Datei geöffnet oder am Endgerät gespeichert werden (Abbildung 140).

Abbildung 140 Download-Möglichkeit für Ergebnisdaten zu „Optimum Distance“



Die Datei „Optimumdistance.csv“ beinhaltet die wesentlichsten Ergebnisse der Berechnungen, welche in Abbildung 141 ersichtlich sind.

Abbildung 141 Ergebnisdatei zu „Optimal Distance“

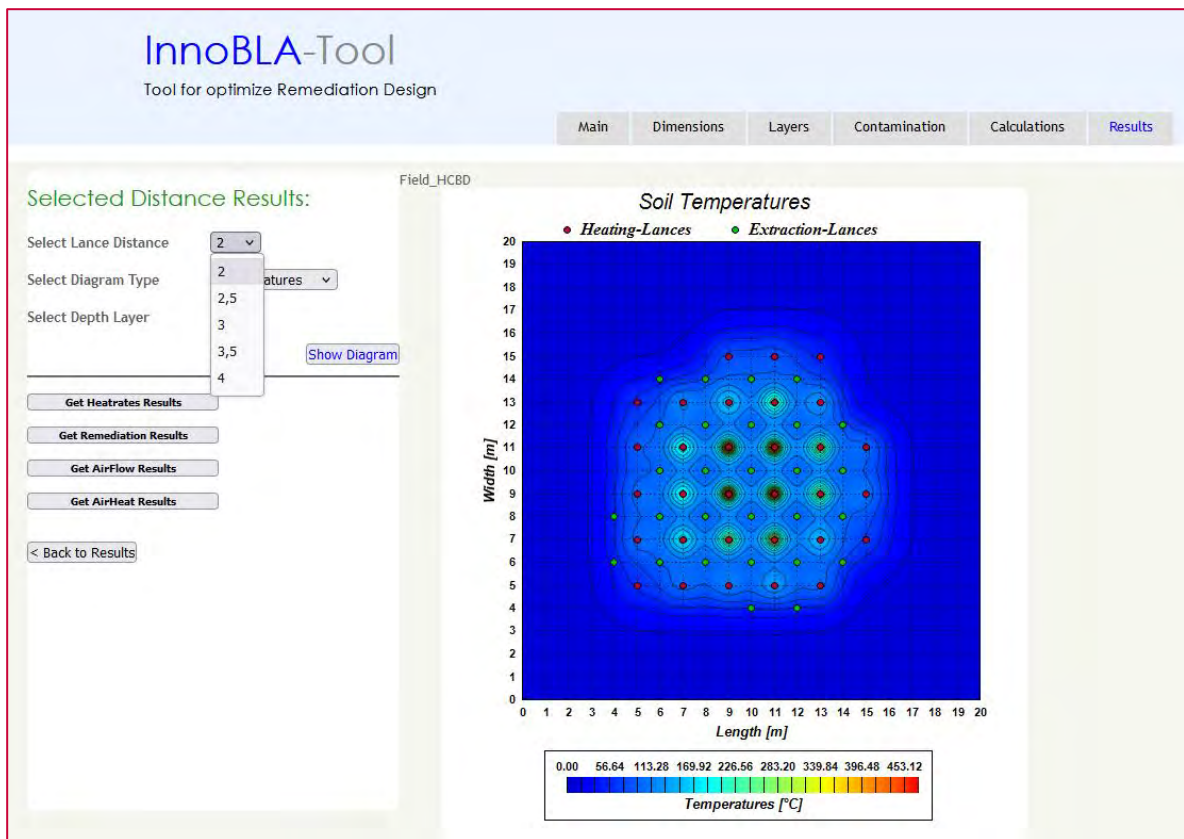
Costs per Lancemeters [EUR / m]									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Costs per Lancemeters [EUR / m]			1000					
2	Costs per Energy [EUR / kWh]			0,3					
3	Distance [m]	Time [days]	Remediatior	Energy [kWh]	Lancemeters	Costs Lances	Costs Energy	Costs Sum [EUR]	
4	2	13,25	99,5224753	22627	62	62000	6788,1	68788,1	
5	2,5	24	99,6482046	26042	38	38000	7812,6	45812,6	
6	3	112	99,5005752	40063	30	30000	12018,9	42018,9	
7	3,5	192,5	99,5018021	73444	22	22000	22033,2	44033,2	
8	4	300	93,8910907	110621	18	18000	33186,3	51186,3	
9									
10									

In Spalte B sind die Sanierungstage ersichtlich, welche notwendig sind, um den geforderten Sanierungserfolg zu erreichen (Bemerkung: mit einem Heizlancenzabstand von

4 m wird das Sanierungsziel auch nach 300 Tagen Betrieb knapp nicht erreicht). Die Werte „Sum Costs“ errechnen sich als Summe aus dem Preis pro Lanzenmeter mal Anzahl der Lanzenmeter und dem Produkt aus Energiepreis mal Energiebedarf.

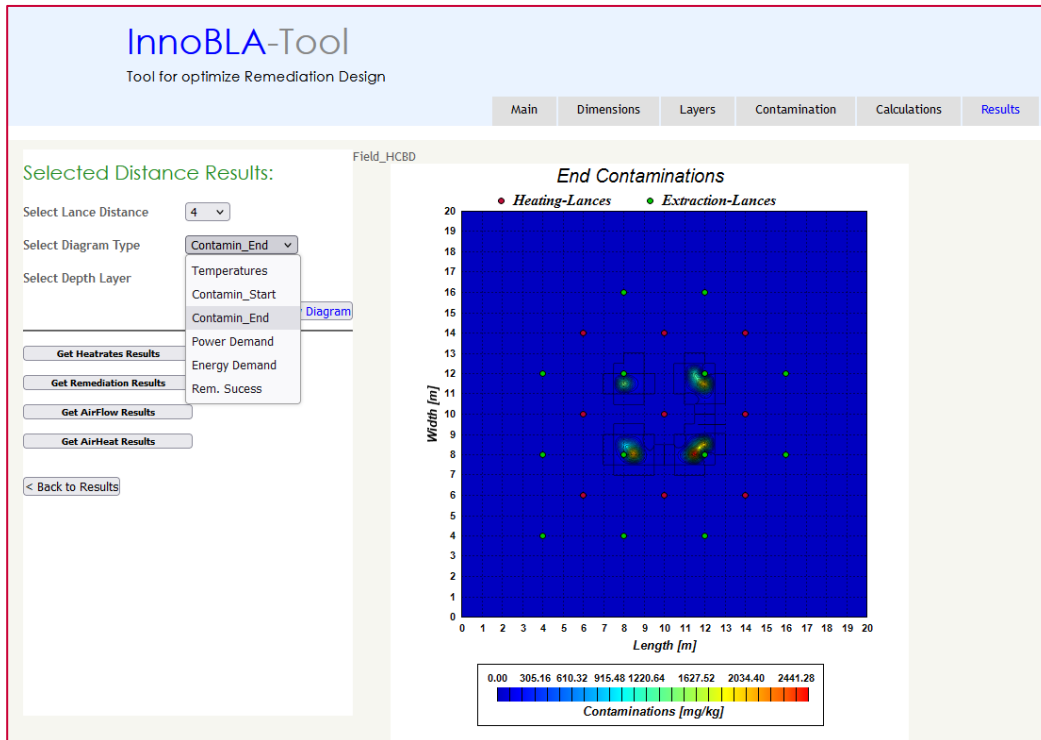
Über den Button „Show Distance Results“ hat man die Möglichkeit alle Ergebnisdaten für die gerechneten Heizlanzenabstände zu erhalten. In Abbildung 142 ist zum Beispiel die Temperaturverteilung in 2-3 m Tiefe für Lanzenabstände von 2 m aufgezeigt.

Abbildung 142 Ergebnisse Temperaturen für einen ausgewählten Heizlanzenabstand



Beispielhaft sind die verbleibenden Kontaminationen für die Heizlanzenabstände von 4 m am Sanierungsende nach 300 Tagen in Abbildung 143 ersichtlich.

Abbildung 143 Ergebnisse Schadstoffverteilung (Sanierungsende) für einen ausgewählten Heizpflanzenabstand

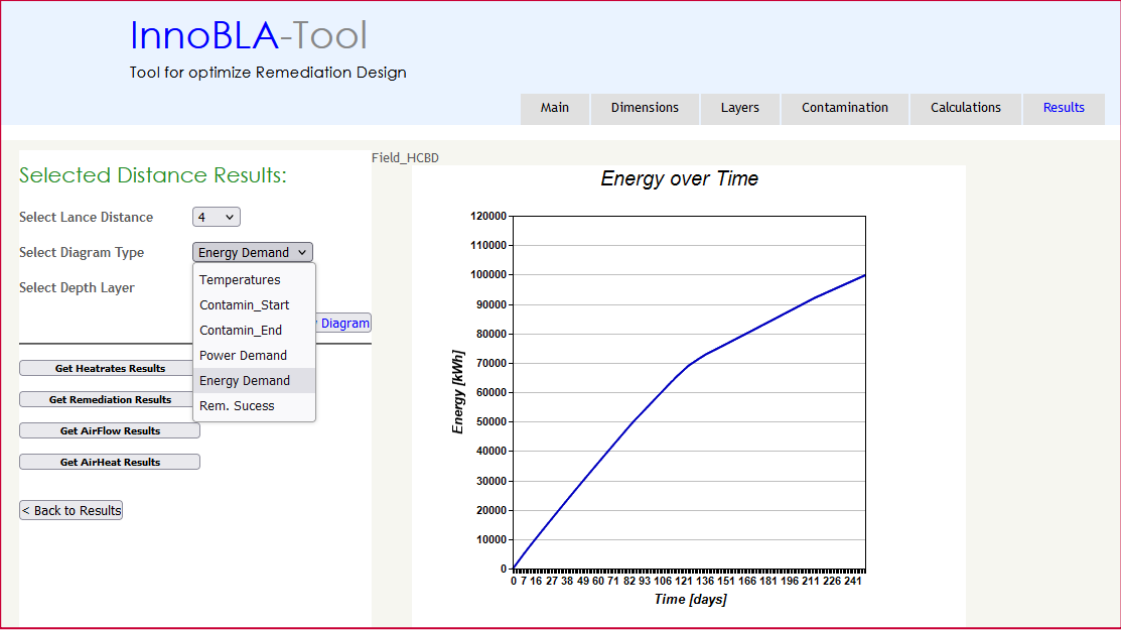


Der zeitliche Verlauf der gesamten Heizleistung ist in Abbildung 144 dargestellt.

Abbildung 144 Ergebnisse Heizleistungen für einen ausgewählten Heizpflanzenabstand

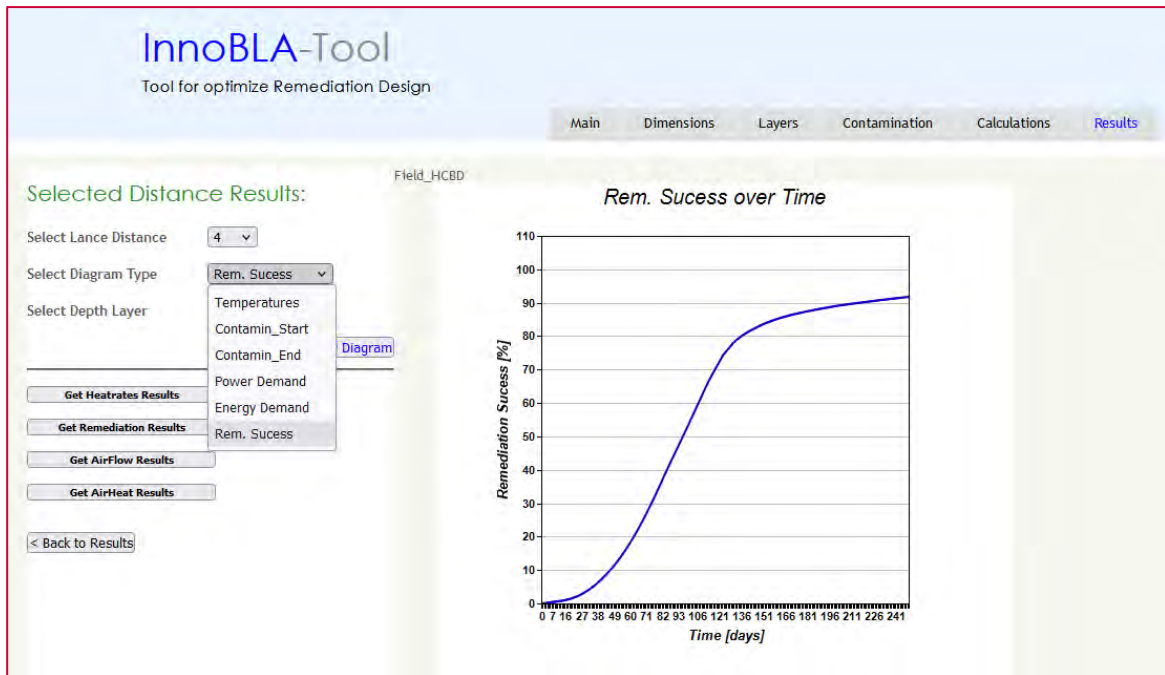


Abbildung 145 Ergebnisse Heizenergie für einen ausgewählten Heizlanzenabstand



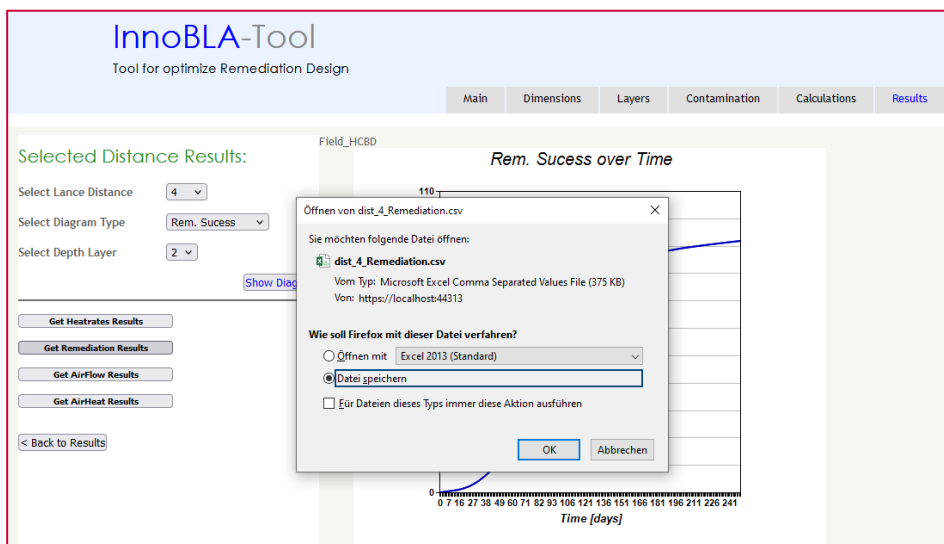
Weitere Diagramme sind Heizenergiebedarf (Abbildung 145) und Sanierungserfolg (Abbildung 146) über die Zeit.

Abbildung 146 Ergebnisse Sanierungsverlauf für einen ausgewählten Heizlanzenabstand



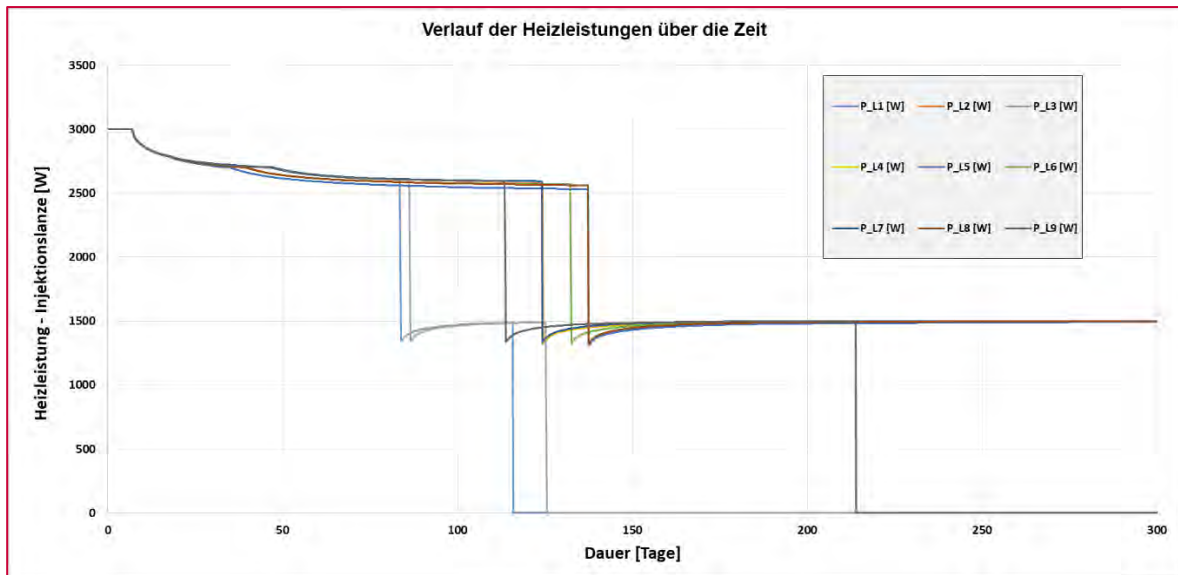
Auch besteht die Möglichkeit alle wesentlichen Datensätze in Form von csv-Dateien als Download zu erhalten (Abbildung 147).

Abbildung 147 Download-Möglichkeiten für einen ausgewählten Heizlanzenabstand



Als Beispiel für die Verwendung der Daten wird hier der zeitliche Verlauf der einzelnen Heizlanzen dargestellt. Dies kann als Richtwert für einen Steuerbetrieb der Heizlanzen herangezogen werden (Abbildung 148).

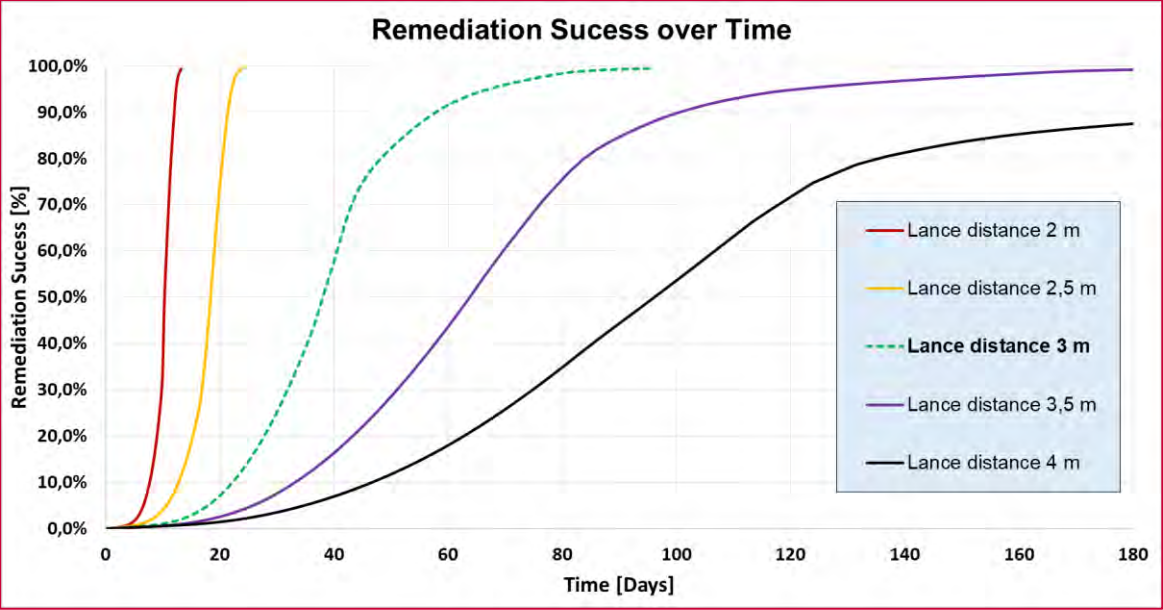
Abbildung 148 Verlauf der Heizleistungen aus „Heat Rates Results“



Der Algorithmus ist so konzipiert, dass die Heizlanzen ihre Heizleistung stoppen, wenn im Umfeld der jeweiligen Lanzen die Siedetemperatur des Schadstoffes erreicht wird, oder kein Schadstoff mehr vorhanden ist. Wird aufgrund des Wärmetransportes der aufrechten Gasströmung folglich die Temperatur wiederum unterschritten, beginnen die Heizlanzen wieder zu heizen. Dieser Effekt ist in Abbildung 148 gut erkennbar: Zwischen etwa 80 und 140 Tagen beobachtet man ein starkes Abfallen mit anschließendem leichtem Ansteigen von einigen Heizleistungen (ca. Mittelfeld des Diagramms).

Mit einem Vergleich der Sanierungsverläufe für unterschiedliche Lanzenabstände können die zu erwartenden Sanierungszeiten abgeschätzt werden (Abbildung 149).

Abbildung 149 Darstellung der Sanierungsverläufe unterschiedlicher Heizlanceabstände



3.1.6 Berechnungen mit dem „2-dim Example“

Über die Auswahlmaske (Abbildung 112) gelangt man auch zu einem Beispiel, bei welchem zweidimensionale Berechnungen ausgeführt werden. Dieses Beispiel dient zur Veranschaulichung und Testen von neuen Bodenarten und Schadstoffen. Es erscheint eine Eingabemaske, in der man die Werte für eine Berechnung einsetzen kann. In Abbildung 150 sind die eingetragenen Werte für ein hier angeführtes Beispiel aufgezeigt.

Abbildung 150 Input-Maske für „2-dim. Example“

The screenshot displays the InnoBLA-Tool interface for a 2-dimensional example. On the left, the input parameters are as follows:

Parameter	Value
Contaminant	PCE
Soil Type	Sand fine
Max. Heat Rate [W/m]	1200
Max. Temperature [°C]	450
Air Temperature [°C]	15
Distance Lances [m]	3,4
Heating days [d]	7

A "Calculate" button is located below the input fields. On the right, a schematic diagram illustrates a square "Control area" with four "Injection wells (heated)" at the corners and one "Extraction well" in the center. The distance between the lances is labeled as "Distance Lances". A "Back to Main" button is visible at the bottom left of the interface.

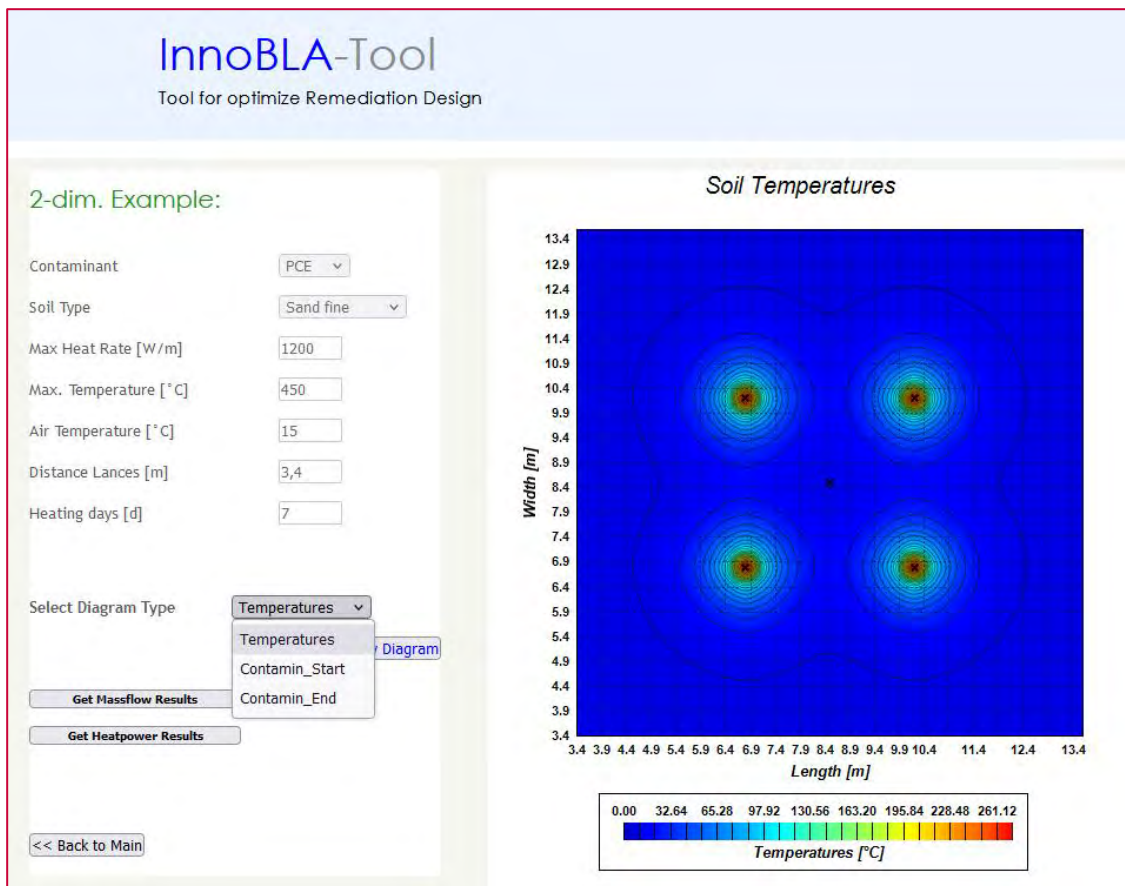
Die Anordnung ist hier als quadratische Form mit 4 Injektions-Heizlanzen und einer Absaugungslanze in der Mitte angesetzt. Für die Heizlanzen kann der Abstand und die maximale Heizleistung gewählt werden. Die tatsächlichen Heizleistungen ergeben sich während den Berechnungen in Abhängigkeit einer angesetzten maximalen Lanzentemperatur (vgl. Abbildung 155).

Die Zellgröße für die numerischen Berechnungen ergibt sich als 10% des Lanzenabstandes und ist somit abhängig von der Eingabe. Es zeigen sich bei dieser Größenordnung brauchbare Ergebnisse.

Die variablen Parameter für den Boden und Schadstoff werden aus Daten der Datenbanken errechnet. Schließlich kann durch die Eingabe der Heizdauer (Betriebsdauer von Heizung und Injektion mit Absaugung) der Betrachtungszeitraum festgelegt werden.

Mit der Betätigung des „Calculate“-Buttons starten die Berechnungen und es wird die Temperaturverteilung nach Ablauf der gewählten Betrachtungsdauer angezeigt (siehe Abbildung 151).

Abbildung 151 Ergebnis Temperaturen für „2-dim. Example“



Neben der Temperaturverteilung stehen noch die Darstellung der Schadstoffverteilung zu Beginn (Abbildung 152) und nach Abschluss der Sanierung (Abbildung 153) zur Auswahl.

Bem: Die Schadstoffverteilungen sind in diesem Beispiel nur innerhalb der Heizlanzen im Bereich „Control area“ gesetzt. Dies sollte ein Austragen der Schadstoffe nach außen verhindern.

Abbildung 152 Ergebnis Schadstoffverteilung (Sanierungsbeginn), „2-dim. Example“

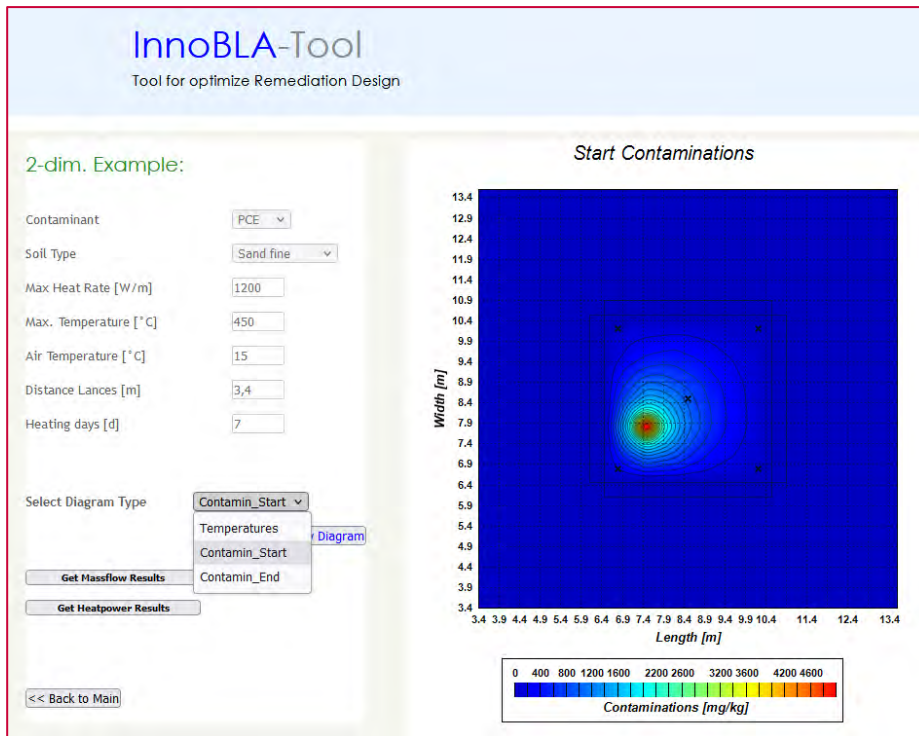
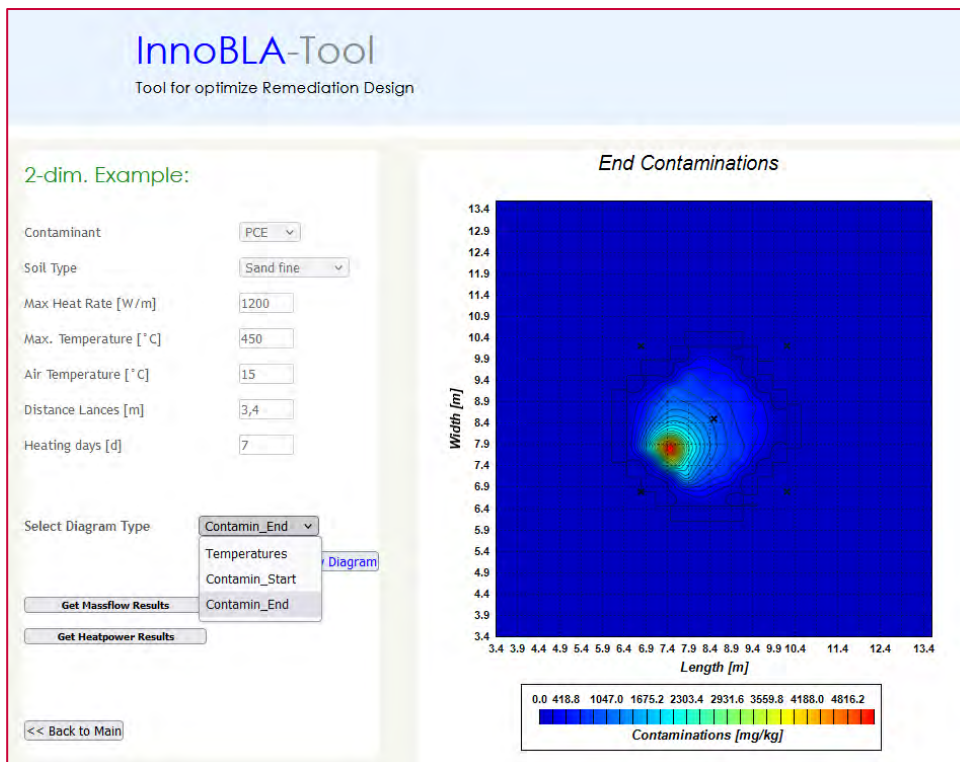
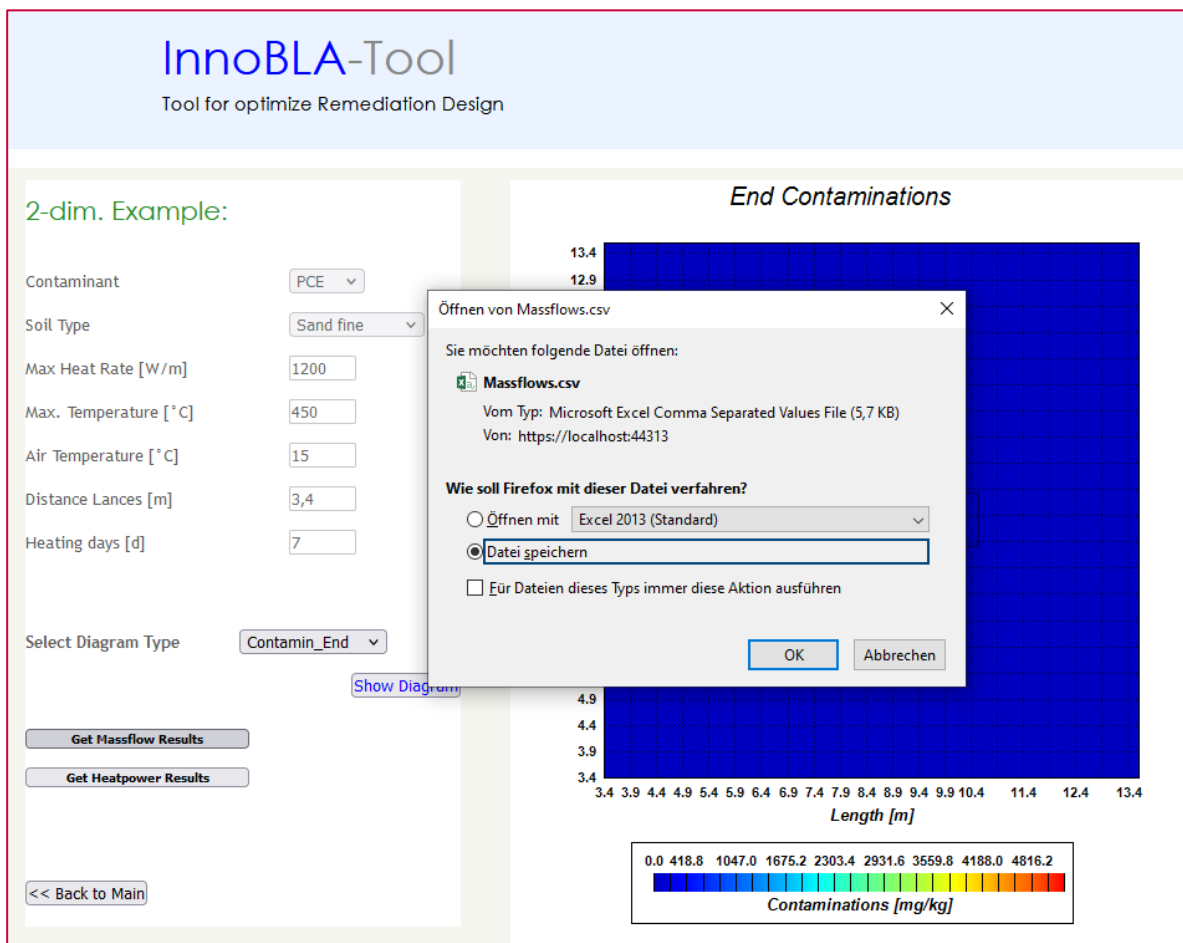


Abbildung 153 Ergebnis Schadstoffverteilung (Sanierungsende), „2-dim. Example“



Für den Download der Ergebnisdaten stehen zwei Dateien zur Auswahl. Mit dem Button „Get Massflow Results“ gelangt man zur Datei mit den Ergebnisdaten der Gasströmung (Abbildung 154). Die Resultate für den Verlauf der Heizleistungen erhält man über den Button „Get Heatpower Results“ (Abbildung 154).

Abbildung 154 Download der Ergebnisdaten für „2-dim. Example“



Nach dem Öffnen der Datei „Heatrates.csv“ sieht man die gesetzten Eingabeparameter, welche eine spätere Zuordnung der Ergebnisse ermöglichen. Zudem werden die maximale, minimale und mittlere Temperatur innerhalb des Kontrollbereichs (siehe „Control area“ in Abbildung 150) angezeigt.

Für jede der vier Heizlanzen ist die zeitlich abhängige Heizleistung aufgelistet (Abbildung 155) In diesem Beispiel zeigt sich, dass bereits nach 6 Stunden die maximale Heizleistung von 1200 W/m nicht mehr erreicht werden kann.

Abbildung 155 Ergebnisdatei „Heatrates.csv“

	A	B	C	D	E	F	G
1	Distance Lances [m]		3,4				
2	Max Heat Rate [W/m]		1200		Temperatures		
3	Max Lance Temp. [C]		450		Max Temp [C]	272,010929	
4	Air Temperature [C]		15		Min Temp [C]	11,9055719	
5	Contaminant [-]		PCE		Middle Temp	33,6473272	
6	Soil Type [-]		Sand fine				
7							
8							
9	Time [h]	P_L-1 [W]	P_L-2 [W]	P_L-3 [W]	P_L-4 [W]		
10	6	1200	1200	1200	1200		
11	12	1058,1671	1058,18888	1058,00602	1058,17239		
12	18	783,890047	783,866837	784,036359	783,88205		
13	24	778,331614	778,318246	778,411914	778,326517		
14	30	755,885302	755,875584	755,947384	755,881654		
15	36	739,372704	739,365125	739,421108	739,36986		
16	42	725,658101	725,651812	725,697195	725,655704		
17	48	714,054434	714,048985	714,087038	714,052256		
18	54	704,032549	704,027739	704,060507	704,030535		
19	60	695,240922	695,236587	695,265433	695,239022		
20	66	687,431374	687,427422	687,453319	687,42959		

Am Beginn kann der Boden die maximale Heizleistung aufnehmen, da die Heizlanzentemperatur den angegebenen Maximalwert bei dieser Heizleistung noch nicht erreicht hat. In folgender Phase steigt die Heizlanzentemperatur weiter an und erreicht nach über 6 Stunden die festgelegten 450 °C. Bei der ab diesem Zeitpunkt lokal auftretenden Bodentemperatur reicht der Temperaturgradient zwischen Heizlanze und Boden nicht mehr für die maximale Heizleistung aus. Als Folge beginnt die Heizleistung zu sinken.

Bei der Auswahl von „Get Massflow Results“ kann die Datei „Massflow .csv“ gespeichert oder geöffnet werden. Auch in dieser Datei sind die gesetzten Eingabeparameter und die entsprechenden Temperaturen aufgelistet (siehe Abbildung 156).

Für jede Heizlanze und auch für die Absaugungslanze werden hier die zeitlich errechneten Luftmassenströme angezeigt. Aufgrund der regelmäßigen Anordnung in diesem Beispiel ist zu erwarten, dass alle vier Massenströme (wie auch Heizraten) der Injektions-Heizlanzen gleich groß sein sollten. Da jedoch der vorhandene Schadstoff im Boden Auswirkungen bezüglich Gasströmung und Wärmetransport hat, ergeben sich gering unterschiedliche Werte für die 4 Heizlanzen.

In diesem Beispiel werden die Drücke für die Heiz- und Absaugungslanzen automatisch an die Bodenart angepasst. Da jedoch nur eine Absaugungslanze 4 Heizlanzen gegenübersteht, wird in Summe eingebrachte Luft in den umgebenden Boden abgeführt.

Ein weiterer Wert ist die Austrittstemperatur der abgesaugten Luft. Der zeitliche Verlauf dieser Absaugungstemperatur ist auch in den Daten der Datei enthalten.

Bemisst man die austretende Wärmeleistung des abgesaugten Luftmengenstroms an der Aussenlufttemperatur, so erhält man eine Wärmeleistung welche hier als „P-heat_out“ angegeben wird (Spalte H in Abbildung 156).

Abbildung 156 Ergebnisdatei „Massflow_air.csv“

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Distance Lances [m]		3,4								
2	Max Heat Rate [W/m]		1200		Temperatures						
3	Max Lance Temp. [C]		450		Max Temp [C]	272,010929			S-Start [kg]	15,8452843	
4	Air Temperature [C]		15		Min Temp [C]	11,9055719			S-End [kg]	14,0434232	
5	Contaminant [-]		PCE		Middle Temp	33,6473272			delta-S [kg]	1,80186115	
6	Soil Type [-]		Sand fine								
7											
8											
9	Time [h]	L-1 [kg/s]	L-2 [kg/s]	L-3 [kg/s]	L-4 [kg/s]	L-Ex [kg/s]	Temp_out [C]	P-heat_out	S_out [kg/s]	S_out_sum [kg]	
10	6	-2,60E-05	-2,60E-05	-2,60E-05	-2,60E-05	4,93E-05	9,99999183	-0,25858283	2,98E-06	0,06441077	
11	12	-2,60E-05	-2,60E-05	-2,60E-05	-2,60E-05	4,98E-05	9,99998355	-0,26139026	3,01E-06	0,12951953	
12	18	-2,21E-05	-2,21E-05	-2,21E-05	-2,21E-05	4,87E-05	9,9999828	-0,25552287	2,95E-06	0,19316916	
13	24	-2,11E-05	-2,11E-05	-2,11E-05	-2,11E-05	4,78E-05	9,99998913	-0,25099594	2,89E-06	0,25569305	
14	30	-2,10E-05	-2,10E-05	-2,10E-05	-2,10E-05	4,73E-05	10,0000222	-0,24850418	2,87E-06	0,31759767	
15	36	-2,08E-05	-2,08E-05	-2,08E-05	-2,08E-05	4,70E-05	10,0001544	-0,24668809	2,85E-06	0,37905234	
16	42	-2,06E-05	-2,06E-05	-2,06E-05	-2,06E-05	4,67E-05	10,0005657	-0,24517642	2,83E-06	0,44013652	
17	48	-2,05E-05	-2,05E-05	-2,05E-05	-2,05E-05	4,65E-05	10,0016081	-0,24384098	2,81E-06	0,50090268	
18	54	-2,04E-05	-2,04E-05	-2,04E-05	-2,04E-05	4,62E-05	10,0038591	-0,24260485	2,80E-06	0,56139228	
19	60	-2,03E-05	-2,03E-05	-2,03E-05	-2,03E-05	4,61E-05	10,00815	-0,2414008	2,79E-06	0,62164202	

In Spalte I ist der zeitliche Massenstrom an ausgetragenen Schadstoff angeführt. Die über die Zeit aufsummierten ausgetragenen Schadstoffmassen sind in Spalte J als „S_out_sum“ vorhanden. Zudem sind die Schadstoffmengen am Beginn und am Ende angeführt. In diesem Beispiel beträgt die maximale Startkontamination 5,000 mg/kg Boden an einem Punkt. Ausgehend von diesem Wert wird eine Verteilung im gesamten Bereich mit dem „Random Walk“ Verfahren interpoliert (vgl. Abbildung 164).

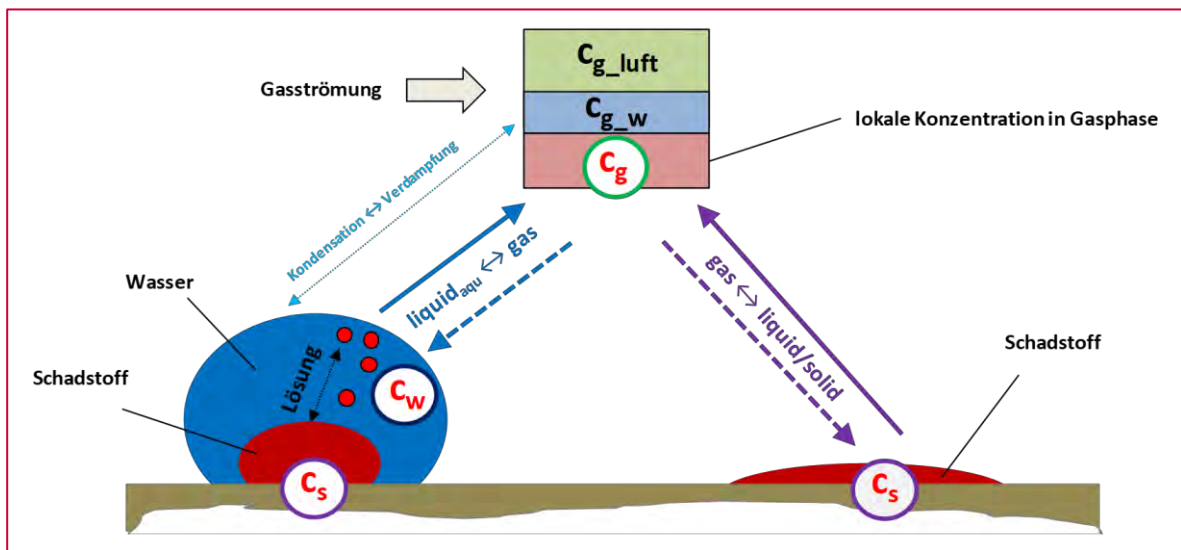
3.2 Erweiterung des Planungstools durch Integration der Simulation von Schadstofftransportprozessen

Für die Berechnungen zum Schadstofftransport wurden einige vereinfachte Ansätze im Planungstools implementiert.

3.2.1 Konzept und Ansatz des Stofftransportes

Der Schadstoff liegt im Boden in unterschiedlichen Formen (Phasen) vor. In Abbildung 157 sind die verschiedenen Phasen der Schadstoffverteilung im Überblick dargestellt. Der Schadstoffaustrag aus dem kontaminierten Boden erfolgt mittels Luftabsaugung über die Gasphase.

Abbildung 157 Modellansatz für das Transportmodell

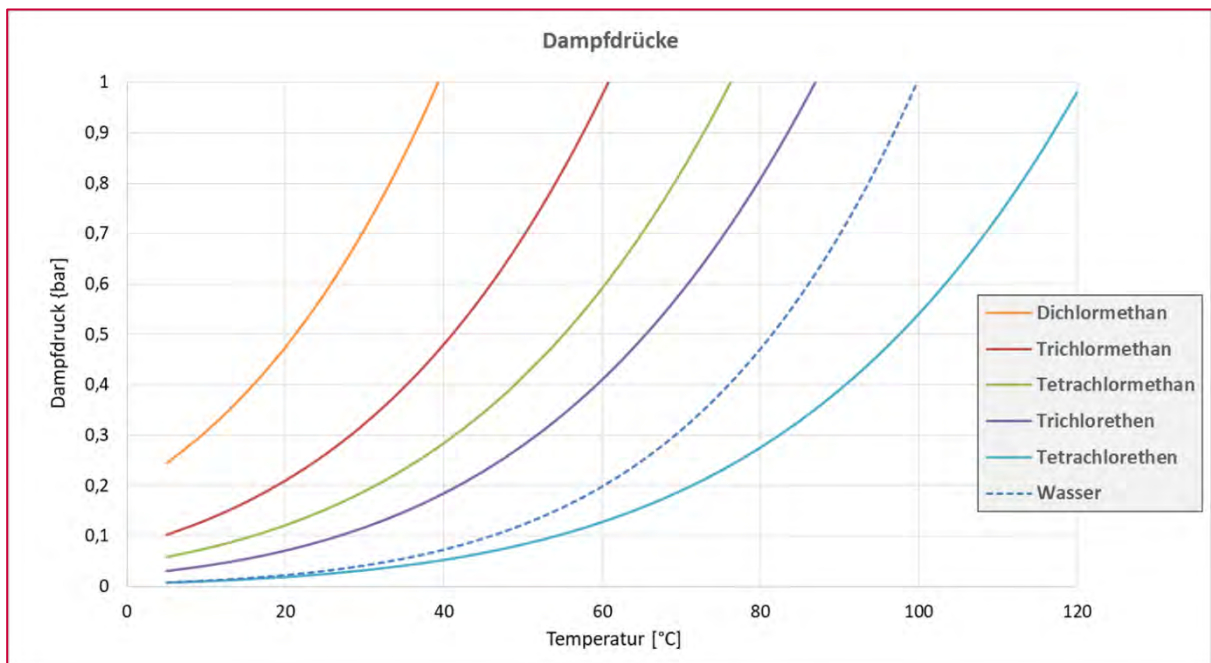


Bei der Betrachtung der Verteilung des Schadstoffes zwischen den Phasen wird davon ausgegangen, dass sich ein chemisches Gleichgewicht einstellt. Damit kann der maximale Anteil des Schadstoffes in der Gasphase ermittelt werden, welcher bei der Absaugung der Bodenluft bestenfalls abtransportiert wird. Die Berechnungen zur Gleichgewichtsverteilung erfolgen mit chemisch-physikalischen Parametern der Schadstoffe.

3.2.2 Parameter für den Schadstofftransport

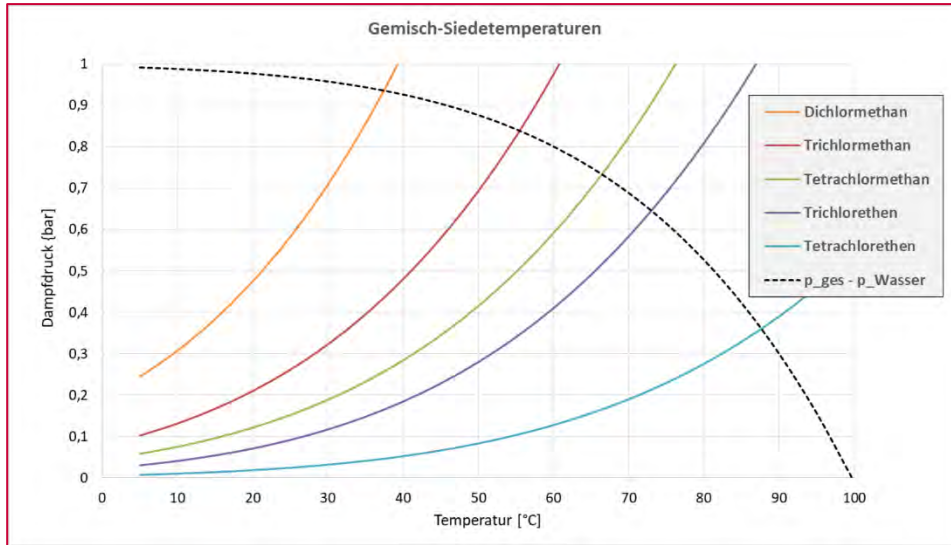
Die für den Stofftransport notwendigen Größen werden mit Hilfe von Parametern aus der Datenbank „Schadstoffe“ berechnet. Eine wichtige Größe ist der Dampfdruck eines Schadstoffs als Funktion der Temperatur, die im Planungstool mit einer Antoine-Gleichung berechnet wird. Die temperaturabhängigen Dampfdrücke für Wasser und einige Schadstoffe sind in Abbildung 158 ersichtlich.

Abbildung 158 Errechnete Dampfdrücke



Liegen die Schadstoffe jedoch gemeinsam mit Wasser vor, ergibt sich ein von den Reinstoffen abweichendes Verdampfungsverhalten. Hierfür werden die jeweiligen Gemischsiedetemperaturen, welche vom Gesamtdruck abhängig sind, herangezogen. Die Ermittlung dieser Temperaturen (Schnittpunkte der Dampfdrücke und des dafür verbleibenden Differenzdrucks) ist graphisch in Abbildung 159 dargestellt.

Abbildung 159 Bestimmung der Gemischsiedetemperaturen

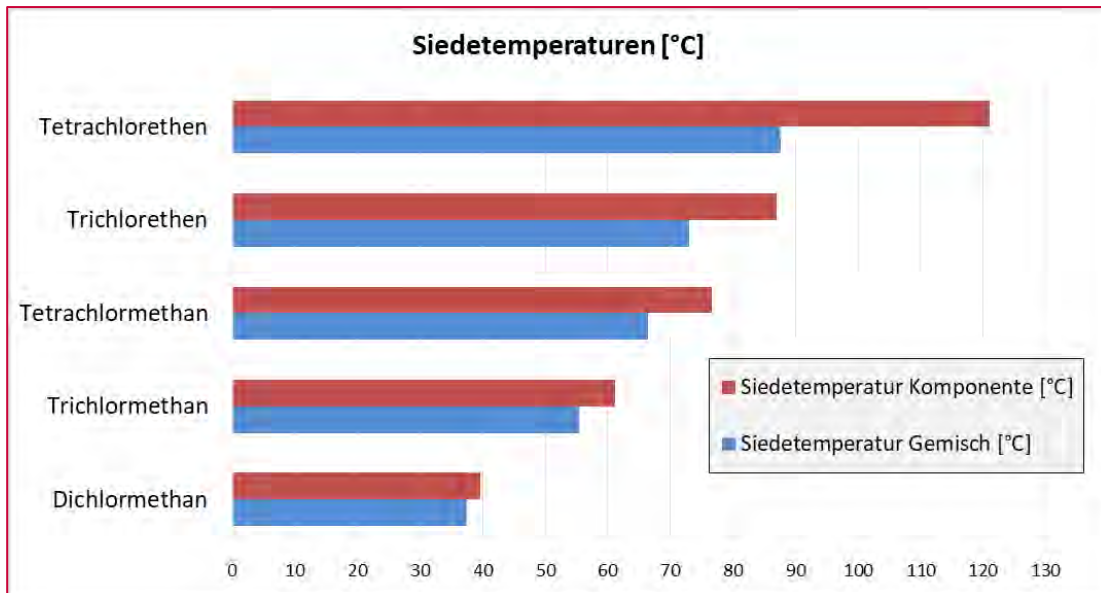


Für jeden Schadstoff wurden die Gemischsiedetemperaturen über den Druckbereich von 0,5 bis 1,5 bar mit Hilfe eines „Solvers“ vorab ermittelt. Die Resultate wurden mit einer Polynomfunktion angepasst und die jeweiligen Parameter in die Datenbank eingetragen. Somit kann für jeden Schadstoff die druckabhängige Gemischsiedetemperatur mit den Parametern aus der Datenbank errechnet werden.

Tabelle 13 Errechnete Gemischsiedetemperaturen bei 1 bar

Siedetemperaturen		
Stoff	Siedetemperatur Komponente [°C]	Siedetemperatur Gemisch [°C]
Dichlormethan	39,64	37,42
Trichlormethan	61,18	55,48
Tetrachlormethan	76,64	66,42
Trichlorethen	87,05	73,00
Tetrachlorethen	121,05	87,64

Abbildung 160 Gemischsiedetemperaturen bei 1 bar

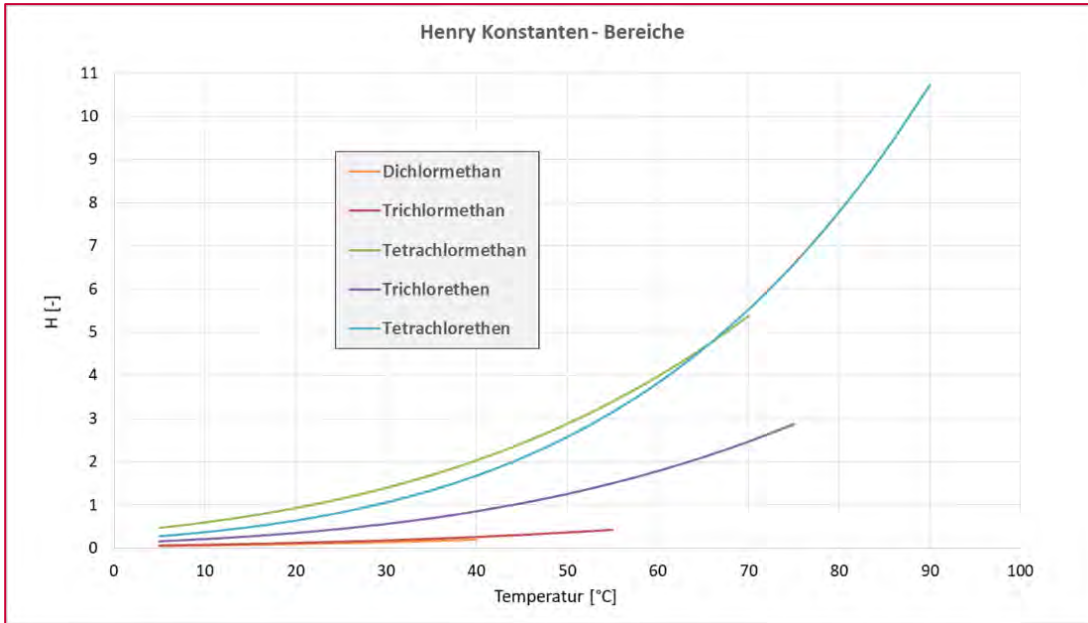


In Abbildung 160 ist gut ersichtlich, dass die jeweiligen Gemischsiedetemperaturen der Schadstoffe und Wasser unterhalb von 100 °C liegen (Wasserdampf Co-Destillation).

Ein weiterer wesentlicher Parameter für den Schadstofftransport ist der Diffusionskoeffizient. Dieser ist sowohl von der Temperatur und als auch vom Druck abhängig. Zudem wird er von der sog. Tortuosität, die über die Porosität des Bodens ermittelt wird, beeinflusst. Ein entsprechender Berechnungsparameter hierfür ist in der Datenbank abgelegt.

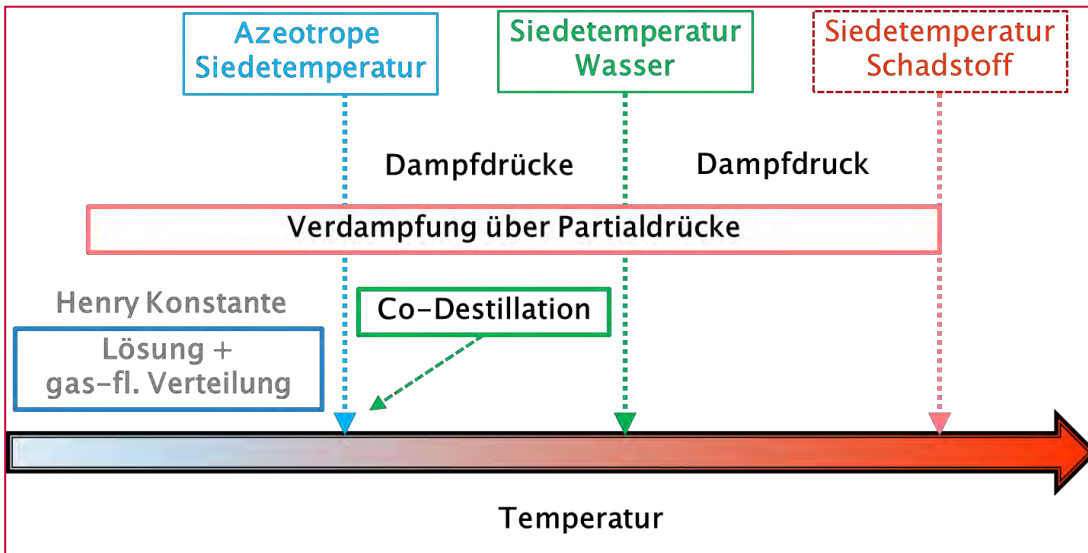
Die Henry-Konstanten für in Wasser gelöste Stoffe können mit Hilfe von Löslichkeit und Dampfdruck errechnet werden. Exemplarisch sind in Abbildung 161 die Konstanten für einige Schadstoffe bis zum Erreichen der Gemischsiedetemperatur abgebildet.

Abbildung 161 Errechnete Henry Konstanten



Die jeweiligen Mechanismen und Prozesse des Schadstofftransportes sind in Abbildung 162 bezogen auf den jeweiligen Temperaturbereich symbolisch angeführt.

Abbildung 162 Prozesse des Stofftransportes



3.2.3 Transportmodell für den Schadstofftransport

Während der TCH-Sanierung wird die mit den gasförmigen Schadstoffen beladene Bodenluft abgesaugt. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich währenddessen ein Gleichgewichtszustand bei der Verteilung der Schadstoff zwischen den jeweiligen Phasen einstellt. Je nach Absaugungsleistung und Zufuhr lokaler Konzentrationen in der Gasphase ergeben sich mitunter niedrigere Konzentrationen als die maximal mögliche Gleichgewichtskonzentration. Die Bestimmung der lokal in die Gasphase übergehenden Schadstoffmenge erfolgt durch ein Film-Diffusions-Modell. Aus der zeitlichen Ableitung der Grundgleichung lässt sich eine eindimensionale Abhängigkeit über die Stromlänge darstellen.

$$\frac{dc}{dx} = A_{spez} \cdot \frac{\beta}{q} \cdot (c^* - c)$$

Die spezifische Oberfläche des Schadstoffes A_{spez} , der Volumenstrom q und der Stoffübergangskoeffizient β können zu einem neuen Faktor zusammengefasst werden und ergeben die sogenannte Sättigungslänge L_{sat} (Mohrlok, 2009).

$$L_{sat} = \frac{q}{\beta \cdot A_{spez}}$$

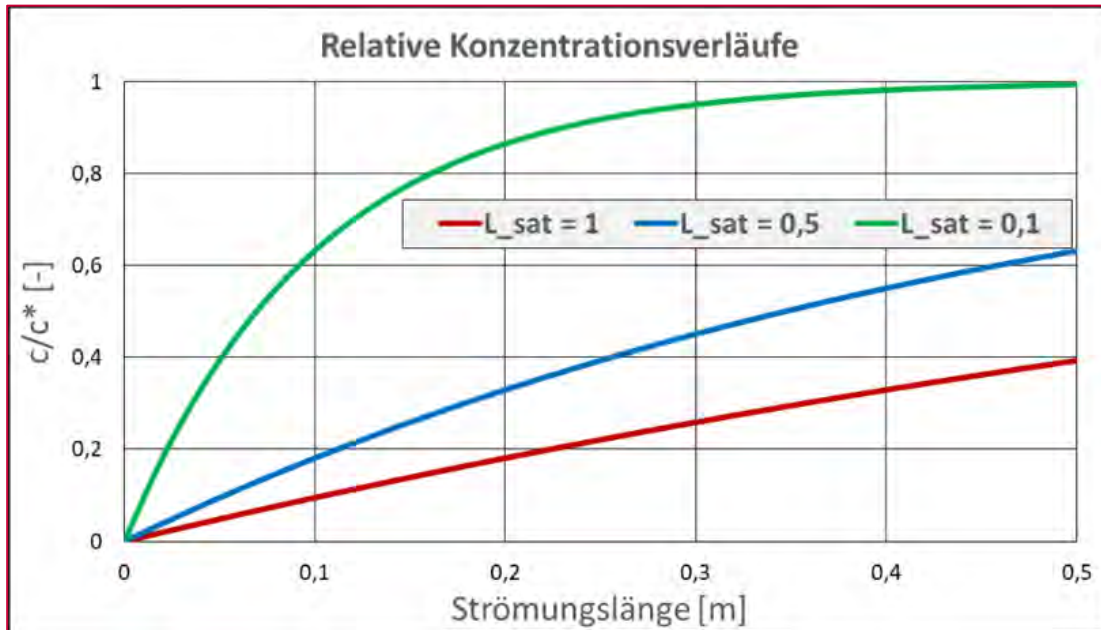
Der Konzentrationsverlauf über die Wegstrecke x ist somit nur noch von L_{sat} und der Gleichgewichtskonzentration c^* abhängig und ergibt sich zur nachfolgenden Gleichung, mit welcher die Austrittskonzentrationen in den jeweiligen Zellen im Transportmodell errechnet werden können. Im Modell wird zusätzlich ein Term für die lokale Eingangskonzentration, welche in den Bereich eingetragen wird, hinzugefügt.

$$c_x = c^* \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{L_{sat}}}\right)$$

In Abbildung 163 sind die lokal auftretenden Konzentrationen für drei unterschiedliche Sättigungslängen dargestellt. Zur besseren Übersicht ist hier die Eingangskonzentration mit Null angesetzt. Bei einer Stromlänge von hier beispielhaft 0,5 m erreicht man mit einer Sättigungslänge von 0,1 m bereits nahezu den Gleichgewichtszustand und die Abluft verlässt den Bereich gesättigt mit dem Schadstoff.

Beträgt der errechnete Wert der Sättigungslänge den Wert der Strömungslänge (hier 0,5), so ergibt sich die Austrittskonzentration dieses Bereichs zu etwa 63% der Sättigungskonzentration.

Abbildung 163 Relative Konzentrationsverläufe für unterschiedliche Sättigungslängen

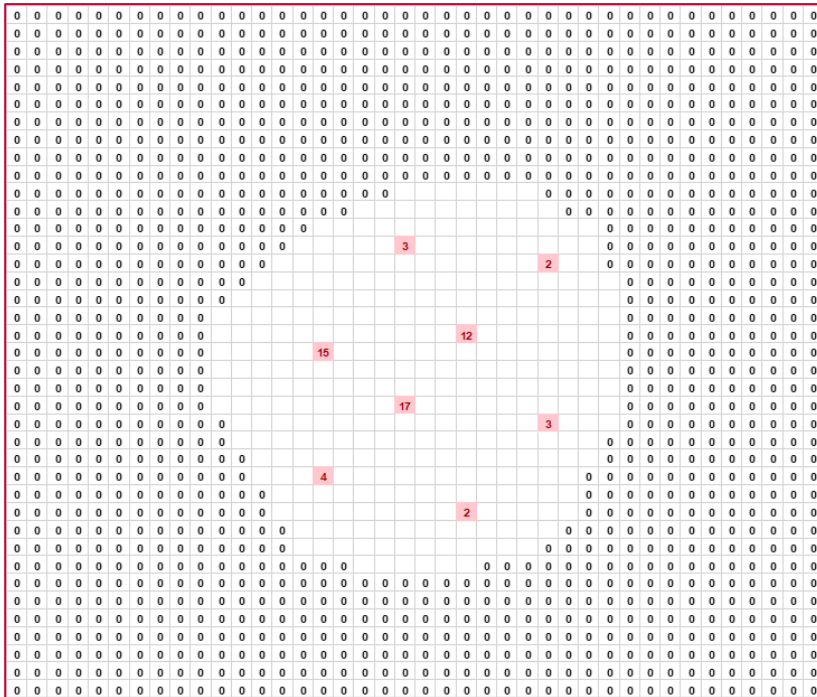


3.2.4 Aufbau des Schadstofftransportmodells

Das vollständige Bekanntsein der lokalen Schadstoffverteilung im Boden ist praktisch nicht möglich. Die bei einer Erkundung ermittelten Konzentrationen beziehen sich immer auf einen punktuellen Bereich der Probenahme. Besser abschätzbar sind jedoch der jeweilige Bereich und die Reichweite eines Schaderdes. Als Ausgangsbasis für eine Schadstoffverteilung (siehe Abbildung 164) dienen ein jeweiliger Messpunkt mit definierter Schadstoffkonzentrationen im Boden (Werte rot), Bereiche in welchen nachweislich keine Schadstoffe vorhanden sind (Bereiche mit Null) und Bereiche, in welchen die vermuteten Schadstoffkonzentrationen zu interpolieren sind (leere Bereiche).

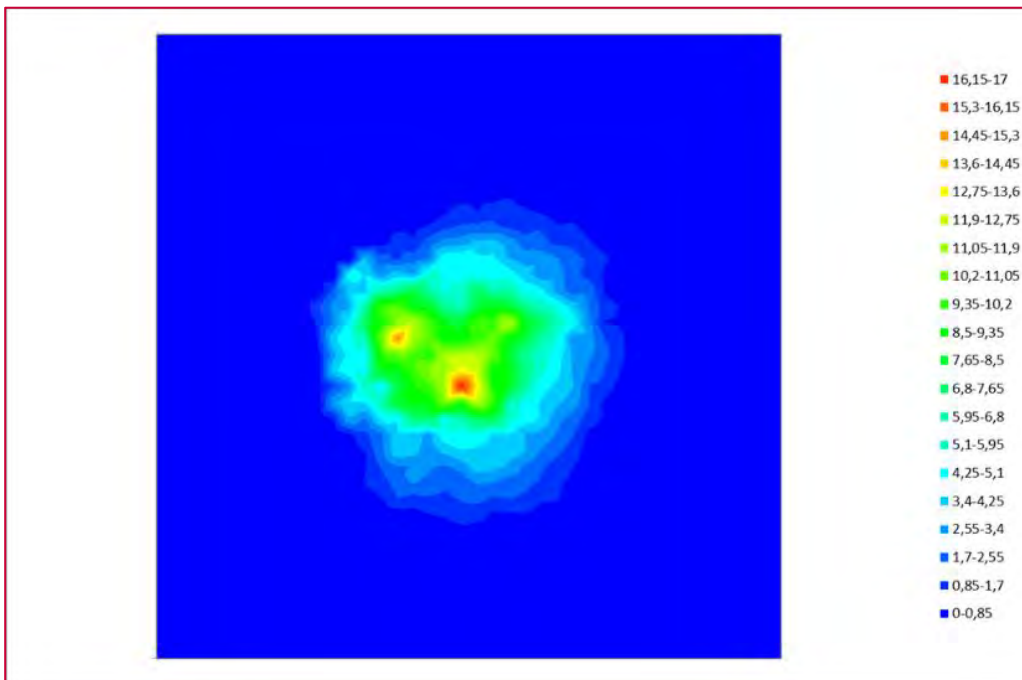
Für die Interpolation der Werte wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung mit dem sogenannten „Random Walk“ Verfahren berechnet. Hierfür werden von dem zu errechnenden Wert zufällig veranlasste Richtungsänderungen durchgeführt und damit andere Bereiche mit definierten Schadstoffkonzentrationen erreicht. Für jeden Zielwert kann eine Anzahl von Durchläufen N gewählt werden.

Abbildung 164 Ausgangsbasis für eine Kontaminationsverteilung



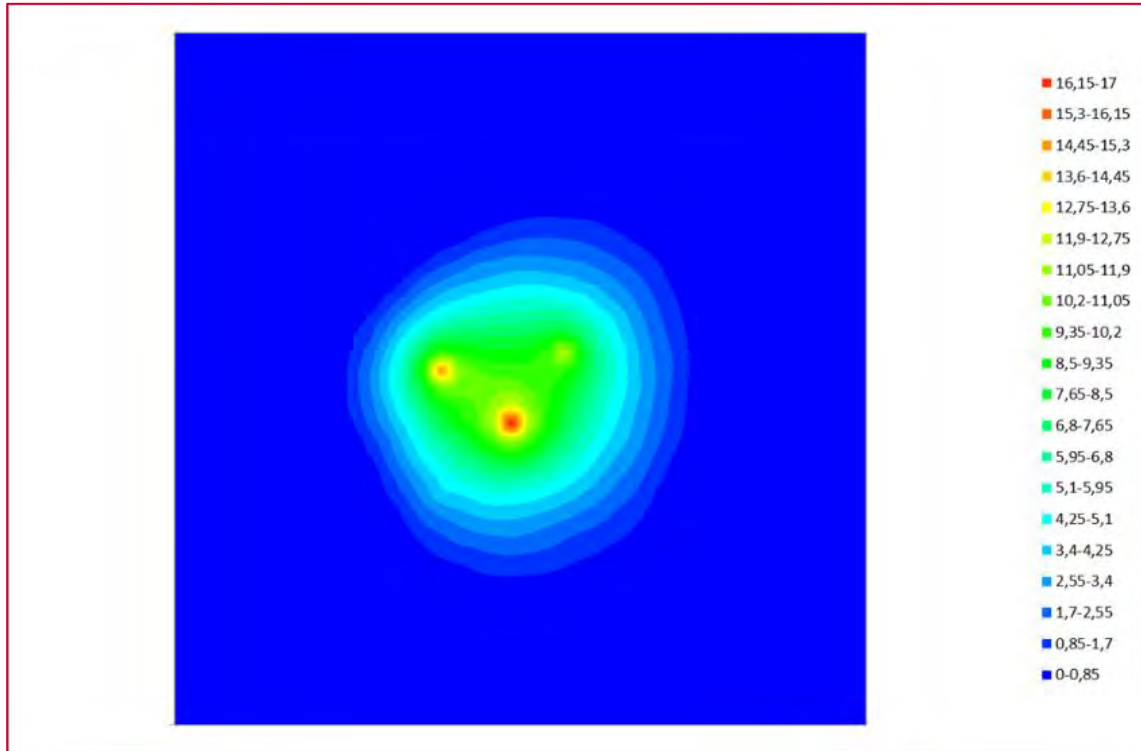
Bei einer Wahl von $N = 10$ Durchläufen je gesuchten Wert (Abbildung 165) ergibt sich eine etwas unregelmäßige Verteilung, welche lokale Schwankungen aufweist.

Abbildung 165 Ergebnisse für Random Walk mit $N = 10$



Wird die Anzahl der Durchläufe auf $N = 1000$ erhöht, wird der gesamte Bereich sehr „glatt“ interpoliert (Abbildung 166).

Abbildung 166 Ergebnisse für Random Walk mit $N = 1000$



Bemerkung: Da die Schadstoffverteilung zufallsbasiert errechnet wird, ergeben sich für Berechnungen auch bei denselben Startbedingungen abweichende Gesamtergebnisse. Vor allem die Gesamtmenge an Schadstoff kann bei $N = 10$ große Unterschiede aufweisen. Daher wird im Planungstool mit $N = 1000$ gerechnet.

3.2.5 Beispiel für den Schadstofftransport

Um das Verhalten des Schadstofftransports und damit des Schadstoffaustrags beispielhaft darzustellen, werden für eine einfache Anordnung die Ergebnisse von zwei Schadstoffen gegenübergestellt. Die Ausgangsdaten bezüglich Bodenaufbau, Heizanlagen und Startkontaminationen sind für beide Schadstoffe identisch. Nach 30 Tagen Sanierungsbetrieb ergeben sich lediglich geringe Unterschiede in den Temperaturverteilungen (Abbildung 167 und Abbildung 168).

Abbildung 167 Berechnung für Dichlormethan

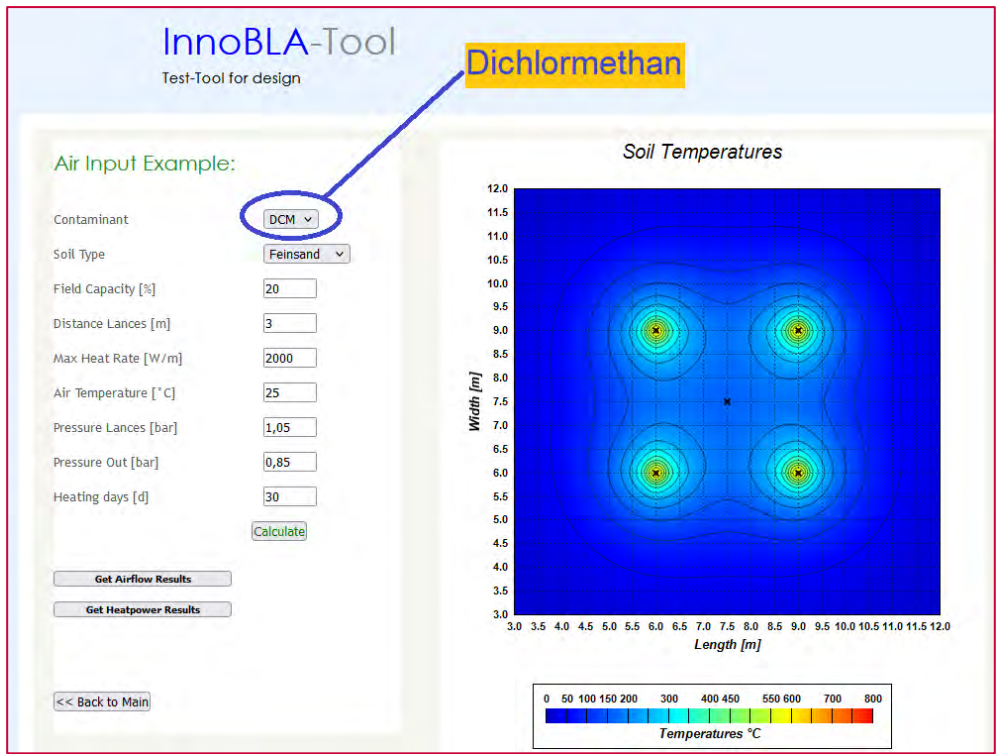
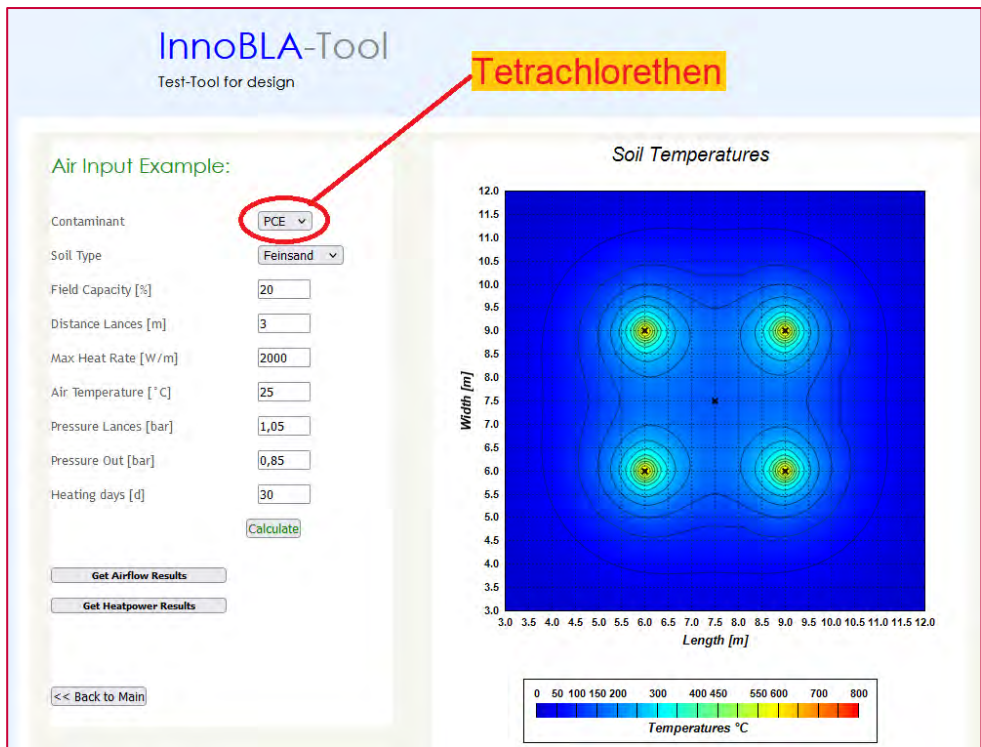
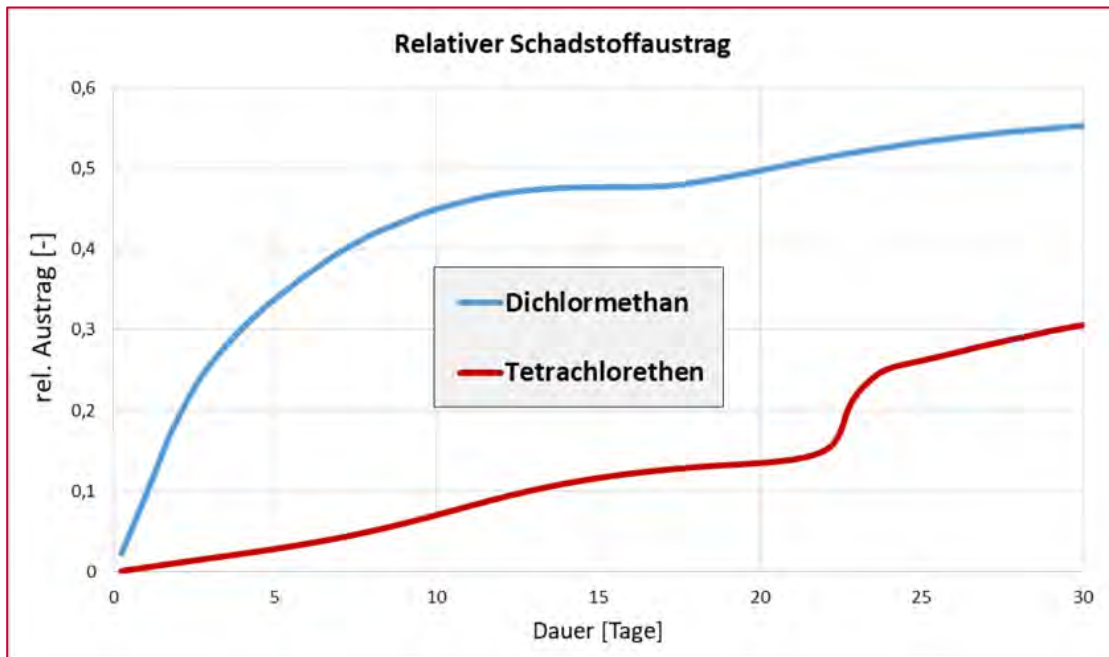


Abbildung 168 Berechnung für Tetrachlorethen



Betrachtet man jedoch den zeitlichen Austrag der beiden Schadstoffe, so ergeben sich wesentliche Unterschiede. In Abbildung 169 sind die zeitlichen Verläufe der Austräge beider Schadstoffe gegenübergestellt. Gut erkennbar ist der bereits zu Beginn sehr gute Austrag des leicht flüchtigen Dichlormethans.

Abbildung 169 Relativer Schadstoffaustrag zweier Schadstoffe



Bei Tetrachlorethen beginnt der Austrag zuerst flach und steigt erst bei besserer Durchwärmung des Bodenkörpers bei höheren Temperaturen an.

4 Heizlanzenentwicklung

Tabelle 14 fasst die Arbeiten zur Entwicklung und Erprobung von 3 Heizlanzentypen zusammen. Die Erprobung diese Heizlanzen erfolgte in einem Testfeld unter Freilandbedingungen, das mit einer Anordnung von Temperatursensoren zur Verfolgung der Temperaturentwicklung im Bodenkörper ausgestattet war. Die Heizlanzen bestehen aus einem Hüllrohr und einem Heizelement. Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurden Modifikationen am Hüllrohr bzw. am Heizelement vorgenommen.

Tabelle 14 Heizlanzentypen und durchgeführte Versuche

	Segmentierte Heizlanze	Heizlanze mit gleichzeitiger Luftinjektion	Heizlanze im Schrägverbau
Heizlanzentyp	Heizlanze mit 3 separat ansteuerbaren Heizzonen à 2.5 m; (modifiziertes Heizelement);	Standardheizlanze (6 m Heizlänge, 9 kW) mit Luftauslässen und Luftinjektionsrohr; (modifiziertes Hüllrohr);	Heizlanze (6 m) mit angepassten Keramikkörpern (modifiziertes Heizelement);
Einbauart	Vertikalverbau	Vertikalverbau	20°-Schrägverbau
Testzeitraum	6 Wochen	6 Wochen	6 Wochen
Kontrolle¹⁾	T-Messung	T-Messung	T-Messung
Ziel	Separates Aufheizen mehrerer Bodenzonen	Verfahrens-Kombination aus Luftinjektion und TCH	Schrägeinbau (Machbarkeit) + Testbetrieb

¹⁾T-Messung = Temperaturmessung

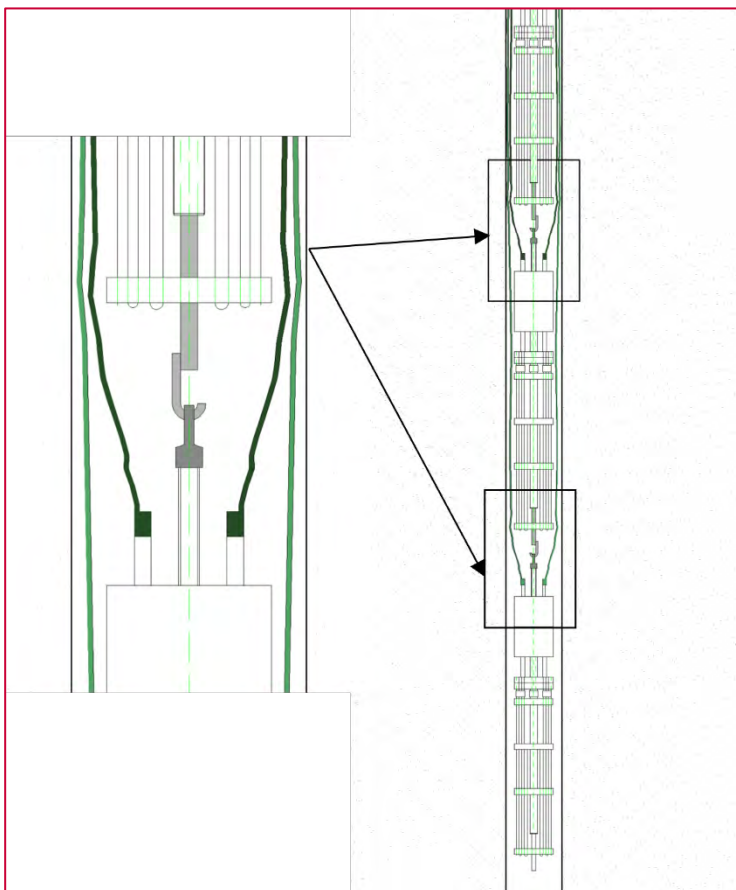
4.1 Versuchslanze zur segmentierten Temperatursteuerung

Zum gezielten Aufheizen einzelner Bodenschichten wurde eine Versuchslanze mit separater Temperaturansteuerung entwickelt. Dazu wurden 3 Heizelemente in Standardausführung von jeweils 2,50 m Heizflächenlänge, deren Heizwiderstände aus einer Eisen-Chrom-Nickel-Legierung bestanden, modifiziert (Abbildung 170 und Abbildung 171). Die einzelnen Heizelemente wurden mittels Haken und Lastöse miteinander

verbunden. Dazu wurden am Ende der ersten beiden Heizelemente am Mittelstab ein Haken verschweißt, so dass ein neues Heizelement, bestehend aus drei Segmenten, entstand. Die Heizelemente waren am oberen Ende mit einem Gewinde ausgestattet, an dem eine Ringmutter befestigt wurde.

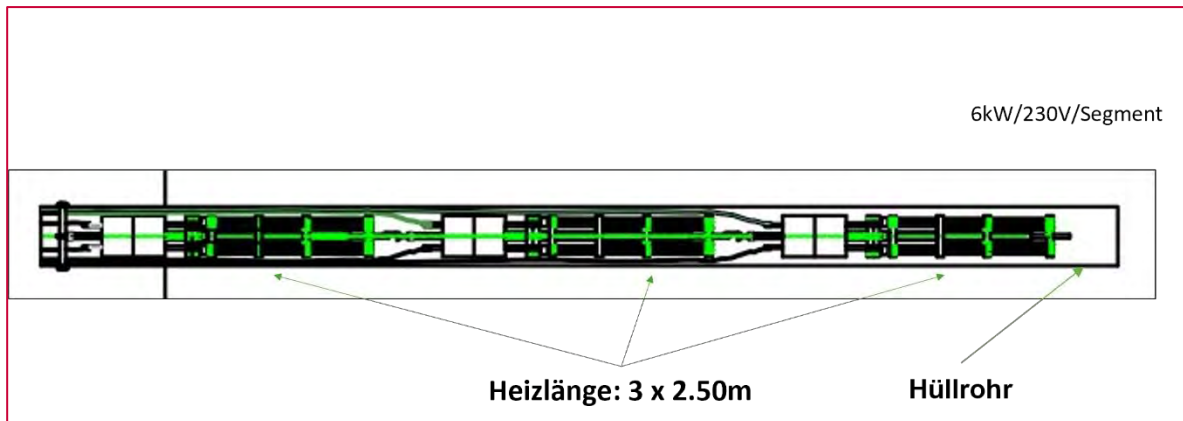
Die Anschlüsse für die Stromversorgung und das Thermoelement zur Temperaturkontrolle bei den Standardheizelementen befinden sich am Kopf des Heizelementes. Bei den segmentierten Heizelementen musste jedes Segment separat verkabelt und die Kabel im Hüllrohr im Nahbereich der Segmente nach oben gezogen werden. Da für die Versuche im Testfeld eine Heizanzentemperatur von bis zu 500°C geplant war, mussten Hochtemperaturkabel (10 mm²) verwendet werden.

Abbildung 170 Segmentierte Heizlanze, Detailansicht der Verbindung mit Haken und Öse sowie Verkabelung (grün)



Jedes Segment wurde mit 230 V versorgt und hatte eine Heizleistung von 6 kW.

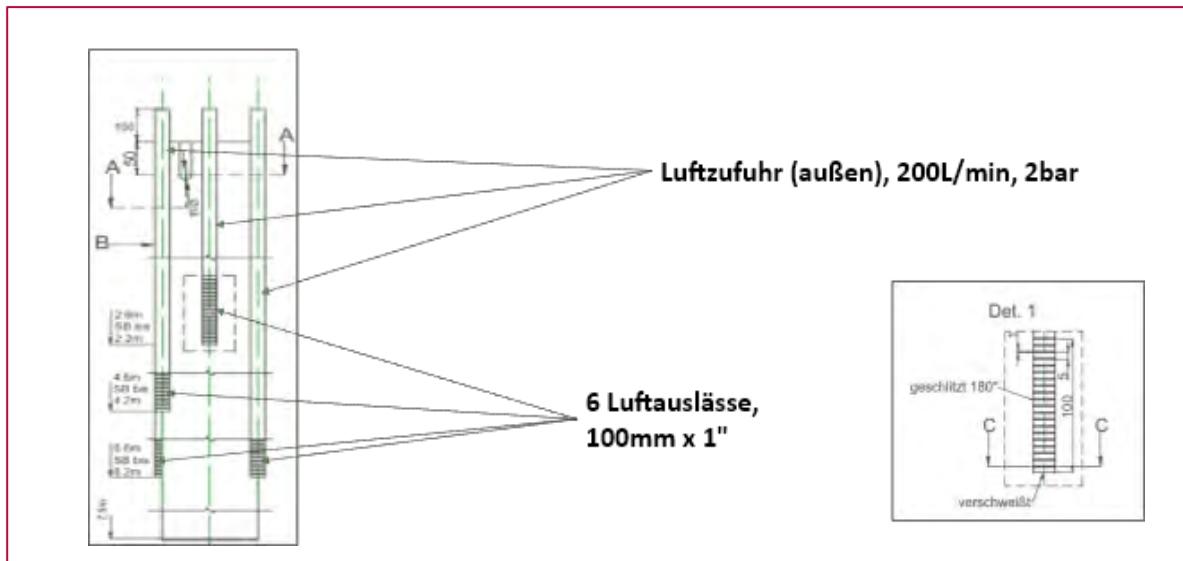
Abbildung 171 Segmentierte Heizlanze mit Hüllrohr



4.2 Versuchslanze zur Kombination von TCH mit gleichzeitiger Luftinjektion

Zur Verbesserung der thermischen Reichweite von Heizlanzen wurde ein Hüllrohr durch Anbringen von Luftauslässen auf der äußeren Oberfläche modifiziert, über die durch die Heizlanze vorerwärmte Druckluft in den Bodenkörper injiziert und somit neben dem konduktiven Aufheizprozess auch eine konvektive Erwärmung des Bodenkörpers erzielt werden konnte. Dazu wurden konzentrisch im Abstand von 60° sechs Rohre verschweißt. Das modifizierte Hüllrohr ist in Abbildung 172 im Querschnitt dargestellt und hat eine Dimension von 114,3x3 mm bei einer Länge von 7 m. Die Abmessung der Luftinjektionsrohre betrug 17,2x1,8 mm. Die Geometrie der Luftauslässe wurde mehrfach angepasst, um eine einfache Fertigung sicher zu stellen. Die im Feldversuch eingesetzte Variante hatte die Injektionsstrecke von 10 cm mit geschlitzten Auslässen (Abbildung 172, rechte Seite). Jeweils 2 Luftauslässe befinden sich auf 2, 4 und 6 m Höhe.

Abbildung 172 Hüllrohr mit Luftinjektion



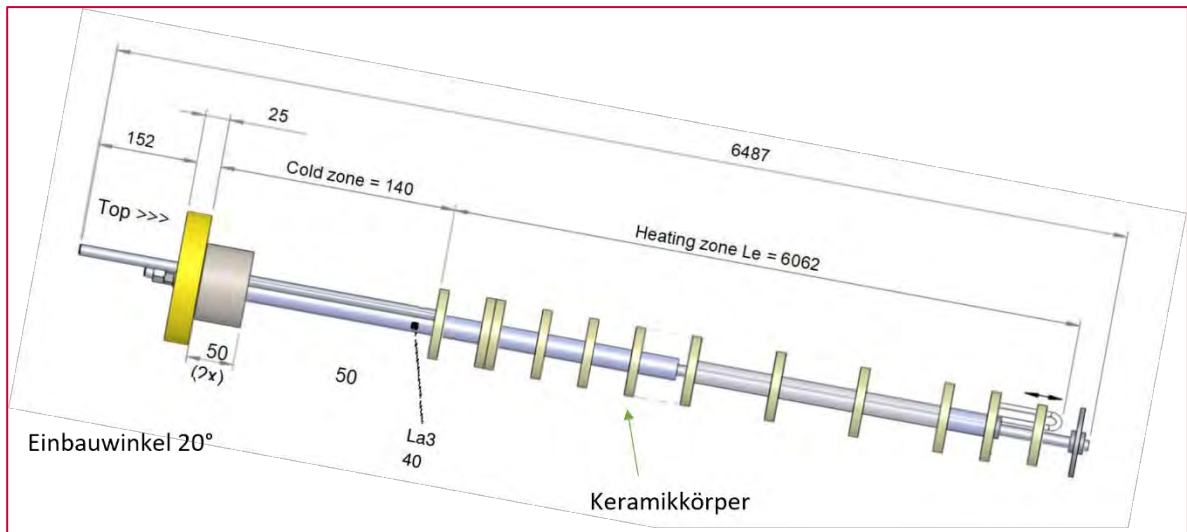
Das Heizelement wurde in Standardausführung (6m Heizfläche, 12kW, 230V) verwendet. Die Luftzufuhr in den aufgeheizten Bodenkörper erfolgte mittels eines Kompressors (bis 200 L/min bei max. 2 bar)

4.3 Versuchslanze für den Schrägverbau

Zur Sanierung von Schadensfällen, die sich unterhalb eines Gebäudes befinden, wurde eine Versuchslanze entwickelt, die für den Schrägeinbau in den Bodenkörper geeignet ist. Um den Schrägeinbau zu realisieren, war es notwendig die Keramikkörper eines Standardheizelementes (6 m Heizfläche, 12 kW, 230 V) zu modifizieren (Abbildung 173). Diese Keramikkörper dienen als Abstandshalter zwischen den Heizdrähten und zur Vermeidung von Kontakten mit der Innenseite der Hüllrohre. Da Heizlanzen standardmäßig vertikal verbaut werden, woraus eine senkrechte Belastung der Keramikkörper resultiert, mussten für den Schrägverbau, bei dem eine Druckbelastung der Keramiken durch Aufliegen am Hüllrohr auftritt, die Keramikkörper entsprechend angepasst werden. Außerdem mussten die Abstände der Keramikkörper zueinander verändert werden, da aufgrund des Schrägeinbaus einer Heizlanze das Wärme bedingte Ausdehnungsverhalten der Heizdrähte des Heizelementes im Gegensatz zum vertikalen Einbau unterschiedlich ist.

Bei der Modifikation des Heizelementes wurde davon ausgegangen, dass der Schrägeinbau in einem Winkel von 20° erfolgt.

Abbildung 173 Versuchslanze für den Schrägverbau mit Keramikkörper



4.4 Feldversuche

Da der ursprünglich ausgewählte Standort in der Nähe von Leoben für Durchführung der Feldversuche nicht mehr zur Verfügung stand (der der Eigentümer der Fläche hat kurzfristig seine Genehmigung zur Nutzung zurückgezogen), wurden die Versuche auf einer ca. 200 m² großen Fläche durchgeführt, die sich auf dem Areal der VSAD Judendorf in Leoben befindet und von der voestalpine AG zur Verfügung gestellt wurde (Abbildung 174).

Auf dem Testfeld wurden 23 Bohrungen bis maximal 8.50 m in die ungesättigte Bodenzone zur Installation der Versuchslanzen und von Monitoringbrunnen für die Überwachung der Temperatursausbreitung im Bodenkörper abgeteuft. Die Monitoringbrunnen wurden mit Temperatursensoren ausgestattet, deren vertikale Positionierung Abbildung 175 zu entnehmen ist

Abbildung 174 Fläche für die Feldversuche

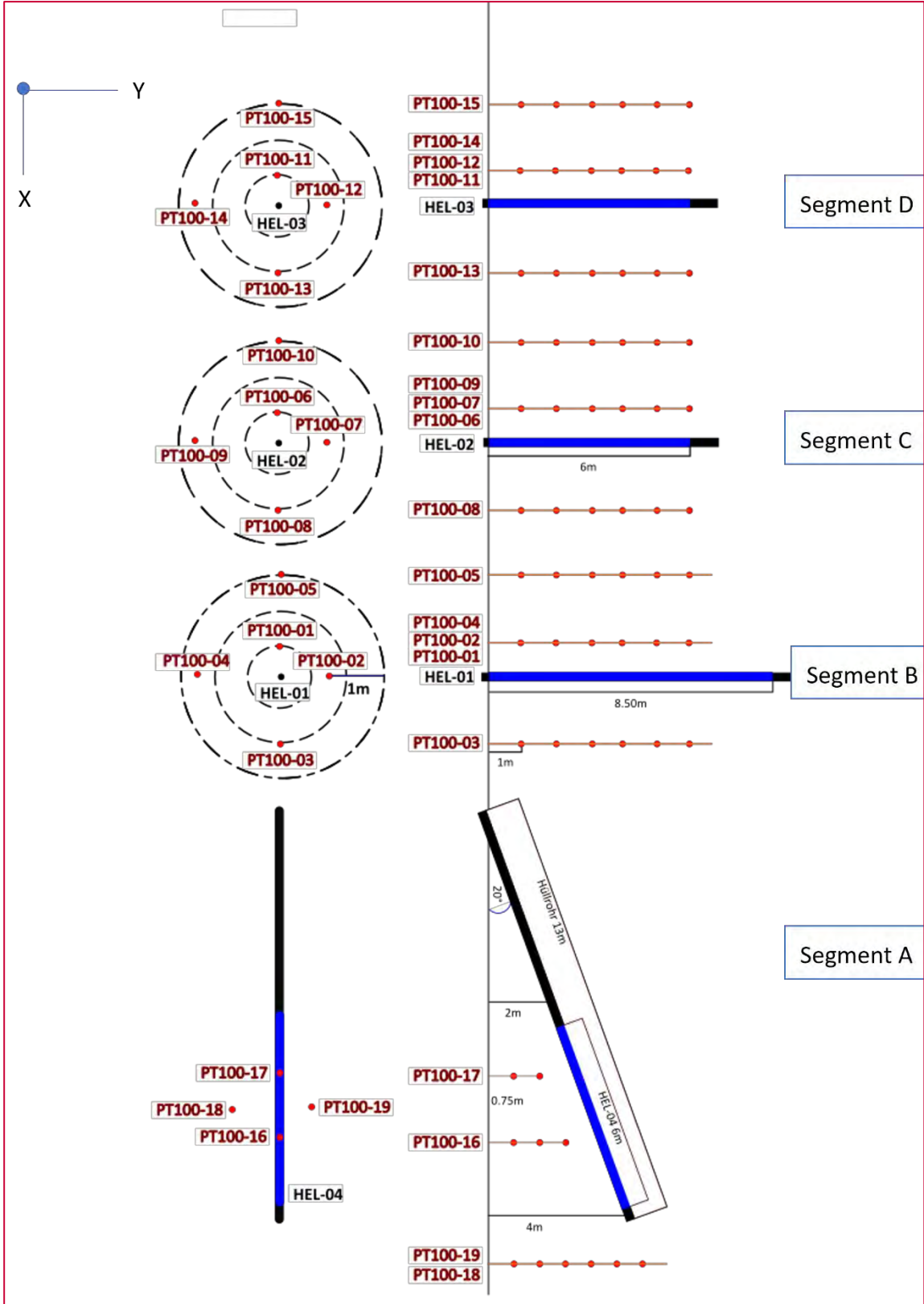


Die Energieversorgung der Heizlanzen, die Kontrolle der Heizlanzentemperaturen und die Aufnahme der Temperaturdaten erfolgte durch drei Steuerungspanele (ein Master Panel, zwei Slave Panels), die ebenfalls auf dem Testfeld installiert wurden.

Über einen Datenlogger wurden die Temperaturdaten aller Sensoren jeweils im Abstand von 5min. ausgelesen und gespeichert.

Die Oberfläche des Testfeldes wurde nicht abgedeckt, um eine Kondensation des verdampfenden Bodenwassers zu vermeiden. Der Testfeldbetrieb wurde ohne Bodenluftabsaugung durchgeführt.

Abbildung 175 Layout Versuchsfeldinstallationen



Die Versuchsfläche wurde in vier Segmente eingeteilt:

- 1.) Segment A: Heizlanze mit Schrägverbau;
- 2.) Segment B: Heizlanze mit segmentierter Temperatursteuerung;
- 3.) Segment C: Heizlanze mit Luftinjektion;
- 4.) Segment D: Heizlanze Standardtyp als Referenz.

In den einzelnen Segmenten wurden die folgenden Komponenten installiert

Segment A

- Heizlanze: Heizelement mit 6 m Heizfläche, 12 kW Heizleistung, 230 V;
- Heizlanze: Hüllrohr mit 13 m Länge, 20° Einbauwinkel, Edelstahl TP304L;
- Betriebstemperatur: 475°C
- Thermoelement zur Kontrolle der Heizlanzentemperatur;
- PT-100: 4 Monitoringbrunnen (Lage und Anzahl s. nachfolgende Tabellen).

Segment B

- Heizlanze: Heizelement mit 3 Segmenten, 2.5 m Heizfläche je Segment, 6 kW Heizleistung je Segment, 230 V;
- Heizlanze: Hüllrohr mit 8,50 m Länge, Edelstahl TP304L;
- Betriebstemperatur: 475°C
- Thermoelement zur Kontrolle der Heizlanzentemperatur
- PT-100: 5 Monitoringbrunnen (Lage und Anzahl s. nachfolgende Tabellen).

Segment C

- Heizlanze: 6 m Heizfläche, 12 kW Heizleistung, 230 V;
- Heizlanze: Hüllrohr mit 7,50 m Länge, Edelstahl TP304L;
- Betriebstemperatur: 475°C
- Thermoelement zur Kontrolle der Heizlanzentemperatur;
- 6 Luftauslässe geschlitzt (100 mm x 1") auf der Oberfläche des Hüllrohrs in drei Horizonten (2,20 m, 4,20 m, 6,20 m, gemessen jeweils von der Oberkante des Hüllrohres);
- Kompressor zur Luftversorgung, 200 L/min, 2 bar;
- PT-100: 5 Monitoringbrunnen (Lage und Anzahl s. nachfolgende Tabellen).

Segment D

- Heizlanze: 6 m Heizfläche, 12 kW Heizleistung, 230 V;
- Heizlanze: Hüllrohr mit 7.50 m Länge, Edelstahl TP304L;
- Betriebstemperatur: 475°C
- Thermoelement zur Kontrolle der Heizlanzentemperatur;
- PT-100: 5 Monitoringbrunnen (Lage und Anzahl s. nachfolgende Tabellen).

Tabelle 15 Abstände zwischen Monitoringbrunnen und Heizlanzen

PT-Brunnen	Heizlanze	Abstand-PT-Brunnen/Heizlanze m
100-06	HEL-02	0.66
100-07	HEL-02	1.00
100-08	HEL-02	1.33
100-09	HEL-02	1.66
100-10	HEL-02	2.00
100-01	HEL-01	0.66
100-02	HEL-01	1.00
100-03	HEL-01	1.33
100-04	HEL-01	1.66
100-05	HEL-01	2.00
100-11	HEL-03	0.66
100-12	HEL-03	1.00
100-13	HEL-03	1.33
100-14	HEL-03	1.66
100-15	HEL-03	2.00
100-16	HEL-04	0.00
100-17	HEL-04	0.00
100-18	HEL-04	1.50
100-19	HEL-04	0.75

Tabelle 16 Tiefenhorizontierung der PT-100 Sensoren

PT-Brunnen	Tiefe-1	Tiefe-2	Tiefe-3	Tiefe-4	Tiefe-5	Tiefe-6
	m·uGOK	m·uGOK	m·uGOK	m·uGOK	m·uGOK	m·uGOK
100-06	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-07	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-08	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-09	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-10	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-01	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-02	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-03	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-04	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-05	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-11	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-12	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-13	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-14	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-15	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
100-16	0.75	1.50	2.25			
100-17	0.75	1.50				
100-18	0.75	1.50	2.25	3.00	3.75	4.50
100-19	0.75	1.50	2.25	3.00	3.75	4.50

4.4.1 Testfeldbetrieb

Der Testfeldbetrieb wurde am 29.10.2022 aufgenommen. Dabei wurden zunächst die Referenzlanze, die Heizlanze mit Luftinjektion und die schräg eingebaute Lanze in Betrieb genommen. Der Heizbetrieb erfolgte kontinuierlich über 24h und wurde am 07.12.2022 für die Heizlanze mit Luftinjektion und die Schräglanze beendet. Am 29.12.2022 wurde die segmentierte Heizlanze in Betrieb genommen und bis zum 15.02.2023 getestet. Am 15.02.2023 wurde der Testfeldbetrieb beendet.

4.4.2 Temperaturdaten

Segmentierte Lanze

Die Temperaturentwicklung der segmentierten Lanze zum Aufheizen diskreter Bodenschichten und die gegenübergestellten Temperaturen der Referenzlanze sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Die Zielstellung des Testversuches war zu zeigen, dass eine segmentierte Heizlanze unter maximalen Betriebsbedingungen (für diesen Heizlanzentyp 475°C) funktionsfähig ist. Die Funktionsfähigkeit bezog sich auf thermische Beanspruchung der Verbindungen zwischen den Segmenten sowie der Signal- und Energieversorgungskabel. Daher wurden alle drei Heizlanzensegmente mit der Höchsttemperatur betrieben (Stresstest).

Abbildung 176 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 0,66 m

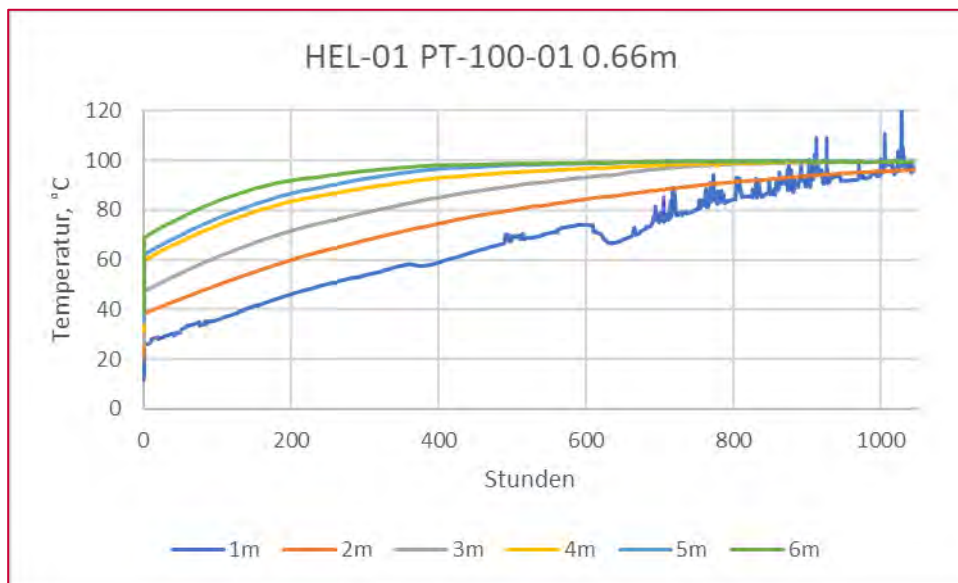
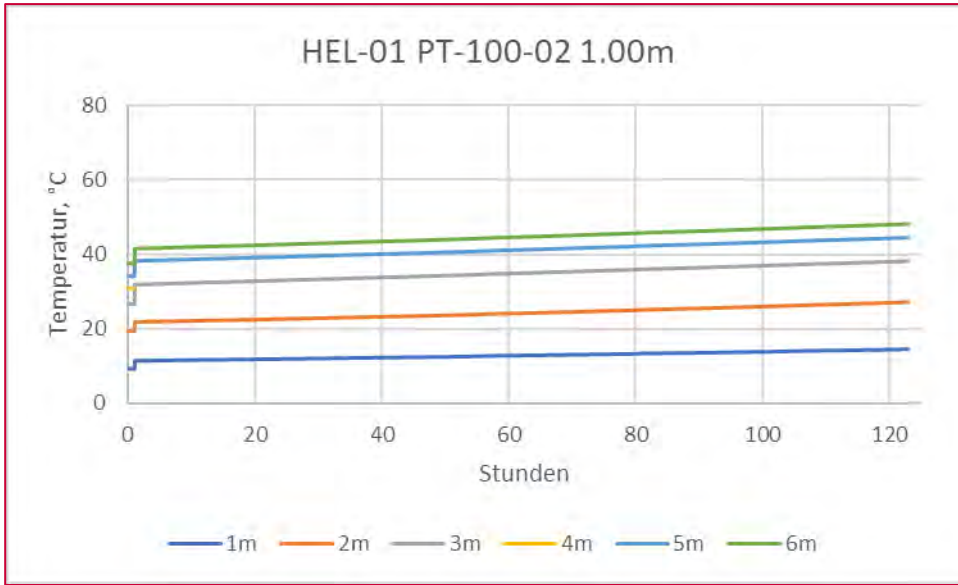


Abbildung 177 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,00 m



Aufgrund eines technischen Defekts am Panel zur Datenübertragung nach 1400 Betriebsstunden worden am Monitoringbrunnen PT-100-02 keine Daten mehr erfasst. Dieser Defekt konnte während des Testbetriebes nicht behoben werden.

Abbildung 178 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,33 m

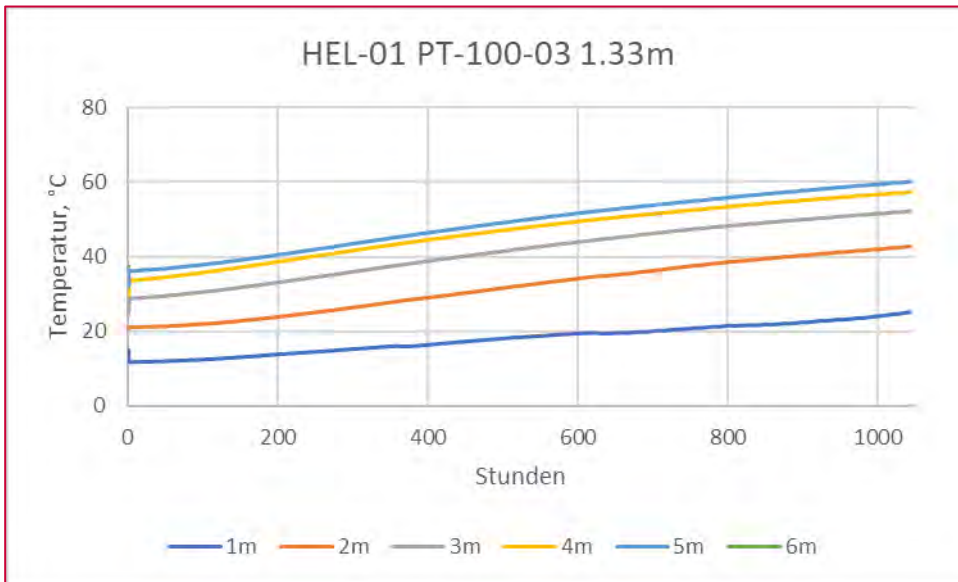
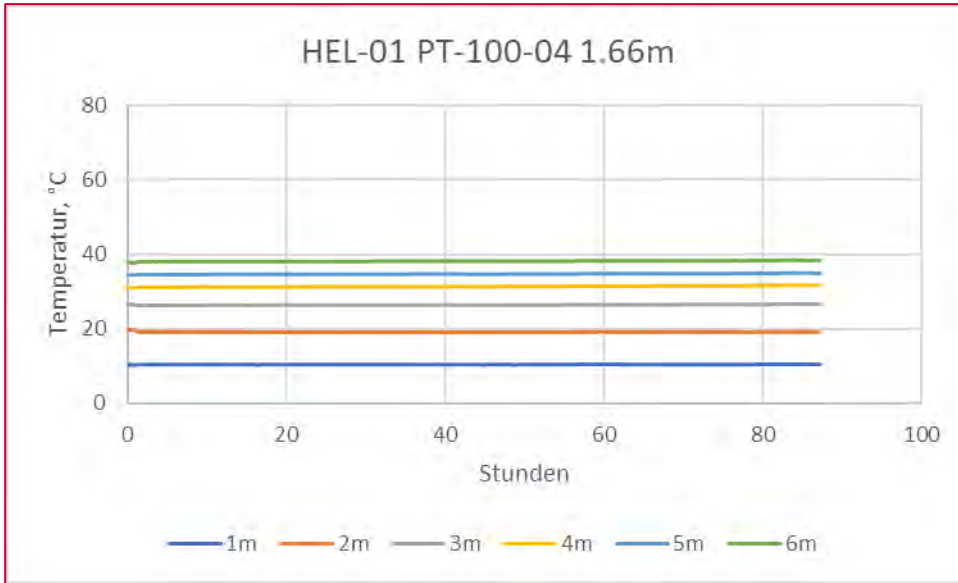
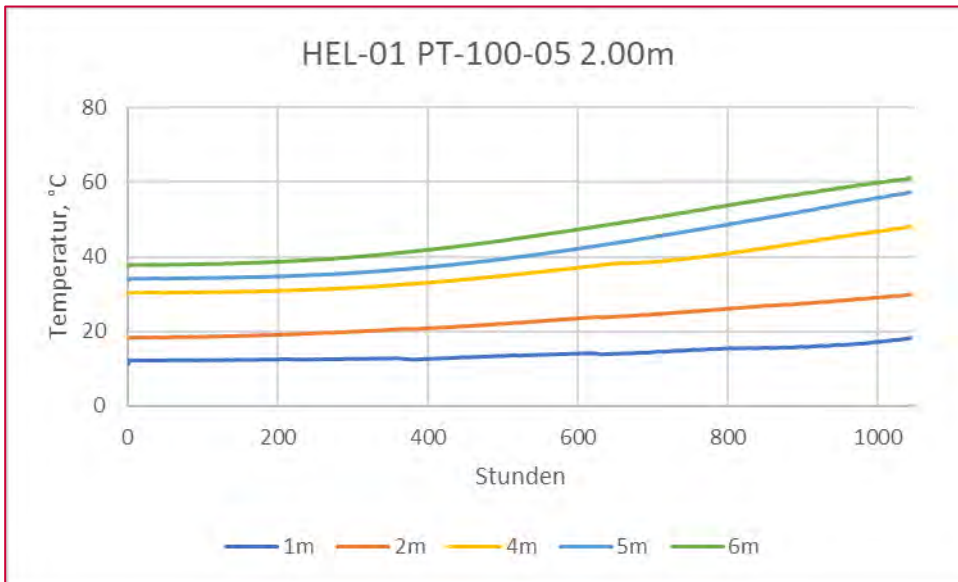


Abbildung 179 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,66 m



Nach 1,000 Betriebsstunden trat ein Defekt bei der Datenerfassung am Panel zur Datenübertragung auf. Dieser Defekt konnte während des Testbetriebes nicht behoben werden.

Abbildung 180 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 2,00 m



Heizlanze mit Luftinjektion

In den folgenden Abbildungen wird der tiefenhorizontierte Aufheizverlauf (1 m – 6 m uGOK) im Bodenkörper beim Betrieb der Heizlanze mit gleichzeitiger Luftinjektion gezeigt und dem Temperaturverlauf der Referenzlanze (Heizlanze in Standardausführung) gegenübergestellt. Die Temperaturen wurden lateral von der Heizlanze versetzt an fünf verschiedenen Lagepunkten gemessen.

Dieser Heizlanzentyp wurde mit 475°C betrieben. Die Luftzufuhr mit 200 L/min. bei 2 bar wurde zu Beginn der Heizphase eingeschaltet.

Die Zielstellung dieses Testversuches war zu zeigen, dass die gleichzeitige Injektion von Luft den Aufheizprozess des Bodenkörpers beschleunigt und zu einer Erhöhung der thermischen Reichweite führt.

Abbildung 181 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 0,66 m

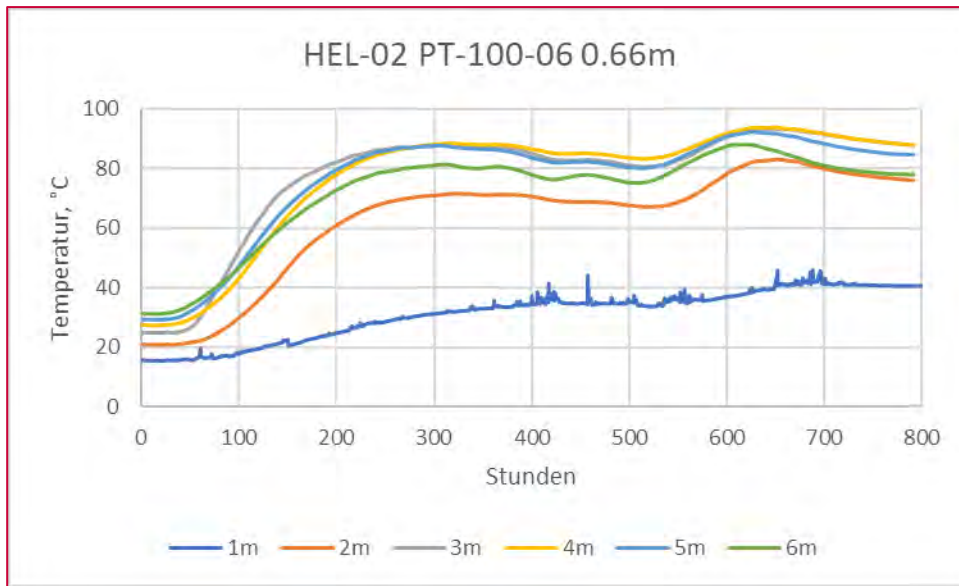


Abbildung 182 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 0 66 m

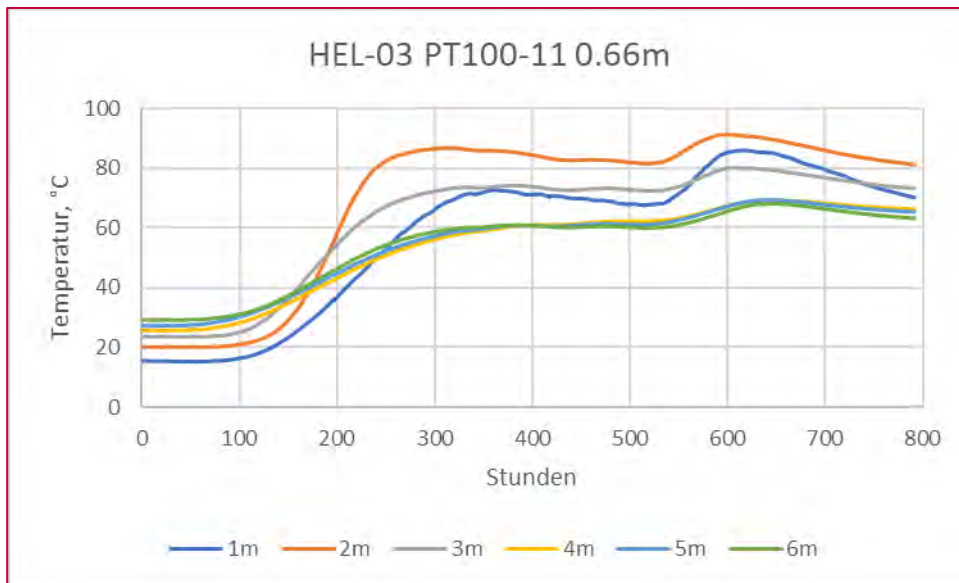


Abbildung 183 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 1,00 m

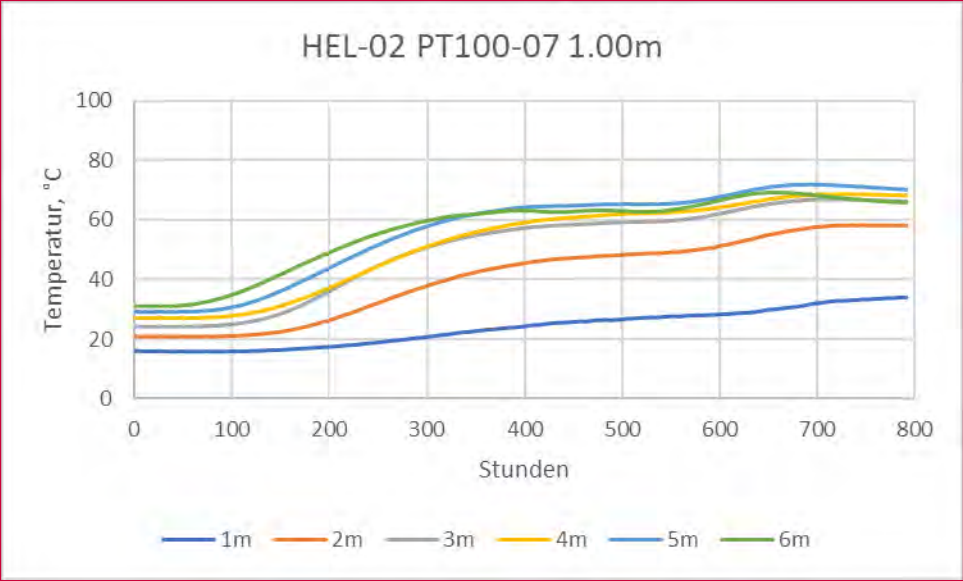


Abbildung 184 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,00 m

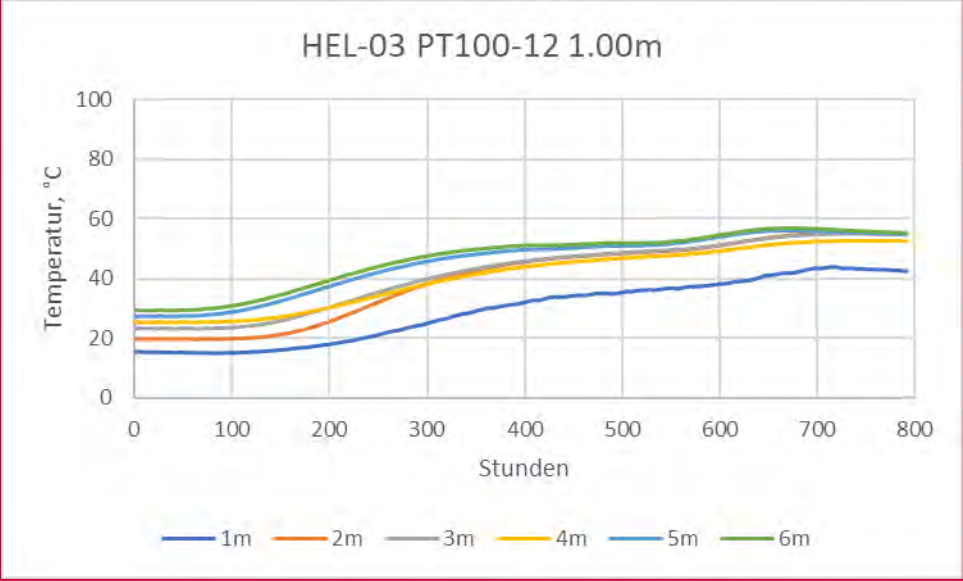


Abbildung 185 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 1,33 m

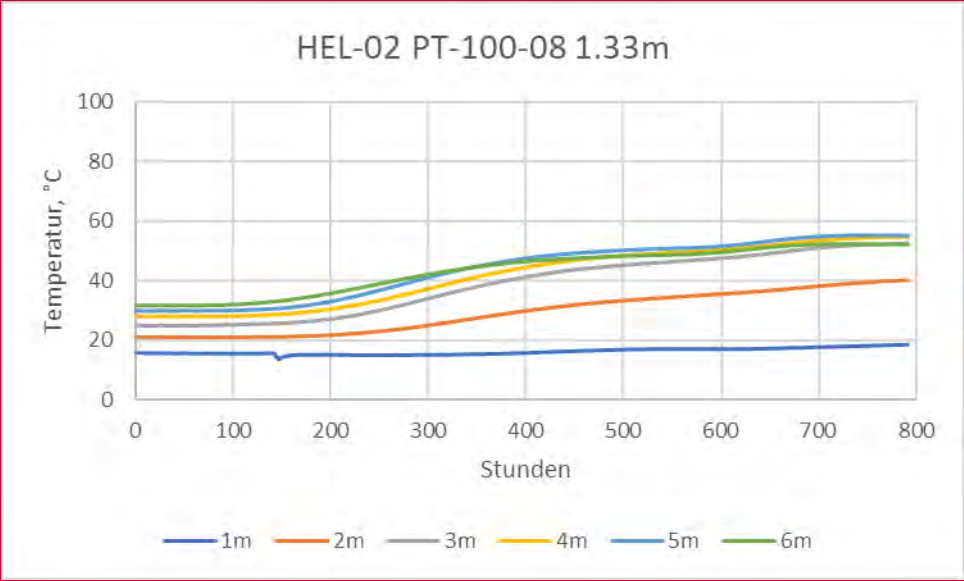


Abbildung 186 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,33 m

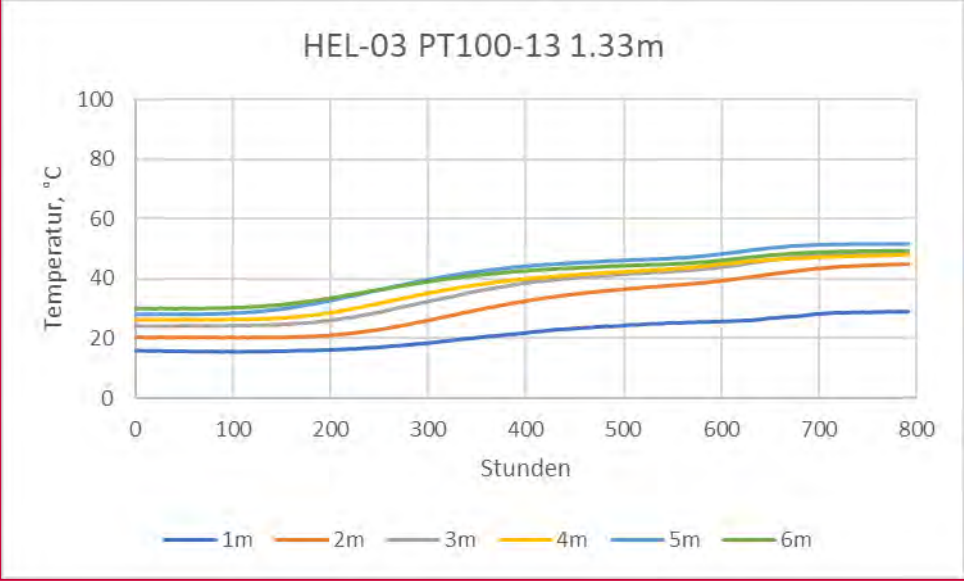


Abbildung 187 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 1,66 m

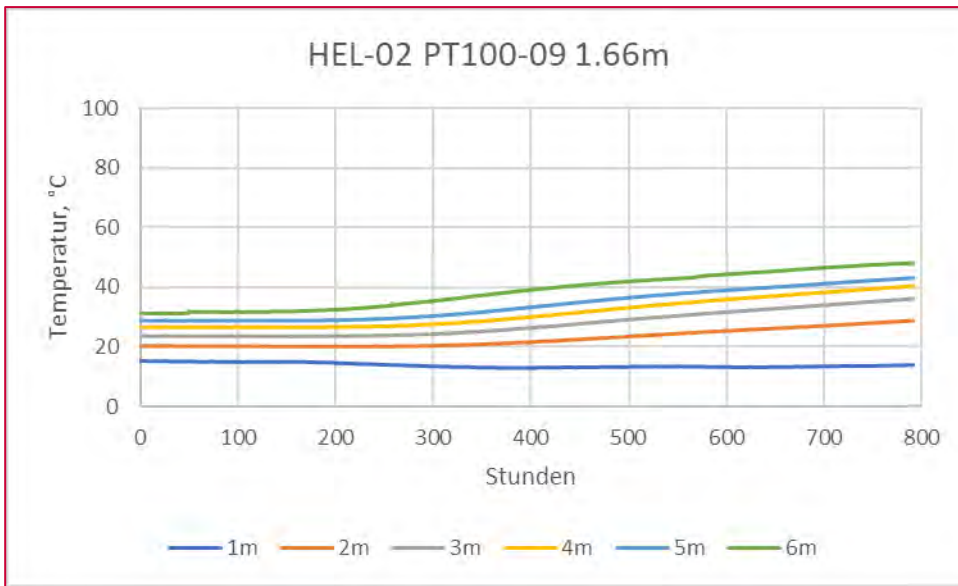


Abbildung 188 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,66 m

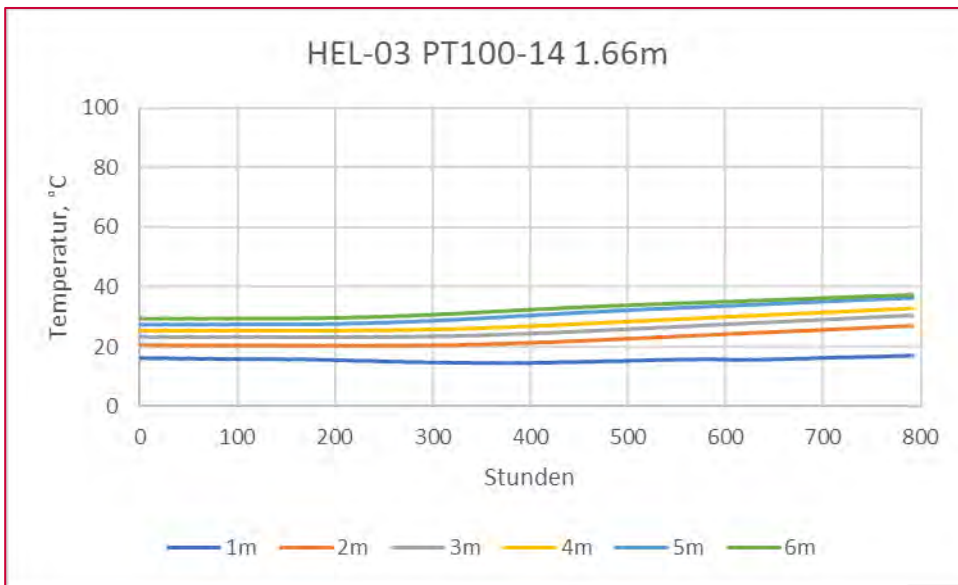


Abbildung 189 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 2,00 m

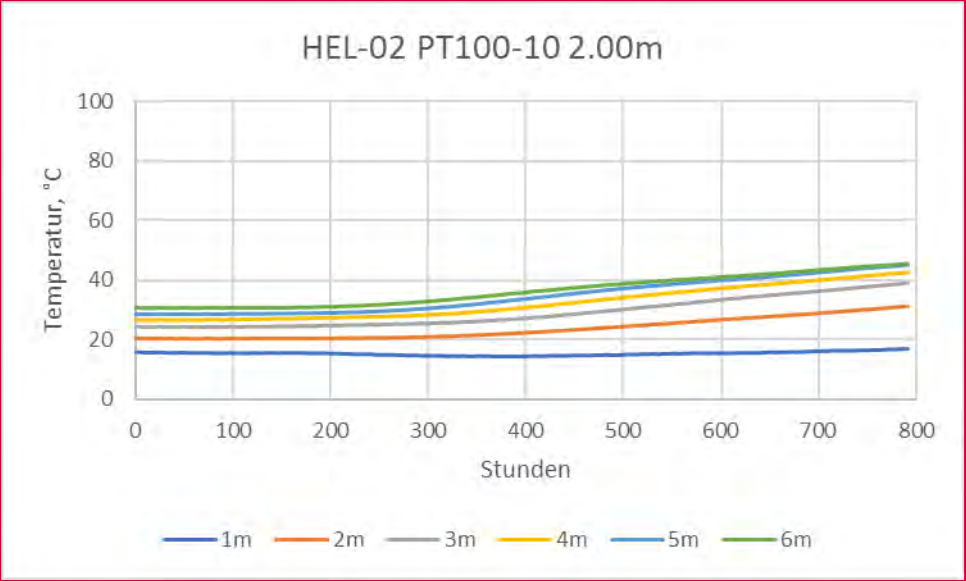
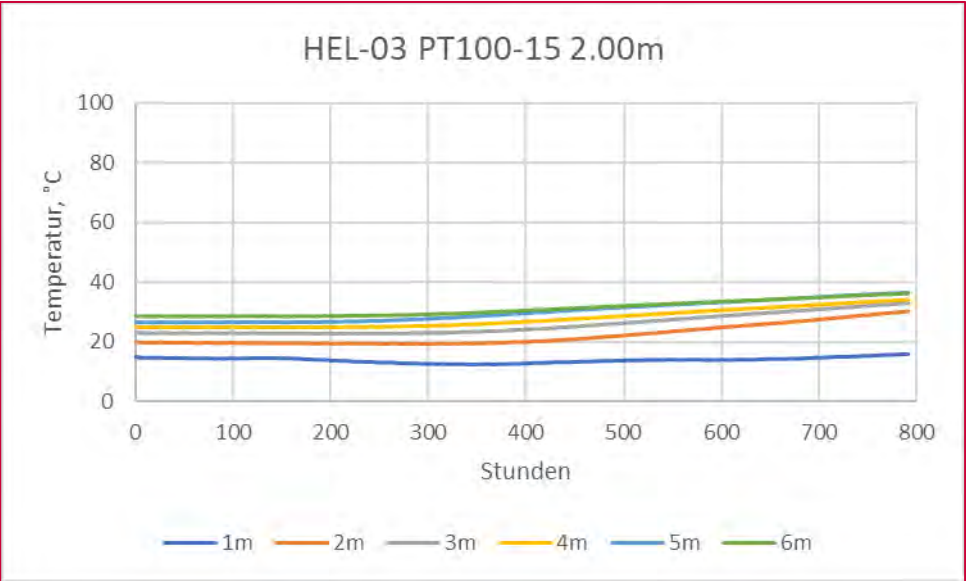


Abbildung 190 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 2,00 m



Heizlanze im Schrägverbau

Die schräg eingebaute Heizlanze wurde mit 475°C betrieben. Die Temperaturdaten wurden direkt über der Heizlanze an zwei Stellen mit drei bzw. zwei Temperatursensoren sowie jeweils rechts- und linksseitig von der Heizlanze gemessen in sechs Tiefenhorizonten gemessen. Bei den direkt über der Heizlanze installierten Temperatursensoren betrug der Abstand zwischen dem untersten Sensor und der Heizlanze 0,75 m.

Die Zielstellung dieses Testversuches lag darin, das von einer Heizlanze erzeugte Temperaturprofil im Bodenkörper zu ermitteln, die mit einer Neigung von 20° verbaut wurde. Den folgenden Abbildungen sind die Temperaturprofile, abhängig von der Tiefenlage der Temperatursensoren, von zwei Messstellen direkt über der Heizfläche der Heizlanze sowie von zwei Messstelle, die lateral zur Heizlanze versetzt eingerichtet wurden.

Abbildung 191 Schräglanze Tiefenprofil 1; Abstand zur Heizlanze: 0,00 m

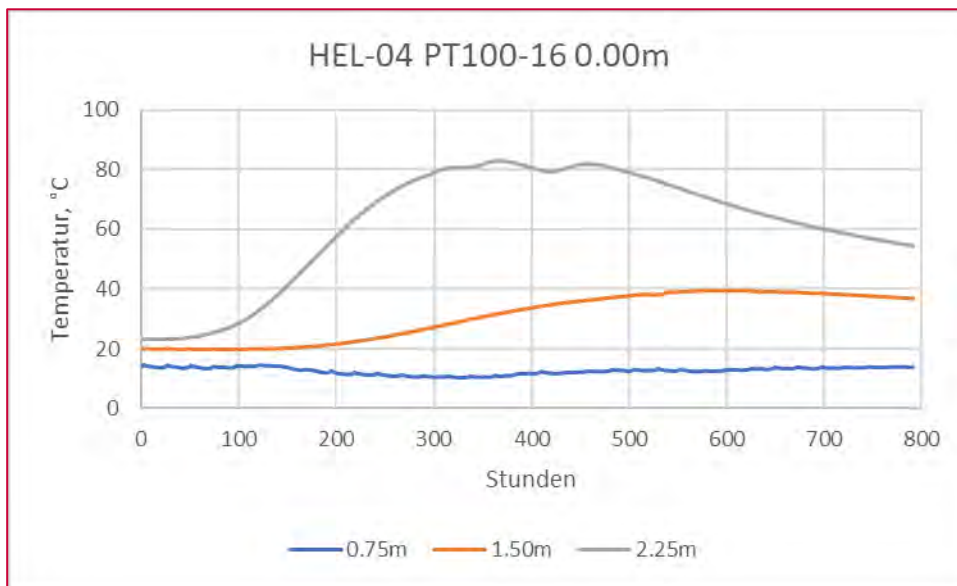
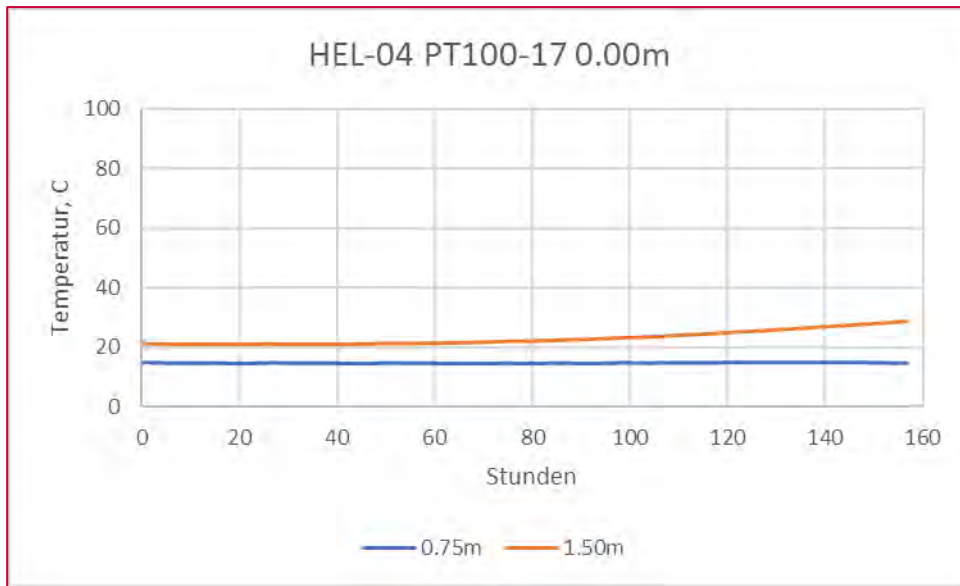


Abbildung 192 Schräglanze Tiefenprofil 2; Abstand zur Heizlanze: 0,00 m



Nach 475 Betriebsstunden fielen beide Temperatursensoren an der PT-100-17 aus und konnten während des Betriebes nicht ersetzt werden.

Abbildung 193 Schräglanze Tiefenprofil lateral 1,50 m versetzt

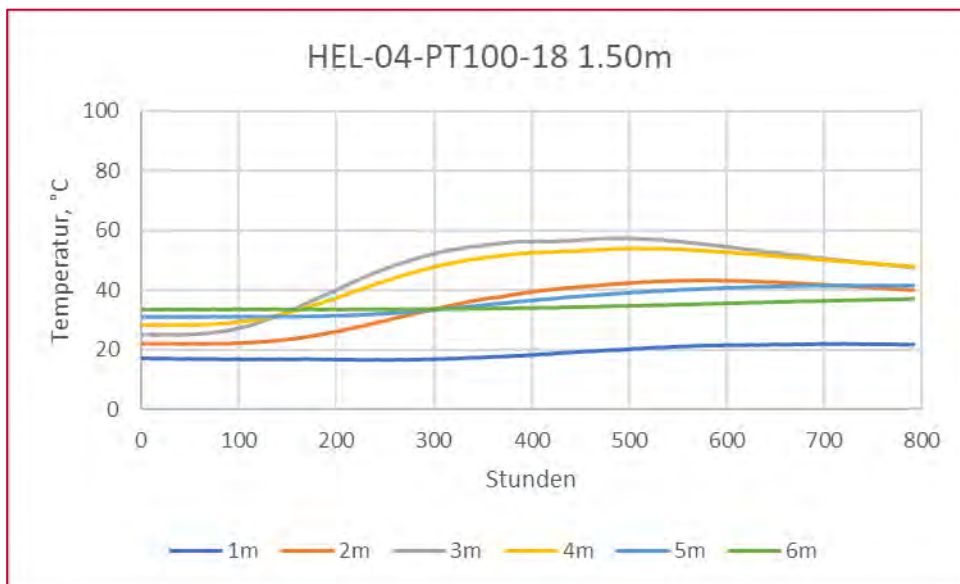
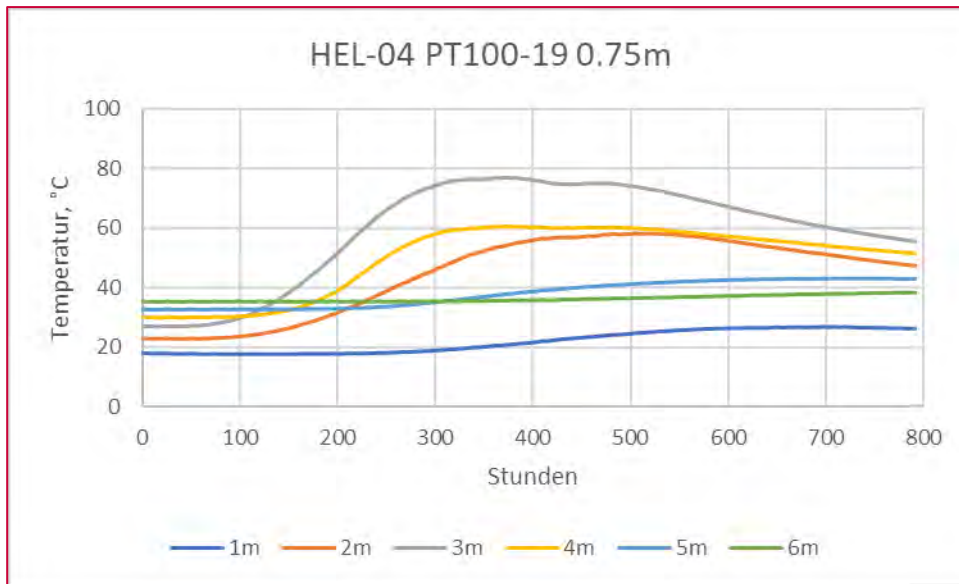


Abbildung 194 Schräglanze Tiefenprofil lateral 0,75 m versetzt



4.4.3 Auswertung der Testfelddaten

Segmentierte Heizlanze

Die Heizlanze mit der getrennten Aufheizung in drei Segmenten (Heizfläche je Segment: 2,50 m) wurde in den Feldtests mit einer Temperatur von 475°C in jedem Segment betrieben. Dieses Heizregime führte zu einer gleichförmigen Temperaturentwicklung in allen von den drei Segmenten erwärmten Bodenhorizonten. Am deutlichsten trat dieser Effekt in 0,66 m Entfernung auf, wo innerhalb 34 Tagen in allen Bodenhorizonten eine Temperatur von ca. 100°C erreicht werden konnte. Dadurch wurde gezeigt, dass die segmentierte Heizlanze hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit (thermische Belastung der Verbindungen zwischen den Heizlanzensegmenten sowie der Signal- und Energieversorgungskabel) unter Maximalbedingungen für die diskrete Aufheizung unterschiedlicher Bodenhorizonte geeignet ist.

Heizlanze mit Luftinjektion

Im Verlauf der Tiefenprofile lässt sich deutlich der Einfluss der Luftinjektion ab 2,00 m uGOK auf die Temperaturentwicklung erkennen. Während das Profil des Temperatursensors in 1,00 m Tiefe bei Referenzlanze und Heizlanze mit Luftinjektion annähernd identisch sind, unterscheiden sich Profile der tiefer liegenden Temperatursensoren. Eine Ausnahme hiervon ist der Temperaturverlauf in 1,00 m uGOK im Abstand von 0,66 m, wo die Temperaturentwicklung bei der Referenzlanze atypisch hoch verläuft. An allen anderen Messpunkten in 1,00 m uGOK wurden die niedrigsten Temperaturen und Temperaturgradienten ermittelt, da Grenze zur Geländeoberkante der Wärmeverlust naturgemäß an höchsten ist. Wahrscheinlich lag ein Fehler bei der Installation des Temperatursensors vor, der entweder nicht in der korrekten Tiefe oder – und eher wahrscheinlich – während des Testbetriebes aus seiner Position gerutscht ist.

Die Aufheizphase wurde durch die Injektion vorgewärmter Frischluft deutlich verkürzt. Im Vergleich zur Referenzlanze wurde in 0,66 m Entfernung der Temperaturbereich von 80°C bereits nach 7 Tagen und damit 21 Tage früher erreicht. Beim Betrieb der Heizlanze mit Luftinjektion wurden im Testbetrieb immer höhere mittleren Temperaturen über alle Tiefenhorizonte zu vergleichbaren Zeitpunkten und Entfernungen zur Heizlanze ermittelt als die für die Referenzlanze.

Heizlanze im Schrägverbau

Die schräg eingebaute Heizlanze führte zu einer mit der vertikal verbauten Standardheizlanze vergleichbaren Temperaturentwicklung (Maximum: ca. 80 °C) im Bereich direkt oberhalb der der Heizfläche (0,75 m Entfernung von der Heizfläche, Tiefe: 2,25 m). Die Standardheizlanze erzeugt bei 2 m Tiefe und im Abstand von 0,66 m eine Temperatur von etwas mehr als 80 °C. Der nahe der Geländeoberkante gelegene Bodenhorizont wird bedingt durch die zunehmende Entfernung von der Heizlanzenoberfläche nur geringfügig aufgeheizt.

Auch lateral zur Heizlanze versetzt wurden in Abständen von 0,75 m und 1,50 m bis in ca. 4,00 m Tiefe deutliche Temperaturzunahmen erreicht. Die Heizfläche der Schrägglanze reicht von ca. 2,20 m uGOK bis 4,00 m uGOK, so dass die beobachtete Temperaturentwicklung in den Horizonten 2,00 m bis 4,00 m uGOK zu erwarten war.

4.5 Modellierung des Feldversuchs mit Luftinjektion

Für den Feldversuch wurden im Gegensatz zu den Versuchen im Technikumsmaßstab Düsen zur Luftinjektion, die an den Heizlanzen befestigt waren, für den erzwungenen konvektiven Transport in verschiedenen Tiefen im Boden installiert. Des Weiteren fand keine aktive Absaugung statt. Um das entstehende Strömungsfeld und damit die Transporteffekte abzubilden, wurde der Feldversuch modelliert. Sämtliche Stoffwerte hierfür wurden von den Laboranalysen des Bodens für die Versuchen im Technikumsmaßstab übernommen.

4.5.1 Modellbeschreibung

Das Modell wurde vom detaillierten Modell zur Modellierung des Umfelds der Heizlanzen abgeleitet. Hierbei wurde die Modellierung der Chemie und der Physik des Bodens übernommen. Dieses Modell verfügt jedoch nur über eine Region, jene des Bodens. Dieser wird als reaktives Festbett mittels einer Euler Fluidphase und einer Euler Feststoffphase beschrieben. Jede Phase besitzt hierbei eine eigene Erhaltungsgleichung für die Energie.

4.5.2 Strömung

Um die Rechenzeit maßgeblich zu reduzieren, wurde für die Strömung ein quasistationärer Ansatz gewählt. Dieser ermöglicht an sich beliebig große Zeitschritte des Strömungsfeldes, jedoch limitieren die konvektiven Terme anderer Gleichungen (Energieerhaltung, Stofferhaltung) die Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl. Diese ist jedoch um den Faktor 6 höher, dies resultiert in einem Sechstel der Rechenzeit. Der Nachteil dieses Ansatzes ist, dass transiente Beschleunigungseffekte ignoriert werden. Diese sind jedoch für die Betrachtung des Bodens vernachlässigbar klein. Die Impulserhaltungsgleichung basiert auf dem Widerstandsterm nach Darcy (1856) und beinhaltet Schwerkrafteffekte, sodass sich folgende Formulierung ergibt:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \rho \vec{u} \vec{u}) + \mu_{mix} F \vec{u} - \varepsilon \rho g = -\operatorname{grad}(p) \varepsilon$$

Die Kontinuitätsgleichung der Gasphase beinhaltet neben der Korrektur für das Lückenvolumen ε einen Quellterm für dem Massentransport der heterogenen Reaktionen Q_{mass} .

$$\operatorname{div}(\varepsilon \rho \vec{u}) = Q_{mass}$$

Der Abgleich zwischen der Impulserhaltung und der Kontinuitätsgleichung erfolgt semiimplizit über den SIMPLE Algorithmus (Caretto et al., 1972).

4.5.3 Energieerhaltung

Die Energieerhaltung für beide Phasen erfolgt transient, wobei die Wärme der Trocknung und Kondensation der Festphase zugerechnet wird. Zugleich erfolgt ein Wärmeübertrag zwischen den beiden Phasen. Dieser wird durch den Wärmeübergangskoeffizient nach Gunn (1978) $\alpha_{g,D}$ sowie der volumenspezifischen Fläche A_V beschrieben. Hierdurch ergibt sich folgende Gleichung für die Energieerhaltung der Festphase:

$$\frac{\partial(\rho_s T_s c p_s)}{\partial t} - \text{div} \left[\frac{\lambda_b}{\rho c p_g} \text{grad}(T_b) \right] = \alpha_{g,p} A_V (T_g - T_s) + r r_{H_2O} H_{V\text{erd}}$$

Für die Gasphase wird des Weiteren der konvektive Wärmetransport berücksichtigt, damit ergibt sich folgende Gleichung:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho T_g c p_g)}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon \rho \vec{u} T_g c p_g) - \text{div} \left[\varepsilon \frac{\lambda_{Eff}}{\rho c p_g} \text{grad}(T_g) \right] = +\alpha_{g,D} A_V (T_s - T_g)$$

4.5.4 Stoffhaltung

Die Stoffhaltungsgleichung der Gasphase wird transient unter Berücksichtigung des Lückenvolumens gelöst. Diese beinhaltet den konvektiven und diffusiven Transport sowie die Quellterme für die heterogenen Reaktionen.

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_g Y_i)}{\partial t} = -\text{div}(\varepsilon \vec{u} \rho_g Y_i) + \text{div}[\varepsilon \rho_g D(T)^{Eff}_{mix,i} \text{grad}(Y_i)] + r r_i$$

Diese Gleichung wird für Sauerstoff, Wasserdampf, Methan und Kohlendioxide gelöst. Der Massenanteil an Stickstoff ergibt sich durch die Kontinuitätsgleichung. Für die Festphase wird nur der Stoffhalt von flüssigem Wasser und der Organik berücksichtigt.

$$\frac{\partial(X_i)}{\partial t} = -r r_i$$

4.5.5 Trocknung

Um die Reaktionsrate der Trocknung und Kondensation zu beschreiben, wurde der Ansatz über die die Abweichung vom Sättigungsdampfdruck gewählt, welcher über die Antoinegleichung beschrieben wird. Die Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten β erfolgt nach der Beziehung von Obot (2010):

$$rr_{H_2O} = A_v \beta \left(\frac{p^* M_{H_2O}}{RT} - Y_{H_2O} \rho_g \right)$$

4.5.6 Pyrolyse

Die Berechnung der Reaktionsraten der Pyrolyse basiert auf dem erweiterten Arrhenius-Ansatz der thermogravimetrischen Analyse. Jedoch erfolgt die Limitierung direkt über den Massenanteil der Organik. Als Bezugstemperatur wird die Temperatur der Festphase T_s verwendet.

$$rr = A e^{-\frac{T_b}{T_s}} \left(\frac{X_{org}}{X_{org,start}} \right)^n$$

Beim ersten Versuch wurde in der Abgasmessung Kohlendioxid und Methan detektiert, jedoch kein Kohlenmonoxid. Dies entspricht der Gleichgewichtszusammensetzung, welche aus 0,753 Massenprozent Kohlenmonoxid und 0,247 Massenprozent Methan besteht.

4.5.7 Geometrie

Um den umgebenden Boden der Heizlanze mit Luftinjektion abzubilden, wurde ein Zylinder mit einer Höhe und einem Durchmesser von 10 m gewählt. In diesem wurde die Heizlanze mittig eingebracht (Abbildung 195). Der Boden und Mantel des Zylinders wurden in einer Gruppe mit der Bezeichnung „FarField“ zusammengefasst. Der Deckel, welcher die Oberfläche des Bodens darstellt, wird als „Top“ bezeichnet. Die Beschriftung der Achsen ist im Meter dargestellt

Die Geometrie der Lanze wurde aus der Konstruktionszeichnung für Hüllrohr mit Luftinjektion der GMRS übernommen. Das Hüllrohr verfügt über 6 Düsen zur Luftinjektion (Abbildung 196, blau), welche paarweise in einer Tiefe von 2 m, 4 m und 6 m angebracht sind. Diese sind in eine Gruppe mit der Bezeichnung „Inlet“ zusammengefasst. Die Oberfläche der Heizlanze inklusive der Rohre wird mit der Gruppe „Lanze“ beschrieben.

Je zwei Düsen befinden sich 2 m (a.), 4 m (b.) und 6 m tief im Boden (c.). Diese Abbildungen wurden normal zur X-Achse erstellt.

Abbildung 195 Darstellung der Gesamtgeometrie zur Modellierung des Feldversuchs

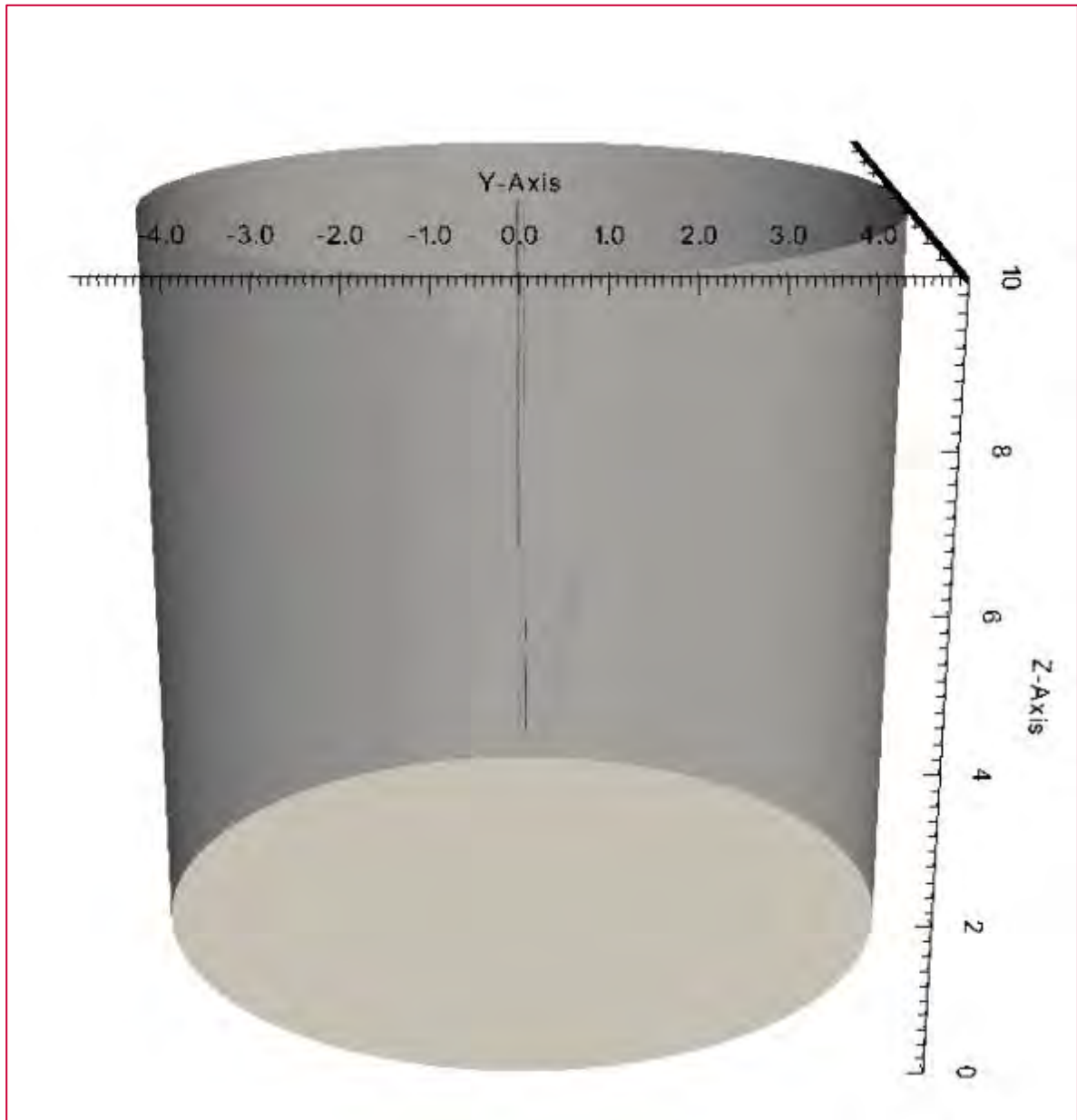
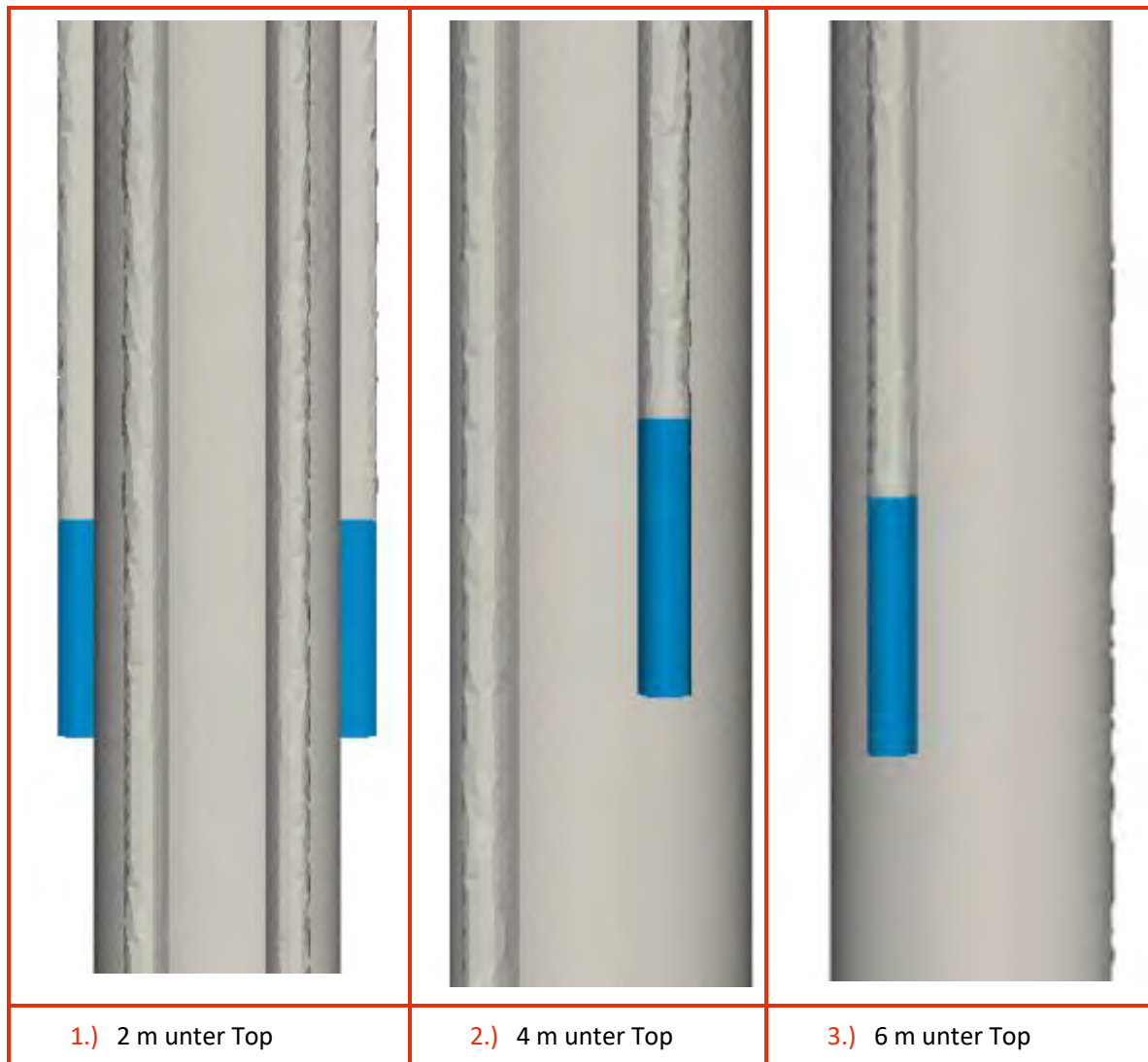


Abbildung 196 Darstellung der Luftinjektion



4.5.8 Rechennetz

Auf Basis dieser Geometrie wurde ein Polyeder basiertes Rechennetz erstellt. Dieses verfügt über 216.987 Hexaeder und 2.021.116 Polyeder.

4.5.9 Randbedingungen

Anfangsbedingungen

Zu Beginn der Rechnung besitzt der Boden sowie die Bodenluft eine Temperatur von 283 K (10 °C). Der Wassergehalt des Bodens beträgt 218 kg/m³ und der Organikgehalt 41 kg/m³. Der Absolutdruck wurde auf 100.000 Pa gesetzt. Die Bodenluft besteht aus 23 %-m. Sauerstoff und 77 %-m. Stickstoff.

Randbedingungen „FarField“

Zur Beschreibung der Geschwindigkeit und des Drucks wurde der Ansatz einer reibungsfreien Wand verwendet. Hierbei ist der Gradient des Drucks, sowie der Gradient der nicht normalen Geschwindigkeitskomponenten null. Der Gradient der beiden Temperaturen, sowie aller Substanzen wurde ebenfalls auf null gesetzt, damit alle diffusiven Flüsse unterbunden werden.

Randbedingungen „Top“

Diese Randbedingung stellt die Oberfläche des Bodens zu Atmosphäre da. Hier wurde ein fixer Druck von 100 000 Pa vorgegeben und der Gradient der Geschwindigkeit auf null gesetzt. Der Gradient der Temperatur des Bodens wurde ebenfalls auf null gesetzt. Zur Beschreibung der Temperatur der Bodenluft wurde eine Funktion implementiert, welche im Fall des Ausströmens den Gradienten der Temperatur auf null setzt. Strömt Luft ein, besitzt diese eine Temperatur von 283 K (10 °C). Analog wurde auch die chemische Zusammensetzung der Bodenluft beschrieben. Im ausströmenden Fall sind alle Gradienten null, im einströmenden Fall besteht die Luft aus 23 %-m. Sauerstoff und 77 %-m. Stickstoff.

Randbedingungen „Lanze“

Die Heizlanze wurde als Wand modelliert. An der Oberfläche ist sowohl der Druckgradient als auch die Geschwindigkeit null. Der Gradient für alle chemischen Substanzen ist ebenfalls null. Die Temperatur der beiden Phasen an der Lanze beträgt 698 K (425 °C).

Randbedingungen „Inlet“

Zur Beschreibung der Strömung wurde ein Massflow Inlet verwendet. Hier wird der Massenstrom aller 6 Düsen zur Luftinjektion mit 0,0466 kg/s fixiert. Dieser teilt sich auf alle Flächen des Inlets so auf, dass diese einen identen Druck besitzen. Die Temperatur der einströmenden Luft beträgt 673 K (400 °C). Die Zusammensetzung wurde mit 23 %-m. Sauerstoff und 77 %-m. Stickstoff fixiert.

4.5.10 Simulationsergebnisse

Strömungsfeld

Das Strömungsfeld der Bodenluft bewegt sich zur Oberfläche. Hierbei kommt es aufgrund der Kontinuität zu einer Verdrängung der Bodenluft bei tieferen Injektionen (Abbildung 197). Dies wird deutlich, wenn man die Bahnlinien für die einzelnen Injektionstiefen getrennt betrachtet (Abbildungen 198 bis 200). Wird die Luft in 2 m Tiefe injiziert, bildet sich eine direkte Strömung zur Oberfläche aus. In 4 m sieht man ein ähnliches Bild, wobei ein innerer Raum von der Injektion in 2 m Tiefe in Anspruch genommen wird. Dasselbe ist für die Injektion in 6 m Tiefe zu beobachten. Das Ausbreiten der Bahnlinien nach unten ist auf die beschränkte Größe des Rechengebiets zurückzuführen. Dies sollte in der Realität nicht auftreten. Die höchsten Geschwindigkeiten von 0,68 m/s treten direkt an der Düse auf. Durch die radiale Ausbreitung kommt es zu einer schnellen Abnahme der Geschwindigkeit (Abbildung 201). Der Nahbereich stellt durch den linearen Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Druckverlust nach Darcy (1856) auch den Bereich des höchsten Druckverlusts da. Nach einer Stunde beträgt der Absolutdruck an den Düsen 3,2 bar. Somit beträgt der gesamte Druckverlust zur Oberfläche 2,2 bar. Durch die Trocknung des Bodens und die Pyrolyse im Nahbereich der Lanze nimmt dieser nach 10 Tagen auf einen Absolutdruck von 2,8 bar bzw. 1,8 bar Druckdifferenz zur Oberfläche ab. In Abbildung 202 sind die Bahnlinien nach 10 Tagen dargestellt. Hier ist keine signifikante Änderung zu erkennen.

Abbildung 197 Bahnlinien der Bodenluft, eingefärbt durch die Geschwindigkeit für alle Injektionen nach 1 Stunde

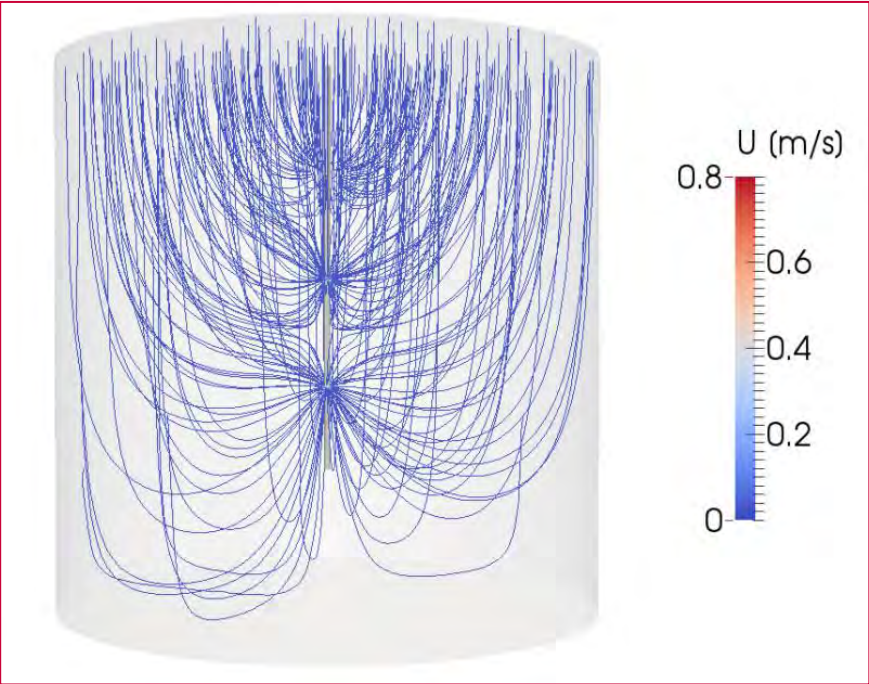


Abbildung 198 Bahnlinien der Bodenluft, eingefärbt durch die Geschwindigkeit für die Injektion in 2 m Tiefe nach 1 Stunde

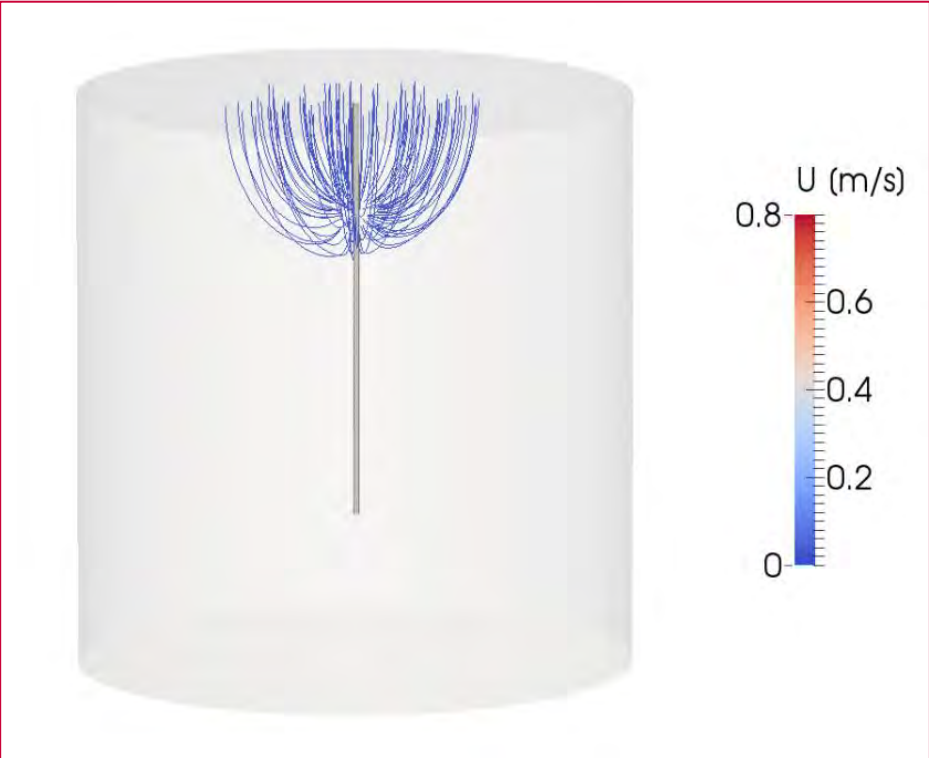


Abbildung 199 Bahnlinien der Bodenluft, eingefärbt durch die Geschwindigkeit für die Injektion in 4 m Tiefe nach 1 Stunde

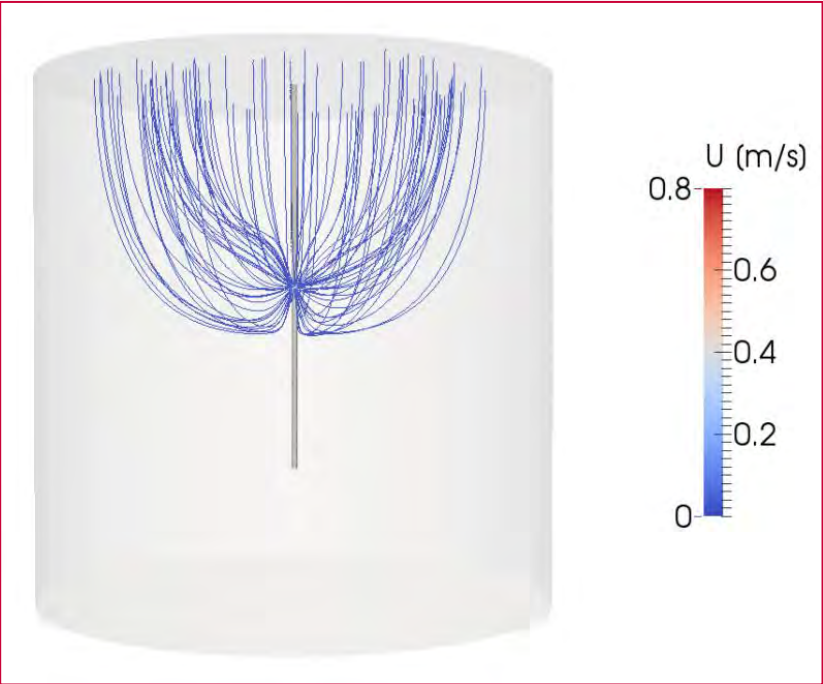


Abbildung 200 Bahnlinien der Bodenluft, eingefärbt durch die Geschwindigkeit für die Injektion in 6 m Tiefe nach 1 Stunde

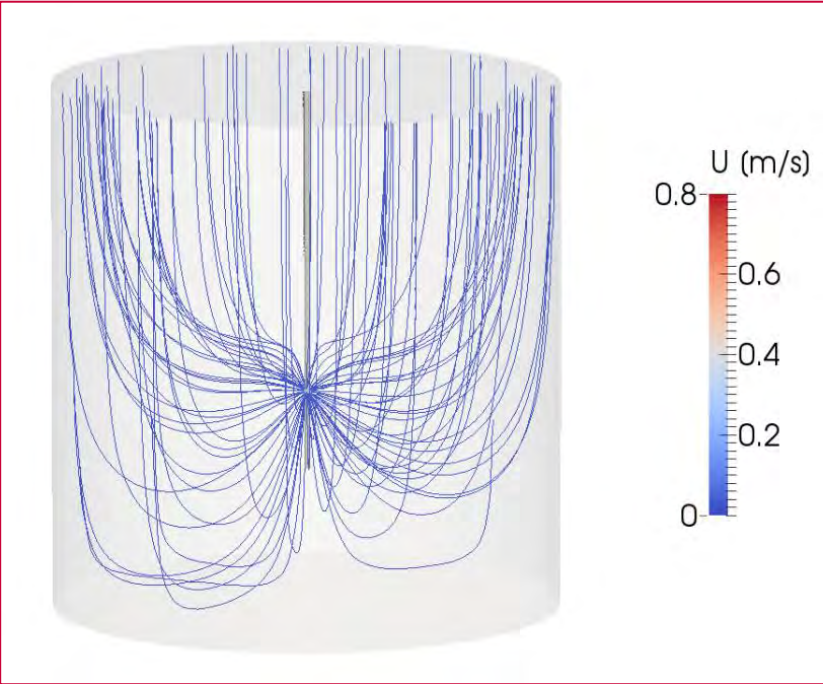


Abbildung 201 Geschwindigkeitsfeld im Schnitt durch Injektion in 2 m Tiefe

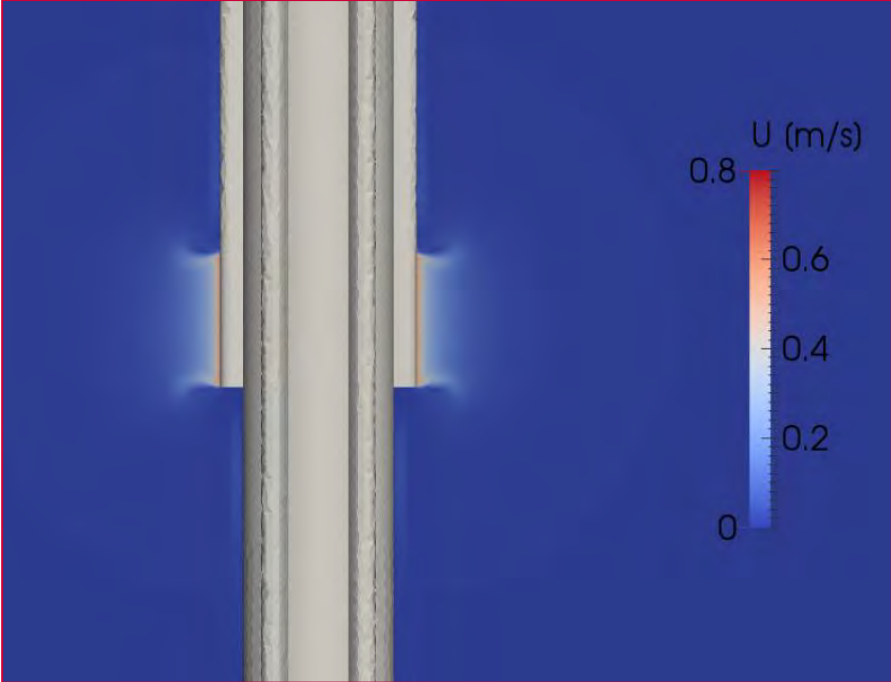
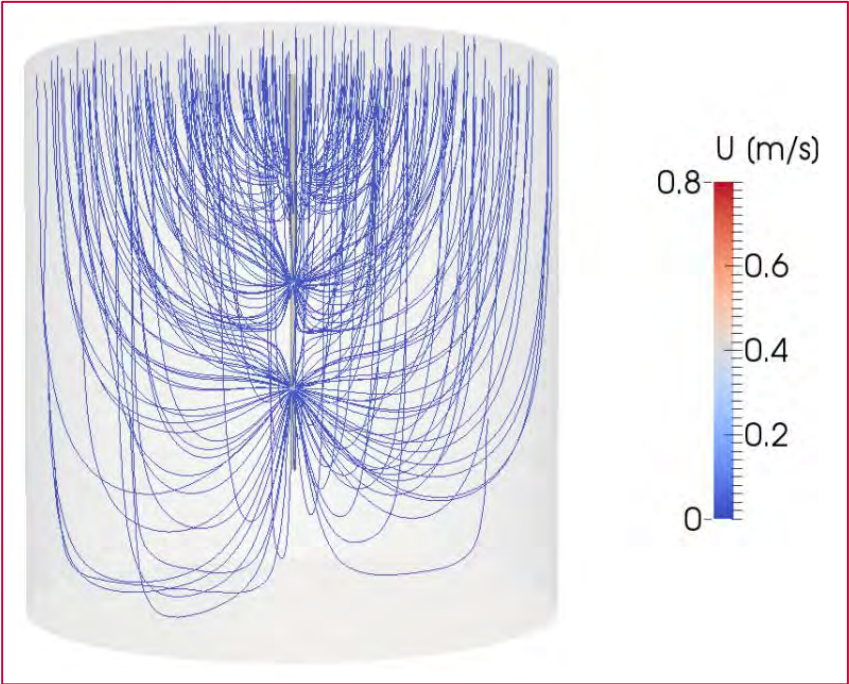


Abbildung 202 Bahnlinien der Bodenluft, eingefärbt durch die Geschwindigkeit für alle Injektion nach 10 Tagen



Temperatur

Die Temperatur wird für jede Phase einzeln gelöst, so gibt es eine Temperatur der Bodenluft (Abbildung 204) und eine Temperatur des Bodens (Abbildung 203). Zwischen den beiden Phasen findet eine Wärmeübertragung statt. Hierbei wird die warme injizierte Luft abgekühlt und erwärmt den Boden. Dies führt zu Ausbuchtungen im Temperaturfeld des Bodens. Nach einer Stunde ist der Boden nur in einer dünnen Schicht um die Lanze erwärmt (Abbildung 203, Abbildung 205). Der konvektive Wärmeeintrag durch die Luftinjektion zeigt eine Auslenkung des Temperaturfelds bei 100 °C und 200 °C. Nach 10 Stunden hat sich der warme Bereich des Bodens um die Lanze erweitert, aber es kommt zu keiner maßgeblichen Vergrößerung des erwärmten Gebiets durch die Konvektion (Abbildung 206). Nach 10 Tagen zeigt sich die Dominanz des konvektiven Wärmetransports (Abbildung 207). Durch die starke getrocknete Schicht des Bodens, welche eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt, wird die Wärmeleitung stark behindert. Dies trifft jedoch nicht auf die Konvektion zu. Durch den konvektiven Wärmetransport bilden sich große warme Bereiche um die Injektionen aus.

Abbildung 203 Temperatur des Bodens nach 1 Stunde an der Injektion in 2 m Tiefe

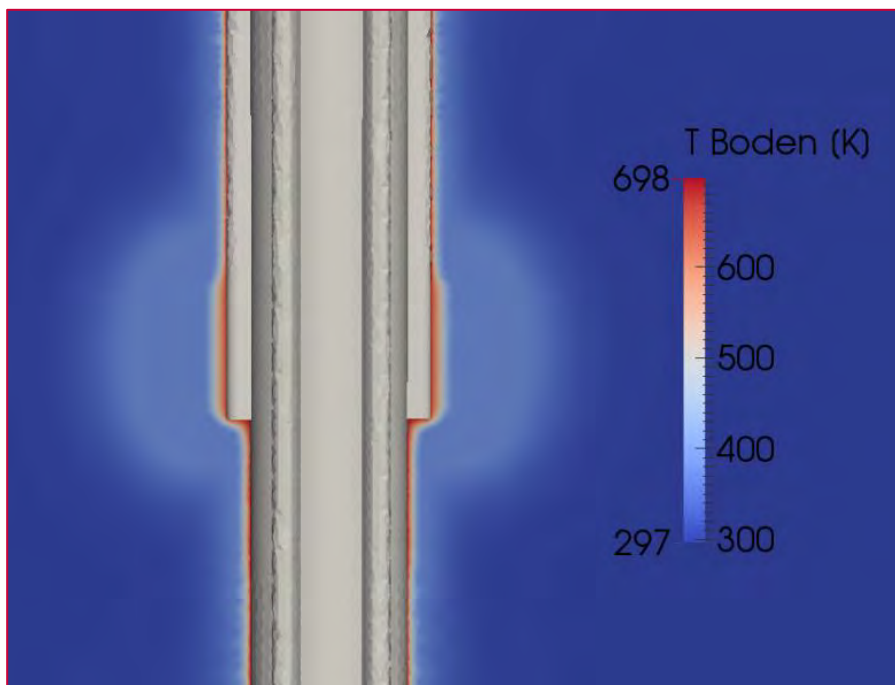


Abbildung 204 Temperatur der Bodenluft nach 1 Stunde an der Injektion in 2 m Tiefe

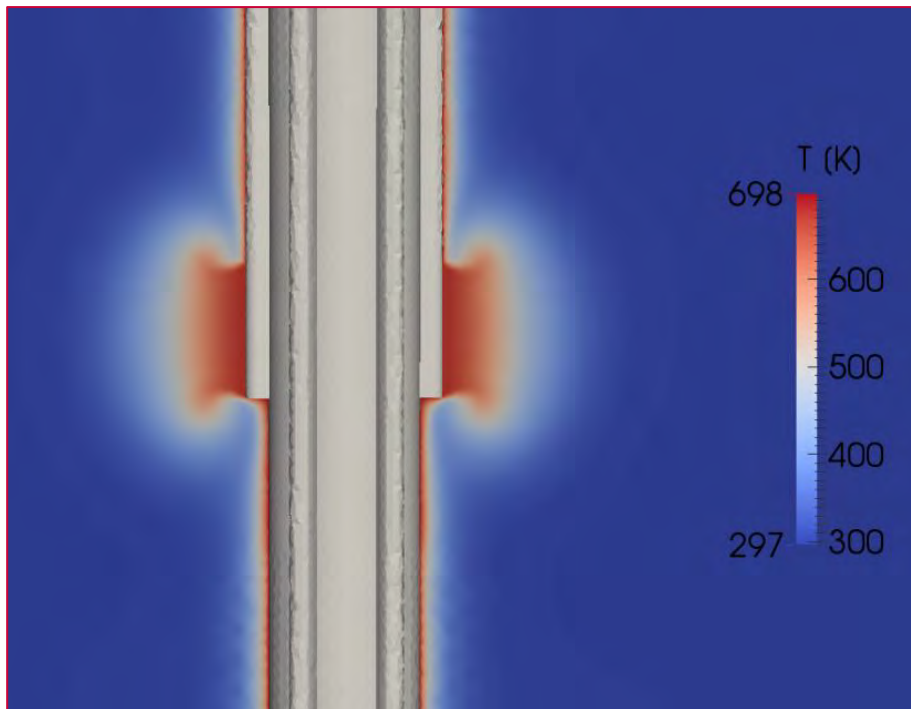
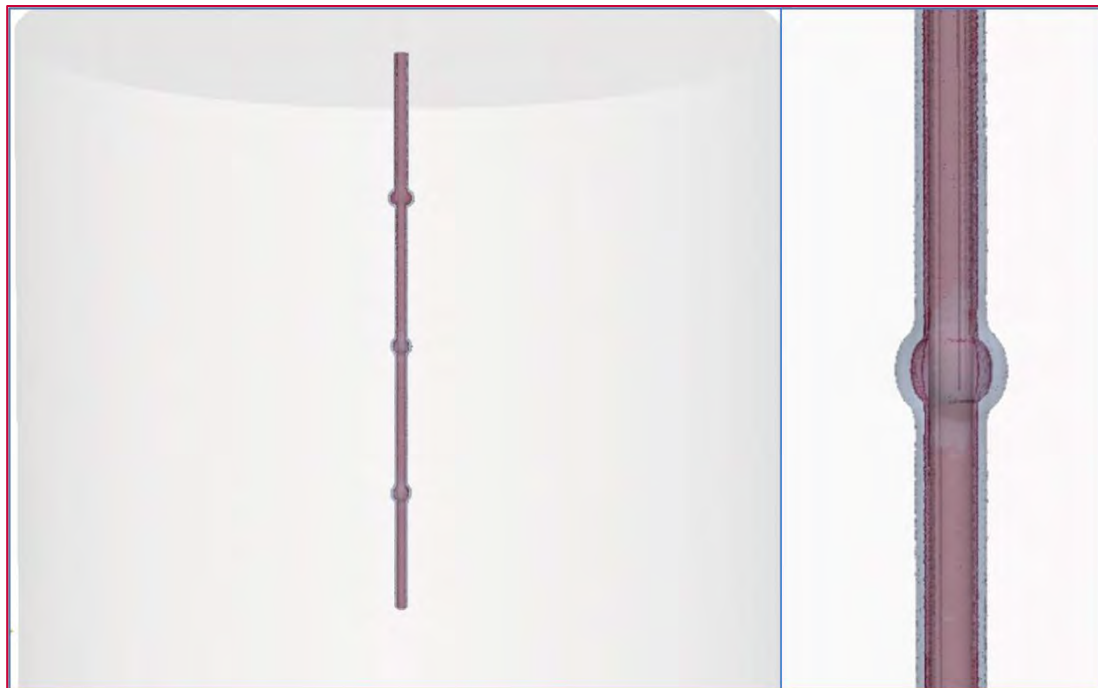
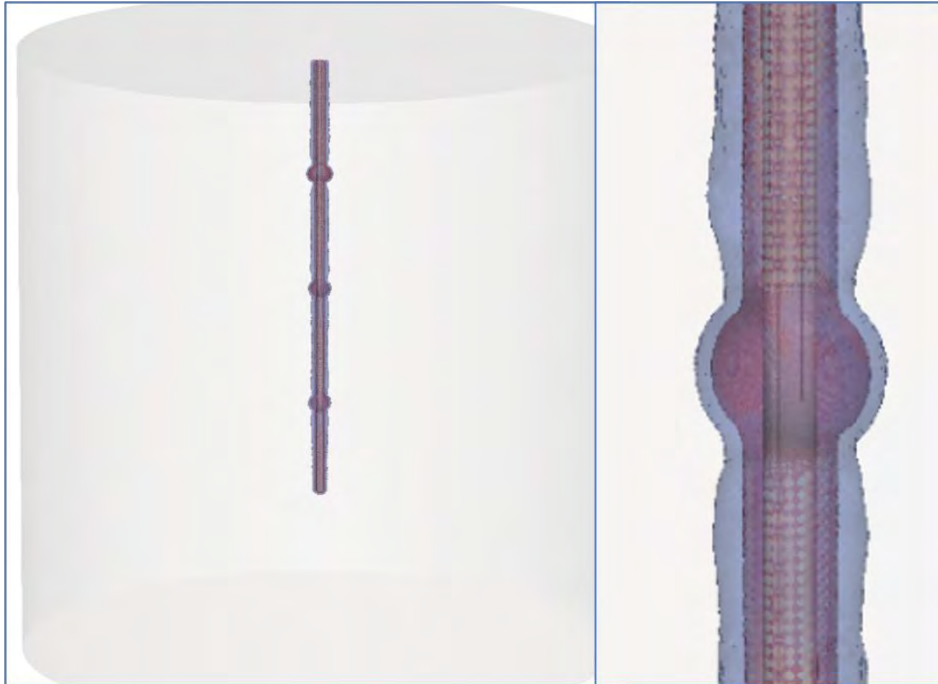


Abbildung 205 Darstellung der Temperaturverteilung um die Lanze nach einer Stunde



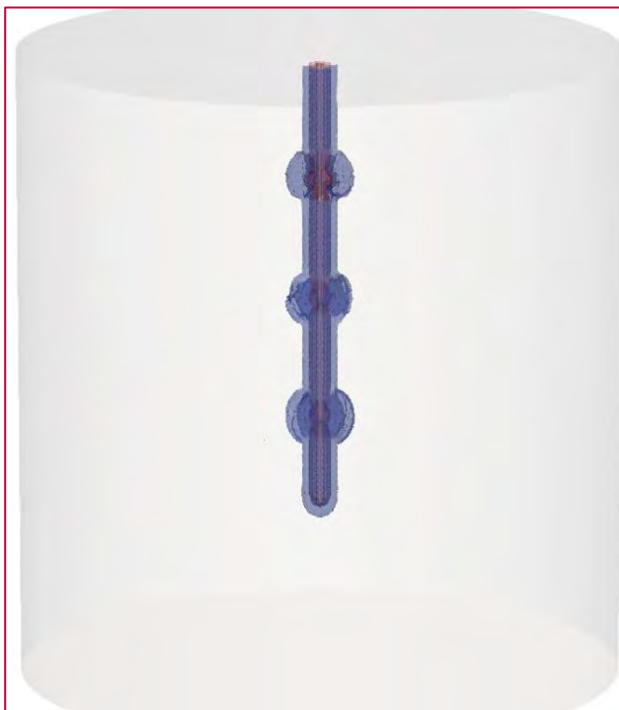
Die rote Fläche stellt eine konstante Temperatur von 200 °C, die blaue Fläche eine konstante Temperatur von 100 °C dar.

Abbildung 206 Darstellung der Temperaturverteilung um die Lanze nach 10 Stunden



Die rote Fläche stellt eine konstante Temperatur von 200 °C, die blaue Fläche eine konstante Temperatur von 100 °C dar

Abbildung 207 Darstellung der Temperaturverteilung um die Lanze nach 10 Tagen



Die rote Fläche stellt eine konstante Temperatur von 200 °C, die blaue Fläche eine konstante Temperatur von 100 °C dar.

5 Monitoring der Schwermetallmobilität bei der TCH

5.1 Mineralogie und Mobilität von Schwermetallen in kontaminierten Böden von Altlasten

Eine Auswahl von Probenstandorten stellte die Grundlage für die Untersuchung der Schwermetallmobilität dar. Dazu wurden Recherchen zur Ermittlung geeigneter Probenahmestandorte auf österreichischen Altlasten durchgeführt, die organische Verunreinigungen und Schwermetallkontaminationen aufweisen.

5.1.1 Anforderungen an Probenahmestandorte

Für die Untersuchung der Schwermetallmobilität im Labor sollten Bodentypen und -arten von fünf unterschiedlichen Altlasten untersucht werden. Die geforderten Voraussetzungen zur Eignung einer Altlast für diese Untersuchung waren:

- Vorliegen einer Kontamination mit organischen Schadstoffen, v.a. CKWs, MKWs, etc., jedoch keine PAKs;
- Vorliegen einer Kontamination mit anorganischen Schadstoffen, jedoch nur Schwermetalle, deren Eluatkonzentrationen laut DVO 2008 Anhang 1 für die Ablagerung auf Bodenaushubdeponien beschränkt sind wie As, Ba, Pb, Cd, Cr_{ges}, Co, Cu, Ni, Hg, Ag, Zn und Sn;
- Die kontaminierten Bereiche sind oberflächennah und zugänglich, d.h. es existieren keine Deckschichten oder eine Bebauung;
- Die Altlasten sind der Prioritätenklasse 1 oder 2 zuzuordnen.

In den nachstehenden Schritten wird der Ablauf der Recherchetätigkeiten zur Auswahl der geeigneten Altlasten beschrieben.

Schritt 1: Zusammenfassung geeigneter Altlasten in Österreich

Im ersten Schritt der Recherchetätigkeit wurden alle im Altlastenatlas (BMK & UBA, 2021) erfassten Altlasten in Österreich auf die oben genannten Voraussetzungen geprüft. Bereits sanierte Altlasten wurden nicht berücksichtigt, da die Gefahrenquelle nicht mehr existiert. Die nicht gesicherten und gesicherten Altlasten, die den Voraussetzungen entsprachen, wurden hinsichtlich folgender Merkmale klassifiziert:

- Art der Altlast (Altablagerung oder Altstandort);
- Lage der Altlast;
- derzeitige und ehemalige Nutzung;
- Zugänglichkeit;
- Prioritätenklasse;
- Status (gesichert oder nicht gesichert);
- vorkommende Schadstoffart (aufgeteilt in organische und anorganische Schadstoffe) laut Feststoff- und Grundwasseranalysen und
- Lage der Schadstoffe.

Schritt 2: Reihung nach Relevanz

Auf Basis dieser gesammelten Informationen wurde jede der Altlasten nach einer Ersteinschätzung als „Plan A“- , „Plan B“- oder „Plan C“-Altlast eingestuft. Da nach gründlicher Recherchearbeit keine „Plan A“-Altlasten (Altlasten, die alle o.g. Kriterien erfüllen) für eine Probenahme infrage kamen, wurden „Plan B“-Altlasten als solche definiert, die, statt in Prioritätenklasse 1 oder 2 zu fallen, der Prioritätenklasse 3 zuzuordnen waren, aber die übrigen Anforderungen erfüllen.

Die Recherchetätigkeiten erfolgten per Telefon und E-mail bei den zuständigen Bearbeitern der Altlasten im Umweltbundesamt und der jeweiligen Landesregierung, den jeweiligen Eigentümern der Altlastenflächen, den Standortgemeinden der Altlasten und anderen Stakeholdern. Dabei erwies sich, dass die meisten „Plan B“-Altlasten aus diversen Gründen nicht zu beproben waren. Entweder wurde bereits eine noch nicht im Altlastenatlas angeführte Sanierung der Altlast in der Vergangenheit durchgeführt oder die für eine Beprobung vorgesehenen Bereiche der Altlast waren nicht zugänglich. In einigen Fällen war es nicht möglich, eine Genehmigung des Grundeigentümers zum Betreten des Grundstücks zu erhalten bzw. diesen überhaupt zu kontaktieren.

Aus diesem Grund wurden Standorte als „Plan C“-Altlasten definiert, die geringfügige anorganische und organische Belastung aufweisen sowie in die Prioritätenklasse 1, 2 oder 3 fallen. Auch in dieser Kategorie wurde keine geeignete Altlast gefunden, so dass schließlich Standorte als „Plan-D“-Altlasten definiert wurden, die anorganische aber nicht Belastungen mit organischen Schadstoffen aufwiesen.

In Tabelle 17 sind die Voraussetzungen der „Plan A“- , „Plan B“- , „Plan-C“- und „Plan D“- Altlasten zusammengefasst.

Tabelle 17 Definition der „Plan A“- , „Plan B“- , „Plan-C“- und „Plan D“-Altlasten.

Bezeichnung	Voraussetzung		
	Organische Belastung	Anorganische Belastung durch Schwermetalle	Prioritätenklasse
„Plan A“-Altlast	Ja	Ja	1 oder 2
„Plan B“-Altlast	Ja	Ja	1, 2 oder 3
„Plan C“-Altlast	Vereinzelt	Vereinzelt	1, 2 oder 3
„Plan D“-Altlast	Nein	Ja	1, 2 oder 3

Schritt 3: Einholung der Genehmigung des Eigentümers für die Probenahme

Erneut durch Anfragen beim Umweltbundesamt, bei Standortgemeinden und bei den Grundstückseigentümern, die durch das Grundbuch ermittelt wurden, konnten Genehmigungen zur Probenahme auf den Altlastenflächen eingeholt werden.

5.1.2 Probenahmeplanung

Bei der Probenahmeplanung wurde wie folgt vorgegangen:

- Definition des Untersuchungsziels: Laut ÖNORM S 2091 (Austrian Standards, 2006) ist abhängig vom Untersuchungsziel das weitere Vorgehen der Probenahme zu planen. Das Ziel der Probenahme ist die Gewinnung von Bodenmaterial für die Untersuchung der Mobilität und Mineralogie von Schwermetallen in den kontaminierten Böden vor und nach einer thermischen Behandlung.

- Erkundungsstatus der Altlast: Frühere Aufzeichnungen und Untersuchungen durch verschiedene Institutionen dienten zur Lokalisierung und Identifikation von Schadenszentren sowie zur Ermittlung weiterer wichtiger Informationen wie Untergrundverhältnisse, Standortverhältnisse, etc., die für die Durchführung einer Probenahme relevant sind. Die Untersuchungsergebnisse für Altlasten in Österreich werden durch das Umweltbundesamt auf altlasten.gv.at zur Verfügung gestellt. Eine Geländebegehung vor der Probenahme ist laut ÖNORM S 2091 empfehlenswert, wurde aber nicht durchgeführt.
- Planung der Probenahmestellen: Auf Basis der Informationen aus früheren Untersuchungen wurde die räumliche Lage von Bereichen identifiziert, die mit Schadstoffen verunreinigt waren. Unbebaute Flächen mit oberflächennahen Schadstoff-Hotspots (im Bereich < 1 m uGOK) wurden als ideale Probenahmestellen in ein Luftbild eingezeichnet. Als Hilfe zur Orientierung auf der Altlast dienten ungefähre Meterangaben, welche auf ein markantes Objekt wie ein Einkaufszentrum bezogen wurden. Zur Erreichung des Untersuchungsziels wurden ein bis zwei Probenahmestellen pro Altlast eingeplant.
- Wahl der Aufschlussmethode: Es wurden keine maschinellen Aufschlussmethoden vorgesehen. Die Entnahme der Feststoffproben erfolgte mit einer Schaufel.
- Festlegung der Vor-Ort-Parameter: Laut ÖNORM S 2091 sind unmittelbar nach der Probenahme wichtige Vor-Ort-Parameter in ein Probenahmeprotokoll einzutragen. Diese umfassen:
 - Abfallart, Klassifikation;
 - Bodenart;
 - Geruch (Intensität);
 - Farbe und auffällige Verfärbungen;
 - Beschaffenheit (schlammig, fest, flüssig);
 - Veränderung während der Probegewinnung.
- Planung des Parameterumfangs: Die zu untersuchenden Parameter variieren je nach Untersuchungsziel und sind im Einzelfall zu definieren. Die Ziele sind:
 - die Bestimmung der Schwermetallspezies und ihre Mobilität mittels pH-abhängigen Elutionsverfahren gem. EN 14429 und
 - die Durchführung einer Elektronenstrahlmikrosonden-Analytik vor und nach einer thermischen Behandlung des Probenmaterials.
- Berechnung der Mindestprobenmenge: Die Art und die Anzahl der zu untersuchenden Parameter, die Art und Anzahl der Messungen, die Bodenart, der Wassergehalt, etc. sind entscheidend dafür, wieviel Feststoffprobe entnommen werden muss. Da jede Probe bei drei Temperaturen thermisch behandelt werden und jede thermisch

behandelte Probe nach EN 14429 bei verschiedenen pH-Werten eluiert werden sollte (Technisches Komitee CEN/TC 292, 2015), orientierte sich die zu entnehmende Probemenge an den diesbezüglichen Anforderungen der jeweils vorgesehenen Analyseverfahren. Danach wurde die Mindestprobemenge mit 55 kg berechnet.

- Probenahmeprotokoll: Die Dokumentation der Probenahme erfolgte anhand eines Probenahmeprotokolls, das an das Untersuchungsziel angepasst wurde, um insbesondere die für das Projekt InnoBLA wichtigen Parameter zu erfassen.
- Ausrüstung zur Probenahme: Für die Durchführung der Probenahme wurden eine Schaufel, ein Erdbohrer (für kompaktere Untergrundbereiche), Handschuhe, ein Maßband (zur Vermessung der Probenahmestelle), mindestens fünf 10-l-Kübel mit Deckel, Blumenerde (zur Wiederverfüllung der Probenahmestelle), ein Stift (zur Beschriftung der Feststoffproben), ein Fotoapparat (zur bildlichen Dokumentation), der Anfahrtsplan und weitere wichtige Informationen zur Altlast bereitgestellt.

5.1.3 Auswahl der Probenahmestandorte

In den nachstehenden Tabellen 18 bis 21 sind die Ergebnisse der Recherchetätigkeiten dargestellt. Die darin rot markierten Altlasten wurden für eine Probenahme ausgewählt.

Tabelle 18 Altlastenrecherche 1 – Altablagerungen mit organischer und anorganischer Kontamination

Altlast Nr.	Standort	Org. Schadstoffe	Anorg. Schadstoffe	Sicherung	Priorität	Zugänglichkeit/ Nutzung	Relevanz für InnoBLA
K1	Deponie Sankt Veit an der Glan	TOC	Cu, Cd	Gesichert	1	Teilweise Brachfläche	A
K5	Donau Chemie Brückl	LCKW, SCKW	Hg	Gesichert	1	Verbaute Fläche	A
K20	Kalkdeponie Brückl I/II	TOC, LCKW, SCKW	Al, Hg, As	Nicht gesichert	1	Brachfläche	A
N7	Mülldeponie S.A.D.	LCKW, Benzol	As, Ni	Nicht gesichert	3	Brachfläche	B
N23	Mülldeponie Horn	Tetrachloret hen	Ni (vereinzelt)	Gesichert	3	Verbaute Fläche	C
N26	Säureteerablagerung Unterlanzendorf	KW-Index, PAK, MKW	Vereinzelt hoch für As, Pb	Nicht gesichert	3	n.a.	C

Altlast Nr.	Standort	Org. Schadstoffe	Anorg. Schadstoffe	Sicherung	Priorität	Zugänglichkeit/ Nutzung	Relevanz für InnoBLA
N27	Parkplatz Brevillier Urban	CKW, MKW	As, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn	Nicht gesichert	2	Teilweise Brachfläche	A
N35	Glanzstoff - Deponie Nord	TOC	Zn, Pb, Cu	Nicht gesichert	3	Teilweise Brachfläche	B
N36	Deponie Deutsch Wagram - Spindler	KW-Index (vereinzelt)	Vereinzelt hoch für Pb, Zn, Cd	Nicht gesichert	3	Brachfläche	C
N41	Deponie MA 48 - Zwölfaxing	CKW (vereinzelt)	Ni, Hg, Fe, Mn	Gesichert	2	Brachfläche	C
N49	Deponie Tulln	KW-Index	Vereinzelt hoch für Cu, Zn	Gesichert	3	Brachfläche	C
N54	Beizschlammdeponie Ternitz	LCKW, CKW	Cr, Ni	Nicht gesichert	2	Brachfläche	A
N75	Deponie Bachfeld	KW-Index	Vereinzelt hoch für Hg, Cd	Nicht gesichert	3	Brachfläche	C
N78	Deponie Ortner	BTEX, KW-Index, PAK	Vereinzelt hoch für Ni, As	Nicht gesichert	3	Landwirtschaft, Brachfläche	C
N79	Lechnergrube	LCKW, BTEX, KW-Index, PAK	Ni, Cr	Nicht gesichert	3	Brachfläche	B
N80	Flammgrube	KW-Index, PAK	Vereinzelt hoch für Pb, Cd, Zn, Cu	Nicht gesichert	3	Landwirtschaft	C
N81	Deponie Wienerberger-Ortner	MKW, PAK	Vereinzelt hoch für As, Ni	Nicht gesichert	3	Golfplatz, Landwirtschaft	C
N82	Glanzstoff - Traisenau	KW-Index, MKW	Pb, Zn, Cu	Nicht gesichert	3	Brachfläche	B
N84	Deponie B 9 Beim Weißen Kreuz	KW-Index, PAK	Vereinzelt für Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, Zn	Nicht gesichert	3	Landwirtschaft	C

Altlast Nr.	Standort	Org. Schadstoffe	Anorg. Schadstoffe	Sicherung	Priorität	Zugänglichkeit/ Nutzung	Relevanz für InnoBLA
N86	Teerablagerungen Kromag	KW-Index, MKW, PAK	Cu, Zn Vereinzelt hoch für As, Cd, Cr, Ni, Pb	Nicht gesichert	3	Teilweise Brachfläche	C
N88	Deponie Oberleitner	KW-Index (vereinzelt), PAK	Cr, Ni, Pb, Cd, Cu	Nicht gesichert	3	Dicht bewachsene Fläche	C
O13	Deponie Kappern	Leichtflüchtige aromatische Verbindungen	Pb (vereinzelt)	Gesichert	2	n.a.	C
O53	Deponie Gusswerksstrasse	MKW, PAK	Cr Vereinzelt hoch für Cu, Ni, As, Zn, Pb	Gesichert	2	Verbaute Fläche	A
O75	Schlammteiche Vogl	KW-Index	Pb, Cd, Cu, Hg, Zn, Cr	Nicht gesichert	3	Brachfläche	B
O84	Mauerschottergrube	MKW, PAK	Vereinzelt hoch für Ni, Pb	Nicht gesichert	3	Teilweise Brachfläche	C
S14	Salzachsee Nord	KW-Index (vereinzelt), PAK	Vereinzelt hoch für Ni, As	Nicht gesichert	3	Brachfläche	C
ST10	Halde Donawitz	AOX, PCB, CKW (vereinzelt)	Pb, Cd, Cu, Zn	Gesichert	2	Brachfläche	B
ST19	Gerbereideponie Schmidt	AOX, BTEX, KW-Index	As, Cr	Nicht gesichert	1	Brachfläche	A
ST26	Deponie Schotthof Brucknerstraße	LCKW, MKW (vereinzelt), PAK (vereinzelt)	Hohe Metallgehalte	Nicht gesichert	2	Brachfläche	A
ST29	Deponie Schwarzl	MKW (vereinzelt)	Pb Vereinzelt hoch für Cu, Zn	Nicht gesichert	3	Brachfläche	C
ST30	Lederfabrik Schmidt	MKW, KW-Index	Cr	Nicht gesichert	3	Brachfläche	B

Altlast Nr.	Standort	Org. Schadstoffe	Anorg. Schadstoffe	Sicherung	Priorität	Zugänglichkeit/ Nutzung	Relevanz für InnoBLA
			Vereinzelt hoch für Hg, Cu, Cd				
T3	Ahrental	TOC, AOX (vereinzelt), PAK (vereinzelt)	As, Ni	Gesichert	1	Aktive Deponie, Brach- fläche	B
T14	Deponie Ochsentanne	KW-Index	Al, Zn	Gesichert	3	Brach- fläche	B
T16	Deponie Seebach	KW-Index	Vereinzelt hoch für As, Pb, Zn, Cr	Nicht gesichert	3	Brach- fläche	C
V4	Malonsbach	KW-Index	Cu, Pb, Ni, Zn	Nicht gesichert	3	Teilweise Brach- fläche	B
V5	Fußacher Werft	MKW, CKW, PAK, BTEX	Vereinzelt hoch für Cu, Pb, Zn, Ni	Nicht gesichert	3	Teilweise Brach- fläche	C
W9	Wienerberg - West	KW-Index, CKW	Fe, Hg	Gesichert	1	Golfplatz	A

Quelle: Daten aus altlastengv.at

Tabelle 19 Altlastenrecherche 2 – Altstandorte mit organischer und anorganischer Kontamination

Altlast Nr.	Standort	Org. Schadstoffe	Anorg. Schadstoffe	Sicherung	Priorität	Zugänglichkeit/ Nutzung	Relevanz für InnoBLA
N29	MKE Heidenreichstein	LCKW	Vereinzelt hoch für Cr(VI), Ni, Cd	Gesichert	2	Teilweise Brachfläche	C
N63	Metallfabrik Franke	LCKW, KW-Index	Ni, Cu (vereinzelt)	Nicht gesichert	2	Teilweise Brachfläche	A
N67	Fabrik elektrischer Apparate Schrems	CKW, PAK, MKW	Vereinzelt hoch für Pb, Cd, Cu, Ni, Zn	Nicht gesichert	2	Teilweise Brachfläche	C
N74	Glanzstoff Austria - Teilbereich Spinnerei	KW-Index	Zn, Pb, Hg (vereinzelt)	Nicht gesichert	2	Teilweise Brachfläche	B
N91	Metallwaren-erzeugung Häusermann	CKW	Cu	Nicht gesichert	2	Teilweise Brachfläche	B
O40	Holz Müllerstraße	MKW	Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn	Nicht gesichert	3	Teilweise Brachfläche	B
S16	Metallwarenfabrik Wallpach	CKW, PAK (vereinzelt)	Vereinzelt hoch für Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn	Nicht gesichert	3	Teilweise Brachfläche	C
ST31	Holz imprägnierwerk Rütgers St. Marein	KW-Index	As, Cu	Nicht gesichert	2	Teilweise Brachfläche	B

Tabelle 20 Altlastenrecherche 3 – Altablagerungen mit anorganischer Kontamination

Altlast Nr.	Standort	Anorg. Schadstoffe	Sicherung	Priorität	Zugänglichkeit/ Nutzung	Relevanz für InnoBLA
K7	Deponie Roßwiese	W, Mo, Ni, Cr	Gesichert	1	Brachfläche	D
K30	Deponie Kautscheleweg - Mageregger Straße	As	Nicht gesichert	3	Landwirtschaft	D
N6	Aluminiumschlackendeponie	Al, Pb, Cu, Zn	Gesichert	2	Brachfläche	D
S7	Arsenikhalde Rotgülden	As	Gesichert	3	Brachfläche	D
ST3	Schlackenhalde Judenburg	Cr	Gesichert	3	Teilweise Brachfläche	D
ST6	Deponie Steirische Montanwerke AG	As	Nicht gesichert	1	Brachfläche	D
ST32	Halde Schrems	Pb, Zn	Nicht gesichert	1	Teilweise Brachfläche	D
T17	Pochergraben Schwaz	As, Cu, Hg, Sb	Nicht gesichert	3	Landwirtschaft	D

Tabelle 21 Altlastenrecherche 4 – Altstandorte mit anorganischer Kontamination

Altlast Nr.	Standort	Anorg. Schadstoffe	Sicherung	Priorität	Zugänglichkeit/ Nutzung	Relevanz für InnoBLA
K6	BBU Blei- und Zinkhütte Arnoldstein	Zn, Pb, Cd, Sb	Gesichert	1	Teilweise Brachfläche, Deponiefläche	D
K22	Lederfabrik Neuner	Cr, As	Nicht gesichert	2	Teilweise Brachfläche	D
K29	BBU Miniumfabrik Saag	Pb, As	Nicht gesichert	3	Teilweise Brachfläche	D
O25	OKA-Mastlager	As, Cr	Nicht gesichert	1	Sportplatz, Werksgelände, ASZ	D

Da sich trotz umfangreicher Recherchen nur von vier Altlasten geeignete Proben beschaffen ließen, wurde eine fünfte Bodenprobe von der Firma Poschacher Kompost bezogen. Die Herkunft sowie die Zusammensetzung dieser Probe waren nicht bekannt, es sollte sich jedoch um einen kontaminierten Bodenaushub handeln.

Altstandort und Altablagerung ST30: Lederfabrik Schmidt

Eckdaten

Die Altlast „Lederfabrik Schmidt“, kurz ST30, die sich im Stadtzentrum von Leibnitz befindet, ist der ehemalige Standort einer Gerberei, in der einst Leder und Pelze hergestellt wurden. Ab den 1970er-Jahren wurde zusätzlich ein Produzent von Kunststofftüren und -fenstern am Standort angesiedelt, der große Mengen an Schwer- und Mittelöle für die Produktion zwischenlagerte. Im nördlichen Bereich der Altlast sind auf circa 2.900 m² Metall-, Kunststoff- und Lederabfälle, Baurestmassen wie Glas, Ziegel und Holz und Bodenaushub abgelagert worden. Heute wird auf einem Teilbereich der Altlast ein großes Einkaufszentrum mit Parkplatz betrieben. Oberhalb der Ablagerung befindet sich zurzeit eine Wald- und Wiesenfläche, welche von den Anwohnern als Erholungsgebiet genutzt wird (Döberl, 2012).

Der Untergrund unter der Altablagerung besteht aus quartären, sandig-kiesigen, fluviatilen Sedimenten, die eine Mächtigkeit von circa 3 m haben. Der Grundwasserkörper „Leibnitzer Feld“ mit einer Mächtigkeit von 2,5 m befindet sich im Bereich der fluviatilen Sedimente mit einem Flurabstand von 3,3 – 3,6 m und liegt unweit von zwei Trinkwasserversorgungsanlagen. Darunter bilden ab 6 m uGOK schluffig-tonige bis kiesige tertiäre Sedimente den Grundwasserstauer (Döberl, 2012).

Schadstoffuntersuchungen

Grundwasseruntersuchungen aus dem Jahr 1989 ergaben keine Hinweise auf eine Kontamination durch die Altlast. Im Jahr 1994 konnte man bei der Analyse von Sickerwasser- und Abfallproben Verunreinigungen durch schwersiedende Kohlenwasserstoffe, Chrom und schwerlösliche Farbstoffe feststellen. Bei der Herstellung von Schurfproben im Jahr 1996 wurde „übelriechendes“ Material ausgehoben. Von 2009 bis 2011 erfolgte die ergänzende Untersuchung gem. §13 ALSAG. Diese umfasste die Durchführung von 30 Trockenkernbohrungen mit anschließender Feststoffuntersuchung, die Herstellung von 21 Bohrungen zur Messung der Zusammensetzung der Bodenluft und die Installation von drei Grundwassermessstellen (Döberl, 2012).

Die Untergrunduntersuchung erfolgte durch die Entnahme von Feststoffproben aus den 30 Trockenkernbohrungen, die bis in den gesättigten Bereich (3 – 4 m uGOK) abgeteuft wurden. Die rund 90 Feststoffproben wurden auf Gesamt- und Eluatgehalte untersucht. Die Gesamtgehaltsanalysen wurden für die Parameter Kohlenwasserstoff-Index (KW-Index) und Metalle (As, Pb, Cr_{ges}, Cd, Cu, Zn, Ni, Hg) durchgeführt. Für die Metalle wurden zusätzlich Eluatuntersuchungen vorgenommen, um die Mobilisierbarkeit v.a. von Cr(VI) zu analysieren (Döberl, 2012).

Die Ergebnisse der Gesamtgehaltuntersuchungen an insgesamt 90 Feststoffproben sind in Tabelle 22 (Döberl, 2012) zusammenfassend dargestellt. Die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen, die an 46 ausgewählten Feststoffproben durchgeführt wurden, sind in Tabelle 23 aufgeführt.

Tabelle 22 Gesamtgehaltuntersuchung von 90 Feststoffproben der ST30

Parameter	PW a [mg/kg TM]	n	min [mg/kg TM]	max [mg/kg TM]	n < PW a	n > PW a
Cd	2	90	< 0,5	13	87	3
Cr_{ges}	100	90	11	16.600	59	31
Cu	100	90	< 5	850	87	3
Hg	1	90	< 0,05	2,6	87	3
KW-Index	100	90	< 20	4.700	83	7

Quelle: Döberl (2012)

PW a ... Prüfwert a gem. ÖNORM S 2088-1 [mg/kg TM]

n ... Anzahl analysierter Proben [-]

min ... niedrigster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

max ... höchster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

n < PW a ... Anzahl an Feststoffproben, deren Gesamtgehalt den PW a gem. ÖNORM S 2088-1 nicht überschreitet [-]

n > PW a ... Anzahl an Feststoffproben, deren Gesamtgehalt den PW a gem. ÖNORM S 2088-1 überschreitet [-]

Tabelle 23 Eluatuntersuchung von 46 Feststoffproben der ST30

Parameter	PW a [mg/kg TM]	n	min [mg/kg TM]	max [mg/kg TM]	n < PW a	n > PW a
Cd	0,05	46	< 0,01	< 0,01	46	0
Cr_{ges}	0,5	46	< 0,1	31	30	16
Cr(VI)	-	46	< 0,05	0,30	-	-
Cu	1	46	< 0,1	6,8	44	2
Hg	0,01	46	< 0,002	< 0,002	46	0

Quelle: Döberl (2012)

PW a ... Prüfwert a gem. ÖNORM S 2088-1 [mg/kg TM]

n ... Anzahl analysierter Proben [-]

min ... niedrigster Eluatgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

max ... höchster Eluatgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

n < PW a ... Anzahl an Feststoffproben, deren Eluatgehalt den PW a gem. ÖNORM S 2088-1 nicht überschreitet [-]

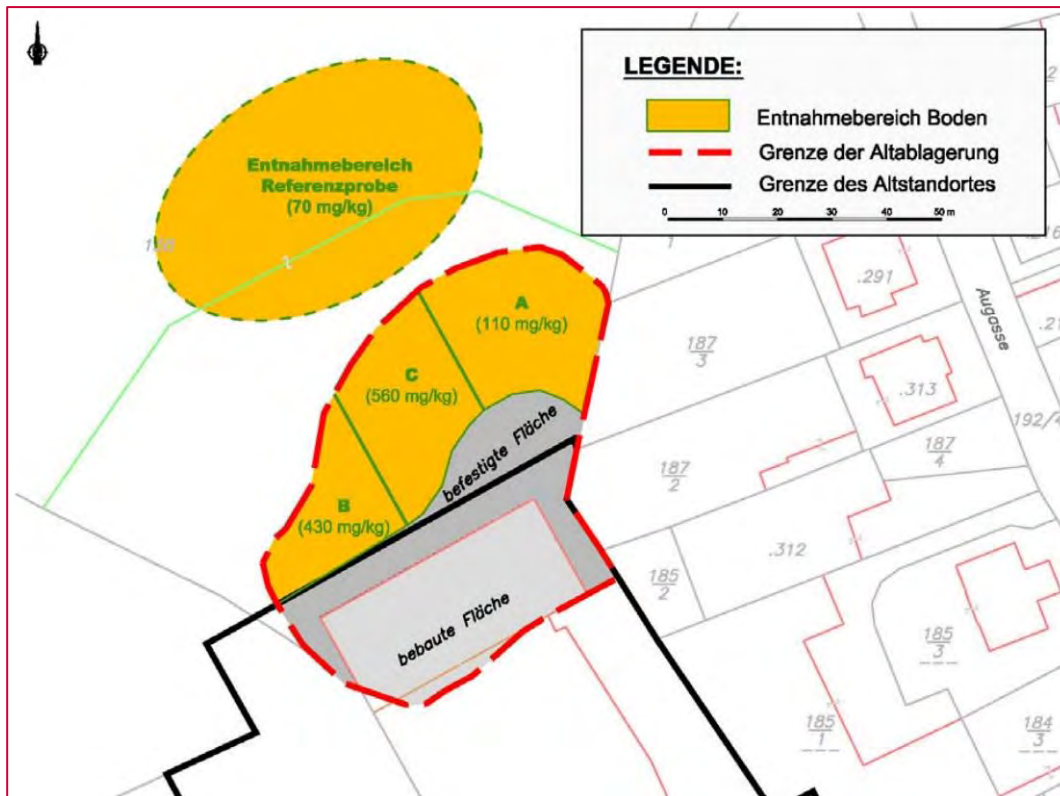
n > PW a ... Anzahl an Feststoffproben, deren Eluatgehalt den PW a gem. ÖNORM S 2088-1 überschreitet [-]

Vor allem wurden für den Gesamtgehalt an Chrom (Cr_{ges}) bei 31 von 90 Feststoffproben hohe Überschreitungen des PW a gem. ÖNORM S 2088-1 festgestellt. Die Eluatgehalte von Cr_{ges} lagen an insgesamt 16 von 46 Feststoffproben über dem PW a gem. ÖNORM S 2088-1. Die mobilisierte Spezies wurde meistens als Cr(VI) identifiziert (Döberl 2012).

Neben den Eluatuntersuchungen wurde ein Säulenversuch gem. DIN 19528 durchgeführt. Hierbei wurde ein konstanter Austrag an Cr_{ges} von ungefähr 0,005 mg/l ermittelt, wobei Cr(VI) nicht nachgewiesen werden konnte (Döberl 2012).

Im Jahr 2011 wurden weitere Feststoffuntersuchungen durchgeführt. Die Feststoffproben aus einem Tiefenbereich von 0 – 0,1 m uGOK wurden auf der Altablagerung selbst und auf einer Referenzfläche unweit der ST30 entnommen, um die Werte miteinander vergleichen zu können. In Abbildung 208 sind die Analyseergebnisse von Cr_{ges} dargestellt (Döberl, 2012).

Abbildung 208 Gehalte an Cr_{ges} im Oberboden (0 – 0,1 m uGOK)



Die Untersuchungsergebnisse zeigten eindeutige Unterschiede in den Cr_{ges} -Konzentrationen und ließen die Altlast in insgesamt drei Teilbereiche aufteilen. Die Konzentrationen im Bereich B und C lagen weit über dem PW a gem. ÖNORM S 2088-1 von 100 mg/kg TM (Döberl, 2012).

Laut den Grundwasseruntersuchungen der im Jahr 2011 installierten Grundwassermessstellen wurden keine Überschreitung des Prüfwertes gem. ÖNORM S 2088-1 für Cr_{ges} festgestellt. Die Werte für $Cr(VI)$ lagen weit unter dem Maßnahmenschwellenwert gem. ÖNORM S 2088-1 (Döberl, 2012).

Bewertung

Die Kontamination durch Cr_{ges} in oberflächennahen Bodenbereichen wurde als erheblich eingestuft. Die verunreinigte Fläche ist nicht sehr groß und die Schadstoffaufnahme durch den Menschen wurde als gering eingestuft. Daher erfolgte eine Zuordnung der Altlast ST30 in die Prioritätenklasse 3 (Döberl, 2012).

Altablagerung N82: Glanzstoff – Traisenau

Eckdaten

Die Altablagerung „Glanzstoff – Traisenau“, kurz N82, liegt in St. Pölten östlich des ehemaligen Betriebsgeländes der Glanzstoff Austria. Die Fläche wurde von 1930 bis 1990 für die Ablagerung von Abfällen wie Kalk- und Klärschlämme, Viskosereste und Reste aus einem Barackenlager genutzt (Valtl, 2016).

Die gesamte Fläche der N82 kann in zwei Ablagerungsbereiche eingeteilt werden. Im westlichen Bereich der N82 war im Zweiten Weltkrieg ein Barackenlager situiert, welches vor rund 40 – 50 Jahren abgerissen wurde. Die Reste dieses Barackenlagers wie Metallteile, Glas, Beton- und Ziegelabbruch wurden auf rund 20.000 m² vor Ort abgelagert. Auf dem östlichen Bereich der N82 wurde eine Kläranlage der Glanzstoff Austria betrieben. Die Abfälle der Kläranlage wie Klärschlämme und weitere betriebliche Abfälle wie Viskosereste wurden auf einer Fläche von rund 45.000 m² im südlichen und östlichen Bereich abgelagert (Valtl, 2016).

Die N82 befindet sich im Traisental im Bereich quartärer Alluvionen. Der Untergrund besteht aus mächtigen steinigen und sandigen Kiesen, sogenannte Traisenschotter, in denen der erste Grundwasserleiter liegt. Der k_f -Wert beträgt durchschnittlich 10^{-3} m/s. Bis in eine Tiefe von 40 m folgen eher geringdurchlässige Bereiche aus Sand, Schluff und Feinkies, in die Ton-, Konglomerat- und Sandsteinschichten eingebaut sind. Ab 40 m uGOK wechseln diese Sedimente zu mächtigen Tonlagen (Valtl, 2016).

Zum heutigen Zeitpunkt befindet sich auf der N82 Wald- und Grünflächen. Unmittelbar östlich daran fließt die Traisen. Die N82 befindet sich im Gebiet des Grundwasserkörpers „Traisental“, der südlich von der Traisen bis nördlich zur Donau reicht (Valtl, 2016).

Schadstoffuntersuchungen

In den 1990ern wurden erste Untersuchungen von Grundwasser- und Feststoffproben durchgeführt. Dabei wurden hohe Konzentrationen von Zink, Sulfat, CSB und KW gemessen. Weitere Untersuchungen fanden in den Jahren von 2012 bis 2014 statt. Diese umfassten die Analyse von Feststoffproben aus Schürfen und Bodenmaterial sowie die Analyse von Grundwasserproben, die aus Grundwassermessstellen entnommen wurden (Valtl, 2016).

Die Feststoffproben aus 95 Schürfen und einer Bodenbeprobung wurden auf die Gesamtgehalte der Parameter Metalle (As, Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Zn, Hg), KW-Index, LCKW, PAK16, BTEX, TOC und Cyanid analysiert. Eluatuntersuchungen wurden unter anderem bei den Metallen durchgeführt.

Laut Umweltbundesamt wurden bei der Entnahme einiger Feststoffproben Auffälligkeiten bezüglich des Geruchs festgestellt. Es wurde durchwegs der Geruch von Mineralöl wahrgenommen. Bei der Auswertung der Analyseergebnisse der Feststoffproben wurde nur der östliche Bereich der N82 als erheblich kontaminiert eingestuft (Valtl, 2016).

Die Untersuchungsergebnisse der Gesamtgehaltuntersuchungen in den Feststoffproben sind in Tabelle 24 (Valtl, 2016) zusammenfassend dargestellt. Die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen, die an ausgewählten Feststoffproben durchgeführt wurden, sind in Tabelle 25 (Valtl, 2016) ersichtlich.

Tabelle 24 Gesamtgehaltuntersuchung von 41 Feststoffproben der N82

Parameter	PW a [mg/kg TM]	n	min [mg/kg TM]	max [mg/kg TM]	n < PW a	n > PW a
As	50	41	2	169	34	7
Cd	2	41	< 0,3	41	28	13
Pb	100	41	13	6.860	8	33
Cu	100	41	9,8	46.200	11	30
Hg	1	41	< 0,2	14,5	17	24
Zn	500	41	43,6	29.500	14	27
KW-Index	100	41	44,9	34.500	3	38

PW a ... Prüfwert a gem. ÖNORM S 2088-1 [mg/kg TM]

n ... Anzahl analysierter Proben [-]

min ... niedrigster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

max ... höchster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

n < PW a ... Anzahl an Feststoffproben, deren Gesamtgehalt den PW a gem. ÖNORM S 2088-1 nicht überschreitet [-]

n > PW a ... Anzahl an Feststoffproben, deren Gesamtgehalt den PW a gem. ÖNORM S 2088-1 überschreitet [-]

Tabelle 25 Eluatuntersuchung von ausgewählten Feststoffproben der N82

Parameter	PW a [mg/kg TM]	n	min [mg/kg TM]	max [mg/kg TM]	n < PW a	n > PW a
Cd	0,05	7	< 0,1	2,0	6	1
Pb	0,1	20	0,015	10,6	11	9
Cu	1	16	< 0,5	53,7	12	4
Zn	10	15	< 0,5	2.120	7	8

PW a ... Prüfwert a gem. ÖNORM S 2088-1 [mg/kg TM]

n ... Anzahl analysierter Proben [-]

min ... niedrigster Eluatgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

max ... höchster Eluatgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

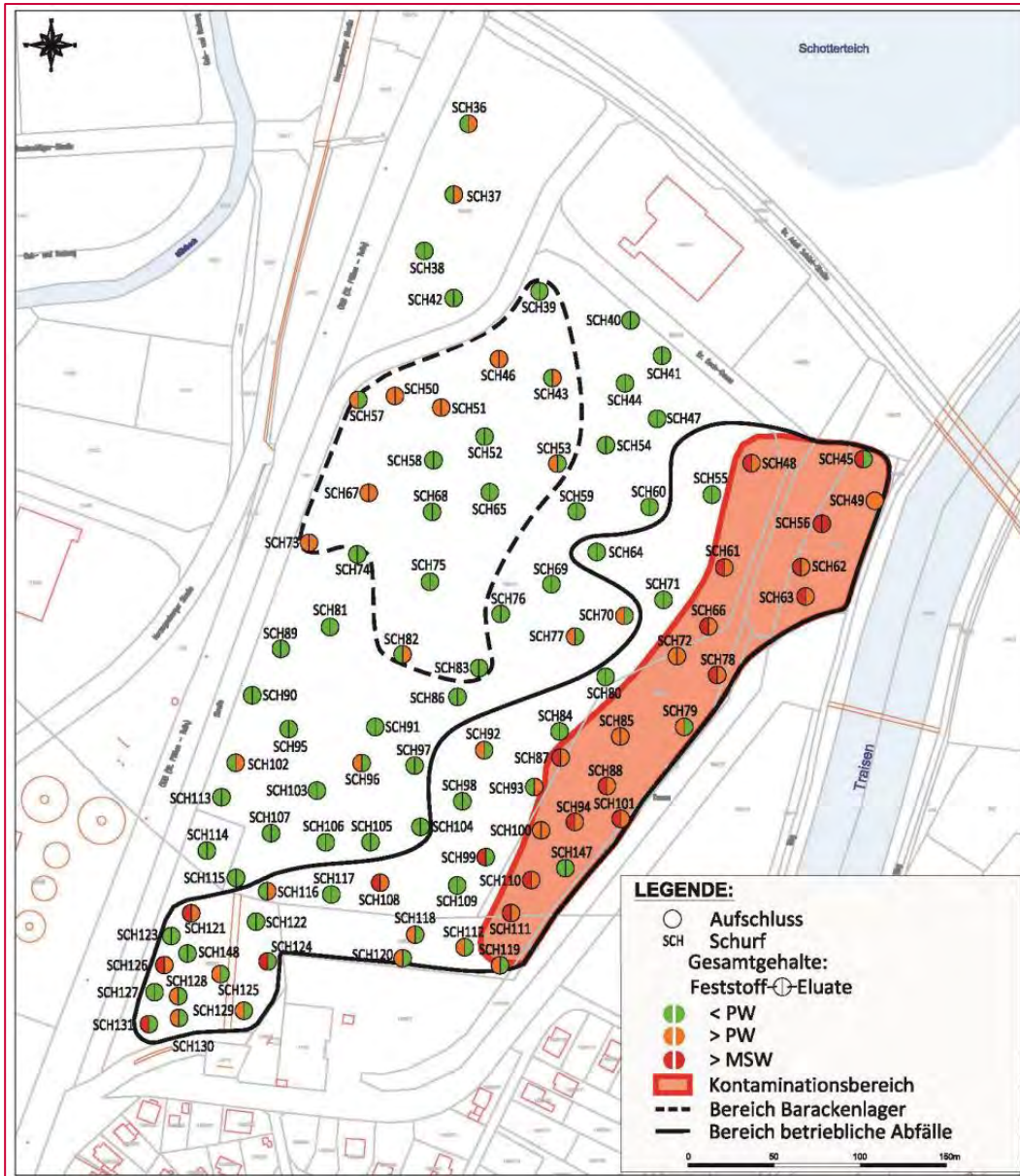
n < PW a ... Anzahl an Feststoffproben, deren Eluatgehalt den PW a gem. ÖNORM S 2088-1 nicht überschreitet [-]

n > PW a ... Anzahl an Feststoffproben, deren Eluatgehalt den PW a gem. ÖNORM S 2088-1 überschreitet [-]

Die Analyseergebnisse der Feststoffproben aus dem erheblich kontaminierten östlichen Bereich zeigten bei den Parametern Zn, Cu, Pb, Hg und KW-Index eine Überschreitung des PW a gem. ÖNORM S 2088-1 bei über der Hälfte der analysierten Feststoffproben. Die Eluatuntersuchungen ergaben bei etlichen Feststoffproben eine erhöhte Eluierbarkeit bei den Parametern Zn und Pb. (Valtl, 2016)

In nachstehender Abbildung 209 (Valtl, 2016) ist der erheblich kontaminierte östliche Bereich in rot eingefärbt dargestellt. Zudem wurden die Analyseergebnisse aus den Schurfproben eingetragen, die jedoch seitens des Umweltbundesamtes nicht näher beschrieben wurden.

Abbildung 209 Analyseergebnisse der Feststoffuntersuchungen



Bewertung

Das Schadstoffpotenzial wurde als groß bewertet, wohingegen die Schadstoffausbreitung der KW und Metalle als insgesamt gering einzustufen war. Da in der unmittelbaren Umgebung der N82 das Grundwasser durch etliche Brunnen für Bewässerungszwecke und für die gewerbliche Nutzung verwendet wird, gilt es als gut nutzbar. Daher wurde die Altlast N82 in die Prioritätenklasse 3 eingestuft (Valtl, 2016).

Altablagerung ST32: Halde Schrems

Eckdaten

Die Altablagerung „Halde Schrems“, kurz ST32, liegt in Frohnleiten, genauer in der Katastralgemeinde Schrems. Im 19. Jahrhundert wurden hier neben Abraummateriale des einst lokal angesiedelten Bergbaus auch Schlacken aus einer Schmelzhütte auf rund 100.000 m² abgelagert. Im Zuge der bergbaulichen Tätigkeiten des Josefibaus, der bei der südlichen Talflanke des Talbaches situiert war, wurden unter anderem Silber und Pb abgebaut. Durch die Ablagerung des Abraummateriale wurden Kontaminationen durch Pb, Zn, Cd und Hg in der heutigen ST32 verursacht. Zudem konnte festgestellt werden, dass das vorliegende Pb eine hohe Pflanzenverfügbarkeit aufweist, da es in erhöhten Konzentrationen in lokal angepflanzten Gemüsearten nachgewiesen worden war (Döberl, 2019).

Der Untergrund der Talsohle des Talbaches besteht aus seichten, quartären Lockersedimenten. Diese setzen sich aus schluffig-tonigen Kiesen und Sanden zusammen, in denen ein gering ergiebiger Grundwasserleiter situiert ist. Grün- und Schwarzschiefer folgen im südlichen Bereich der Talflanke des Talbaches. Nördlich davon treten paläozoische Kalke und Grünschiefer auf. Die Schwarzschiefer setzen sich v.a. aus silberführender Zinkblende und Bleiglanz sowie weiteren Kiesvererzungen zusammen (Döberl, 2019).

Auf der ST32 befindet sich heute unter anderem ein Siedlungsgebiet mit Einfamilienhäusern und Hausgärten. Im südöstlichen und westlichen Bereich der ST32 sind ein Gewerbebetrieb und land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen situiert (Döberl, 2019).

Schadstoffuntersuchungen

Die Untersuchungen der ST32 wurden im Jahr 2018 aufgenommen. Es erfolgten bis dato Analysen von Feststoffproben aus dem Oberboden und Untersuchungen von Pflanzen- und Grundwasserproben (Döberl, 2019).

Für eine geologisch-geochemische Kartierung wurden insgesamt an 65 Probenahmestellen aus Tiefenbereichen von bis maximal 40 cm uGOK Feststoffproben gezogen, die vor Ort mittels mobilem Röntgenfluoreszenzgerätes analysiert wurden. Die Analyseergebnisse

wiesen eine durchgehende hohe Kontamination des Oberbodens durch Pb und Zn nach (Döberl, 2019).

Für weitere Feststoffuntersuchungen Ende 2018 wurde die ST32 in circa 80 Teilflächen unterteilt, aus denen jeweils 20 Stichproben aus dem Oberboden (bis maximal 20 cm uGOK) entnommen und zu einer Mischprobe vereinigt wurden. Im Labor wurden Parameter wie Cd, Hg, As, Cr, Cu, Ni, etc. auf ihre Gesamtgehalte analysiert (Döberl, 2019).

Die Untersuchungsergebnisse der Gesamtgehaltuntersuchungen an den Feststoffproben sind in Tabelle 26 (Döberl, 2016) zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 26 Ergebnisse der Gesamtgehaltuntersuchung von Feststoffproben der ST32

Parameter	RW gem. ÖNORM S 2088-2 [mg/kg TM]	min [mg/kg TM]	max [mg/kg TM]	Median [mg/kg TM]
As	50	9,6	71	19
Cd	2	0,41	25	3,2
Pb	500	119	20.368	2.018
Cr	75	6,9	120	37
Hg	10	0,26	40	1,5
Cu	500	24	420	76
Zn	-	94	6.334	1.016

RW gem. ÖNORM S 2088-2 ... Richtwert gem. ÖNORM S 2088-2 für die Nutzung Wohnen [mg/kg TM]

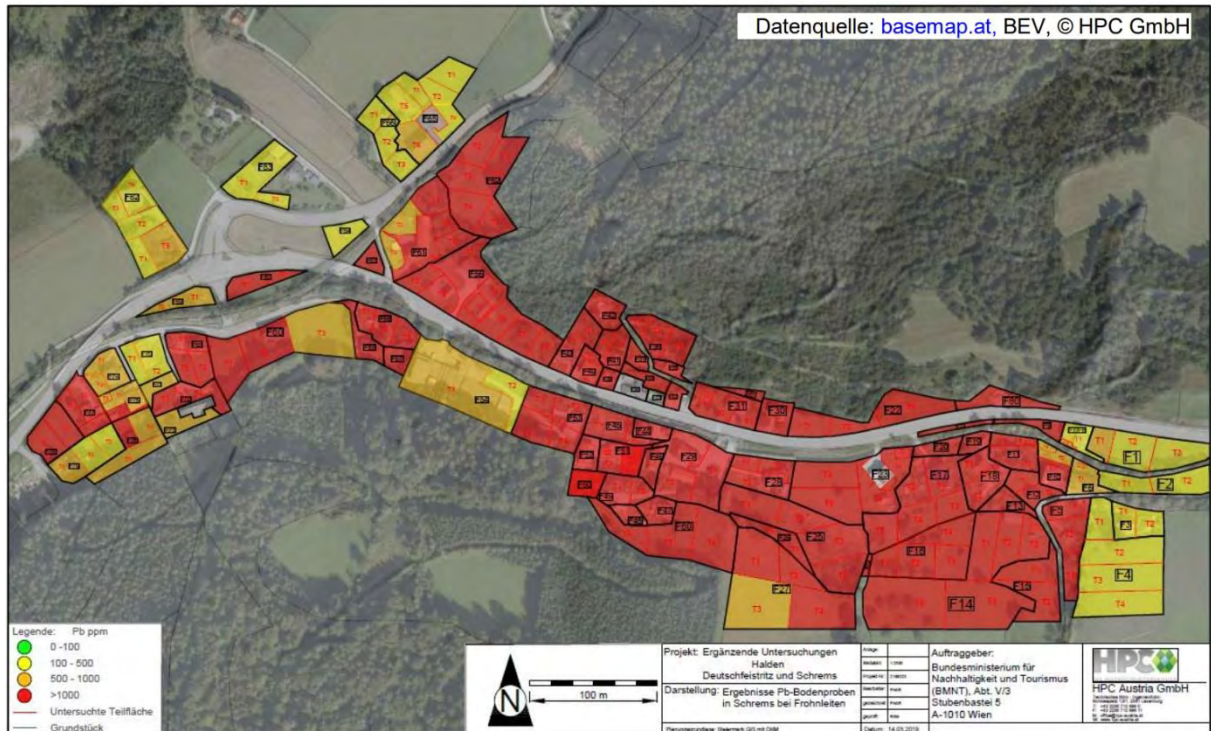
min ... niedrigster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

max ... höchster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

Die Analyseergebnisse wiesen v.a. eine sehr hohe Pb- und Zn-Belastung des Oberbodens nach. Vereinzelt ergaben sich auch deutliche Überschreitungen des Richtwertes RW gem. ÖNORM S 2088-2 für die Nutzung Wohnen für Cd, Cr, As und Hg (Döberl, 2016).

In der Abbildung 210 (Döberl, 2019) ist die ST32 im Luftbild dargestellt, in welches die Gesamtgehalte für Pb eingetragen sind.

Abbildung 210 Gesamtgehalte von Pb im Oberboden



Bewertung

Die hohe Pb-Belastung im Boden führte zu einer Verunreinigung des lokalen Grundwasserleiters. Grundwasseranalysen zeigten eine deutliche Kontamination durch Pb und vereinzelt auch durch Zn und Cd. Da der Grundwasserleiter eher gering ergiebig ist, wurde davon ausgegangen, dass die massive Pb-Kontamination nur lokal begrenzte besteht und es zu keinem Schadstoffaustrag aus dem Gebiet kommt. (Döberl 2019)

Durch die hohe Schwermetallbelastung, v.a. durch Pb, Cd und Hg im Gebiet der ST32 wurden die Expositionspfade orale Schadstoffaufnahme durch Verschlucken von Bodenpartikeln, Verzehr von lokal angebautem Gemüse und die inhalative Aufnahme durch Aufwirbelung feiner Bodenpartikel im Zuge von Gartenarbeiten identifiziert. Eine Risikoanalyse in Kombination mit einer Expositionsabschätzung ergab, dass ein gesundheitliches Risiko durch die äußerst große Schwermetallbelastung vorhanden ist. Durch die aktuelle Wohn- und Freizeitnutzung ist die ST32 als hochwertig nutzbares Gebiet zu bewerten. Aus diesen Gründen wurde die Altlast in die Prioritätenklasse 1 eingestuft. (Döberl 2019).

Altstandort K29: BBU Miniumfabrik Saag

Eckdaten

Der Altstandort "BBU Miniumfabrik Saag", kurz K29, befindet sich in Techelsberg am Wörther See. Die K29 war einst der Betriebsstandort einer ehemaligen Miniumfabrik, in der Bleioxid, sogenanntes Minium, bis 1991 hergestellt wurde. Im nördlichen Bereich der rund 23.000 m² großen Altlast wurde Pb zu Bleioxid gebrannt. Im südlichen Bereich wurde das hergestellte Bleioxid gemahlen, gesiebt und verpresst (Dörrie, 2012).

Die gesamten Gebäude für die Produktion von Minium sind heute noch vorhanden und sogar noch teilweise genutzt. Das ehemalige Produktionsgebäude dient einige Tage im Jahr als Diskothek und aus dem westlichen Produktionsräumen sind Wohnungen mit Gärten entstanden. Einige weitere neu gebaute Wohnhäuser existieren ebenfalls auf dem Areal der K29. Rund um die ehemaligen Produktionsgebäude und Wohnhäuser befinden sich Wiesen- und Waldflächen. Im südlichen Bereich ist ein Strandbad mit Parkplätzen und Liegewiesen mit direktem Zugang zum Wörther See situiert. Im Jahr 1994 erfolgte im Bereich dieses Strandbades bereits ein Bodenaustausch mit anschließender Überdeckung mittels mineralischer Bodenschicht (Dörrie, 2012).

Die K29 befindet sich im Gebiet des mittelostalpinen Altkristallins der Ossiacher Tauern. Direkt hinter der ehemaligen Miniumfabrik besteht der Untergrund aus quarzitischer Phyllonite und Phyllite. Im nördlichen Areal der K29 findet man mächtige sandig und sandig steinige Kiese, die von gewachsenem Fels unterlagert werden. Im Südteil der Altlast befinden sich massive sandige Kiese und kiesige Sande. Im Bereich des Ufers besteht der Untergrund aus schluffigen Tonen (Dörrie, 2012).

Der Grundwasserleiter im Südteil der K29 ist bei 0,8 – 3,8 m uGOK anzutreffen und ist mit dem Wörther See unmittelbar verbunden. Der k_f -Wert beträgt $5 \cdot 10^{-6}$ m/s (Dörrie, 2012).

Schadstoffuntersuchungen

Die ersten Untersuchungen wurden in den Jahren 1993 bis 1994 durchgeführt und umfassten die Analyse von Feststoffproben aus dem Oberboden sowie von Grundwasserproben. Von 2008 bis 2014 wurden im Zuge der ergänzenden Untersuchung gem. § 13 ALSAG sehr oberflächennahe (max. 0,2 m uGOK) Boden- und Sedimentproben entnommen. Zudem wurden einige Rammkernbohrungen mit anschließender Entnahme von Bodenproben durchgeführt. Daneben wurden auch Grund- und Oberflächenwasserproben untersucht (Dörrie, 2012).

Eine Nutzungskartierung aus dem Jahr 2004 ergab eine Einteilung der K29 in insgesamt fünf Bereiche, von denen drei unmittelbar auf der K29 gelegen sind und als Garten-, Wiesen- und Uferbereich bezeichnet wurden. Zwei außerhalb liegende Bereiche wurden als Mischwaldbereich 1 und 2 benannt. Aus jedem Teilbereich wurden aus einem Tiefenbereich von 0,1 m uGOK zehn Stichproben zu einer Mischprobe vereinigt, die unter anderem auf Metalle (As, Cd, Cr_{ges}, Pb, Cu, Hg, Zn, Ni) analysiert wurde (Dörrie, 2012).

Da nur für die Parameter As und Pb durchwegs massive Überschreitungen des Prüf- und Maßnahmenschwellenwertes der ÖNORM S 2088-1 vorlagen, werden nur diese in den Tabellen 27 und 28 für jeden Teilbereich angeführt (Dörrie, 2012).

Tabelle 27 Arsengehalte in den Teilbereichen der K29

Teilbereich	PW gem. ÖNORM S 2088-2 [mg/kg TM]	MSW gem. ÖNORM S 2088-2 [mg/kg TM]	min [mg/kg TM]	max [mg/kg TM]	Median [mg/kg TM]
Gartenbereich	20	50	31	45	37,5
Wiesenbereich	20	50	14	180	47
Uferbereich	20	50	19	28	24
Mischwald 1 & 2	20	100	21	140	46,5

PW gem. ÖNORM S 2088-2 ... Prüfwert gem. ÖNORM S 2088-2 für jeweilige Nutzung [mg/kg TM]

MSW gem. ÖNORM S 2088-2 ... Maßnahmenschwellenwert gem. ÖNORM S 2088-2 für jeweilige Nutzung [mg/kg TM]

min ... niedrigster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

max ... höchster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

Tabelle 28 Bleigehalte in den Teilbereichen der K29

Teilbereich	PW gem. ÖNORM S 2088-2 [mg/kg TM]	MSW gem. ÖNORM S 2088-2 [mg/kg TM]	min [mg/kg TM]	max [mg/kg TM]	Median [mg/kg TM]
Gartenbereich	100	500	480	3.600	1.400
Wiesenbereich	100	500	130	15.000	1.700
Uferbereich	100	500	290	56.000	16.000
Mischwald 1 & 2	100	500	52	12.000	705

PW gem. ÖNORM S 2088-2 ... Prüfwert gem. ÖNORM S 2088-2 für jeweilige Nutzung [mg/kg TM]

MSW gem. ÖNORM S 2088-2 ... Maßnahmschwellenwert gem. ÖNORM S 2088-2 für jeweilige Nutzung [mg/kg TM]

min ... niedrigster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

max ... höchster Gesamtgehalt, der gemessen worden ist [mg/kg TM]

Die massiv nachgewiesene Belastung mit Pb ist anhand der Untersuchungsergebnisse aus den Tabellen 27 und 28 deutlich erkennbar. Der Median lag durchgehend weit oberhalb des jeweiligen Maßnahmschwellenwerts gem. ÖNORM S 2088-2, im Uferbereich sogar 32-fach höher. Die Arsengehalte lagen auf über der Hälfte der beprobten Flächen über dem jeweiligen Prüfwert gem. ÖNORM S 2088-2. Im Wiesenbereich kam es sogar zu einigen Überschreitungen des Maßnahmschwellenwerts für Arsen. Bei den Parametern Cu, Cd und Cr_{ges} traten nur sehr vereinzelt Überschreitungen des Prüf- und Maßnahmschwellenwertes gem. ÖNORM S 2088-2 auf (Dörrie, 2012).

In Abbildung 211 ist die Verteilung der Konzentration der Parameter As und Pb in den fünf unterschiedlichen Bereichen dargestellt.

Abbildung 211 Verteilung des Parameters Pb (links) und As (rechts)



Neben der Analyse der Gesamtgehalte wurden auch Eluatuntersuchungen durchgeführt. Pb zeigte als einziges Schwermetall eine auffällig hohe Eluierbarkeit (Dörrie, 2012).

Bewertung

Der Boden im Bereich der K29 wurde als maßgebliches Schutzgut bewertet. Das Schadstoffpotenzial wurde insgesamt durch die großflächige Kontamination mit Pb und As als groß eingestuft. Eine Schadstoffexposition wurde größtenteils ausgeschlossen, da die Flächen bebaut und/oder durchgehend bewachsenen waren. Die Altlast wird als gut nutzbar bewertet, da sie zu Wohn- und Freizeitwecken dient. Aus diesen Gründen wurde die K29 in die Prioritätenklasse 3 eingestuft (Dörrie, 2012).

5.1.4 Probenahme

Altstandort und Altablagerung ST30: Lederfabrik Schmidt

Die Probenahme auf der ST30 wurde an zwei Probenahmestellen durchgeführt. In der Abbildung 212 sind diese als ST30_A und ST30_B bezeichnet in das Google Maps Luftbild des Standortes eingetragen. Das blau umrandete Areal stellt grob die Gesamtfläche der ST30 dar.

Abbildung 212 Probenahmestellen ST30_A und ST30_B



Laut Untersuchungen des Umweltbundesamtes wies die oberflächennahe Bodenschicht der Probenahmestelle ST30_A und ST30_B eine eindeutige Überschreitung des Prüfwertes PW a und PW b der ÖNORM S 2088-1 von $C_{r_{ges}}$ auf. Der analysierte Quecksilbergehalt der Probenahmestelle ST30_A lag über dem PW a. An der Probenahmestelle ST30_B wurde Naphthalin mit einem Gehalt über dem PW a nachgewiesen. (Döberl 2012)

Aus den beiden Probenahmestellen ST30_A und ST30_B wurden Bodenproben mit einem Volumen von zwei 10-l-Kübeln aus einer Tiefe von 0 – 0,2 m uGOK mittels Schaufel entnommen. Bei beiden entnommenen Proben wurden keinerlei Besonderheiten bezüglich Geruchs oder Farbe festgestellt. Die Konsistenz war trocken und inhomogen (Wurzeln, Laub, Steine, Abfallreste wie Glas, Zigaretten). Diese Informationen wurden im

Probenahmeprotokoll festgehalten. Die wichtigsten Daten sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

Tabelle 29 Zusammenfassende Eckdaten der Probenahme auf der ST30.

Termin der Probenahme	05.03.2021, 9:00 Uhr
Witterung	Trocken
Entnommenes Probenvolumen	2 x 10-l-Kübel ST30_A 2 x 10-l-Kübel ST30_B
Entnahmegesetz	Schaufel
Entnahmetiefe	0 – 0,2 m
Beschreibung der Probe	inhomogen, keine sonstigen Auffälligkeiten

Altablagerung N82: Glanzstoff – Traisenau

Auf der N82 erfolgte die Probenahme im östlichen Bereich (Abbildung 213). Das blau umrandete Areal im Google Maps Luftbild stellt grob die Gesamtfläche der N82 dar.

Abbildung 213 Probenahmestelle N82



Laut Untersuchungen des Umweltbundesamtes gab es an dieser Probenahmestelle sehr oberflächennah Überschreitungen des Prüfwertes PW a laut ÖNORM S 2088-1 von Ar, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn, KW und PAK_{ges.}, (Valtl, 2016).

Die aus Tiefenlagen von 0,05 – 0,5 m uGOK entnommene Bodenprobe wurde in insgesamt sechs 10-l-Kübel überführt. Bei den Arbeiten wurde ein modriger bis süßlicher Geruch wahrgenommen. Da der Boden sehr feucht war, wurde die Mindestprobenmenge von vier auf sechs 10-l-Kübel erhöht. Eine weitere Auffälligkeit waren einige Ansammlungen kleiner Glasfläschchen. Die wichtigsten Daten der Probenahme sind in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30 Zusammenfassende Eckdaten der Probenahme auf der N82.

Termin der Probenahme	15.04.2021, 11:00 Uhr
Witterung	trocken
Entnommenes Probenvolumen	6 x 10-l-Kübel
Entnahmegesetz	Schaufel
Entnahmetiefe	0,05 – 0,5 m
Beschreibung der Probe	Süßlicher bis modriger Geruch, sehr lockerer Boden, große Ansammlungen von kleinen Glasfläschchen

Altablagerung ST32: Halde Schrems

Die Probenahmestelle auf der ST32 wurde durch Sanierungstätigkeiten der Firma UTC freigelegt. Die genaue Lage der Altlast wird in Abbildung 214 dargestellt und als ST32 bezeichnet. Die Grenzen der Altlast sind nicht eingezeichnet, da die Abbildung (Google Maps Luftbild) nur einen kleinen Ausschnitt der ST32 zeigt.

Abbildung 214 Probenahmestelle ST32



An der Probenahmestelle wurden laut früherer Untersuchungen des Umweltbundesamtes Überschreitungen des Richtwertes ÖNORM S 2088-2 für die Nutzung Wohnen für Pb, Cd, As, Hg und Cr festgestellt (Döberl, 2019)

Am Tag der Probenahme sorgte Regen für eine feuchte Konsistenz der Feststoffprobe. Da die Probenahmestelle hanglagig situiert war, erfolgte die Entnahme mittels Handschaufel und Doppelhacke (Abbildung 215). Aus Tiefenlagen von circa 0,05 – 0,4 m uGOK wurden Bodenproben mit einem Volumen von zehn 10-l-Kübeln entnommen. Die Farbe der Bodenbereiche wechselten zwischen hell- bis dunkelbraun mit zwischengelagerten Gesteinsschichten. Besondere Auffälligkeiten sind nicht dokumentiert worden. Die wichtigsten Daten der Probenahme sind in Tabelle 31 dargestellt.

Abbildung 215 Probenahme ST32.



Tabelle 31 Zusammenfassende Eckdaten der Probenahme auf der ST32.

Termin der Probenahme	17.05.2021, 9:30 Uhr
Witterung	nass
Entnommenes Probenvolumen	10 x 10-l-Kübel
Entnahmegerät	Handschaufel, Doppelhacke
Entnahmetiefe	0,05 – 0,4 m
Beschreibung der Probe	feuchte Konsistenz, dunkel- bis hellbraune Bereiche, stellenweise Ansammlung von Steinen

Altstandort K29 BBU Miniumfabrik Saag

Die Probenahmestelle ist in Abbildung 216, als K29 bezeichnet, im Google Maps Luftbild der Altlast dargestellt. Das blau umrandete Areal stellt grob einen Teilbereich der K29 dar.

Abbildung 216 Probenahmestelle K29



An der Probenahmestelle wurden laut früheren Untersuchungen des Umweltbundesamtes sehr hohe Überschreitungen des Prüfwertes PW a und PW b laut ÖNORM S 2088-1 für Pb und teilweise As festgestellt. (Dörrie 2012)

Die aus Tiefenlagen von 0,05 – 0,45 m uGOK entnommene Bodenprobe ist in insgesamt zehn 10-l-Kübel überführt worden. Auffällig waren teilweise sehr sandige, helle Untergrundbereiche und sehr große Ansammlungen von Steinen. Die Konsistenz der Feststoffprobe war sehr feucht, obwohl die Witterung am Tag der Probenahme trocken war. Aus diesen Gründen wurden insgesamt zehn 10-l-Kübel an Probenmaterial entnommen. Die wichtigsten Daten der Probenahme sind in Tabelle 32 zusammengefasst.

Tabelle 32 Zusammenfassende Eckdaten der Probenahme auf der K29

Termin der Probenahme	31.03.2021, 10:00 Uhr
Witterung	trocken
Entnommenes Probenvolumen	10 x 10-l-Kübel
Entnahmegesetz	Schaufel, Erdbohrer
Entnahmetiefe	0,05 – 0,45 m
Beschreibung der Probe	stark inhomogen, Ansammlungen von Steinen, stellenweise hellere, sandige Bereiche

5.1.5 Untersuchungen zur Chemie, Mineralogie und Schwermetallmobilität

Das entnommene Probematerial wurde homogenisiert und bei 2 mm gesiebt. Die Fraktion größer 2 mm, im Nachstehenden als > 2 mm bezeichnet, wurde verworfen, da mineralogisch-geochemische Prozesse an der Grenzfläche zwischen Festkörpern und wässrigen Lösungen auftreten und grobkörnige Materialien aufgrund ihrer geringen spezifischen Oberfläche nur unwesentlich zu diesen Prozessen beitragen. Zudem sind in dieser Fraktion vielfach Störstoffe wie Pflanzenteile vertreten, die nicht Träger der Kontamination sind und nachfolgende chemische und mineralogische Untersuchungen stören.

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung erfolgte bei der CRB GmbH mittels semiquantitativer Röntgenfluoreszenzanalyse aus dem Pulverpressling gem. CRB PA03:2013-09 (unter Berücksichtigung der Vorgaben der DIN 51001:2003-08 und DIN 51418-2:2015-03) auf 71 Elemente. Die Glühverlustbestimmung wurde gem. DIN EN ISO 26845:2008-06 bei 1.025°C, abweichend von der Norm als Einzelbestimmung, vorgenommen. Bezugsbasis der Analyse war die Trockensubstanz (105°C).

Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Proben ist in Tabelle 33 dargestellt. Umweltrelevante Elemente sind rot hervorgehoben. Die Probe von der Altlast ST30 enthält 0,051 % Cr₂O₃ bzw. 350 mg/kg Cr, was im Rahmen der früheren Untersuchungen dieses Standorts liegt. Die Probe der Altlast ST 32 enthält 0,047 % CuO, die Probe der Altlast N82 sogar 1,15 % CuO, während in früheren Elementen der Prüfwert a (100 mg/kg Cu) nicht oder kaum überschritten wurde. Dies kann entweder auf die Heterogenität des kontaminierten Bodens oder auf eine zumindest partielle Unlöslichkeit von Kupfer in dem

in früheren Studien verwendeten Aufschlussverfahren zurückgeführt werden. Diese beiden Proben sind auch durch erhöhte ZnO-Gehalte von 0,589 % (ST32) bzw. 0,276 % (N82) gekennzeichnet. Für beide Proben liegt dieser Wert, der einer Zn-Konzentration von rund 4.700 mg/kg bzw. 2.200 mg/kg entspricht, im oberen Bereich der früheren Analysen, wobei wiederum der Effekt des Aufschlusses im Vergleich zur direkten Messung am Pulverpressling beachtet werden muss. Die Tatsache, dass Arsen mittels RFA in keiner der Proben nachgewiesen werden konnte, obwohl die historischen Analysen der Altlasten K29 und ST32 durchaus Belastungen zeigten, ist auf die Nachweisgrenze der RFA von 0,025 % As₂O₃ bzw. 190 mg/kg zurückzuführen. Ebenso sind diese beiden Proben durch erhöhte PbO-Gehalte (1,32 % in ST32; 0,46 % in N82) gekennzeichnet, was ebenfalls im Bereich der historischen Analysen liegt.

Tabelle 33 Chemische Analysen der Bodenproben

Chemische Komponente	Einheit	Probe 0473-21 (ST30)	Probe 1244-21 (ST32)	Probe 0966-21 (N82)	Probe 0926-21 (K29)	Probe 0986-21 (Poschacher)
F	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Cl	Ma%	0,034	<0,025	0,025	<0,025	<0,025
Na ₂ O	Ma%	1	0,27	0,2	0,9	1,97
MgO	Ma%	3,05	1,82	4,85	6,18	4,47
Al ₂ O ₃	Ma%	11,14	11,74	7,76	7,57	14,19
SiO ₂	Ma%	51,51	38,19	28,82	38,87	59,37
P ₂ O ₅	Ma%	0,57	1,71	0,335	0,205	0,479
SO ₃	Ma%	0,45	0,61	0,71	0,2	0,15
K ₂ O	Ma%	1,75	2,85	0,95	1,21	2,22
CaO	Ma%	5,53	8,75	12,2	18,72	2,69
Sc ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
TiO ₂	Ma%	0,809	1,87	0,341	0,425	0,616
V ₂ O ₅	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Cr ₂ O ₃	Ma%	0,051	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
MnO	Ma%	0,131	0,522	0,089	0,085	0,141
Fe ₂ O ₃	Ma%	5,88	12,63	7,15	3,76	5,62

Chemische Komponente	Einheit	Probe 0473-21 (ST30)	Probe 1244-21 (ST32)	Probe 0966-21 (N82)	Probe 0926-21 (K29)	Probe 0986-21 (Poschacher)
CoO	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
NiO	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
CuO	Ma%	<0,025	0,047	1,15	<0,025	<0,025
ZnO	Ma%	0,05	0,589	0,276	<0,025	<0,025
Ga ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
GeO ₂	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
As ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
SeO ₂	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Br	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Rb ₂ O	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
SrO	Ma%	<0,025	0,027	0,026	<0,025	<0,025
Y ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
ZrO ₂	Ma%	0,025	0,038	0,045	0,063	0,038
Nb ₂ O ₅	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
MoO	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Ru	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Rh	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Pd	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Ag	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Re	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Os	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Ir	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Pt	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Au	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
CdO	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
In ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
SnO ₂	Ma%	<0,025	<0,025	0,03	<0,025	<0,025

Chemische Komponente	Einheit	Probe 0473-21 (ST30)	Probe 1244-21 (ST32)	Probe 0966-21 (N82)	Probe 0926-21 (K29)	Probe 0986-21 (Poschacher)
Sb₂O₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
TeO ₂	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
I	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Cs ₂ O	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
BaO	Ma%	0,034	1,02	0,075	<0,025	0,048
La ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Ce ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Pr ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Nd ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Sm ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Eu ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Gd ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Tb ₄ O ₇	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Dy ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Ho ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Er ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Tm ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Yb ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Lu ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
HfO ₂	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Ta ₂ O ₅	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
WO ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
HgO	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Ti ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
PbO	Ma%	<0,025	1,32	0,48	0,036	<0,025
Bi ₂ O ₃	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
ThO₂	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025

Chemische Komponente	Einheit	Probe 0473-21 (ST30)	Probe 1244-21 (ST32)	Probe 0966-21 (N82)	Probe 0926-21 (K29)	Probe 0986-21 (Poschacher)
U_3O_8	Ma%	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
LOI	Ma%	17,91	15,91	34,44	21,67	7,86

Der Mineralbestand der Proben wurde am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Graz mittels Röntgendiffraktometrie untersucht (Abbildungen 217 bis 220). Die Messung (Co $K\alpha$ -Strahlung (1,78901 Å, Schrittweite 0,008° 2 θ , Messzeit pro Schritt: 40 s, Probenrotation) erfolgte mit einem Panalytical X'Pert Pro, die Auswertung mit der Software X'Pert HighScore Plus, die Darstellung der Ergebnisse mittels Microsoft Excel.

Es zeigt sich, dass Quarz (SiO_2) in den ausgewerteten Proben (ST32, N82, K29, Poschacher) die Hauptphase darstellt, gefolgt von anderen gesteinsbildenden Mineralen wie Schichtsilikaten (ST32), den Karbonaten Calcit ($CaCO_3$) und Dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) (N82, K29) und Feldspäten (ST32, Poschacher). Umweltrelevante Elemente sind laut Röntgendiffraktometrie in der Probe ST32 in Form eines Zink-Mangan-Sulfids ($(ZnMn)S_2$) sowie von Stolzit ($PbWO_4$) und einem Kupfer-Chrom-Phosphat ($Cu_3Cr_4(PO_4)_6$) in der Probe N82 gebunden.

Abbildung 217 Röntgendiffraktogramm der Probe der Altlast ST32

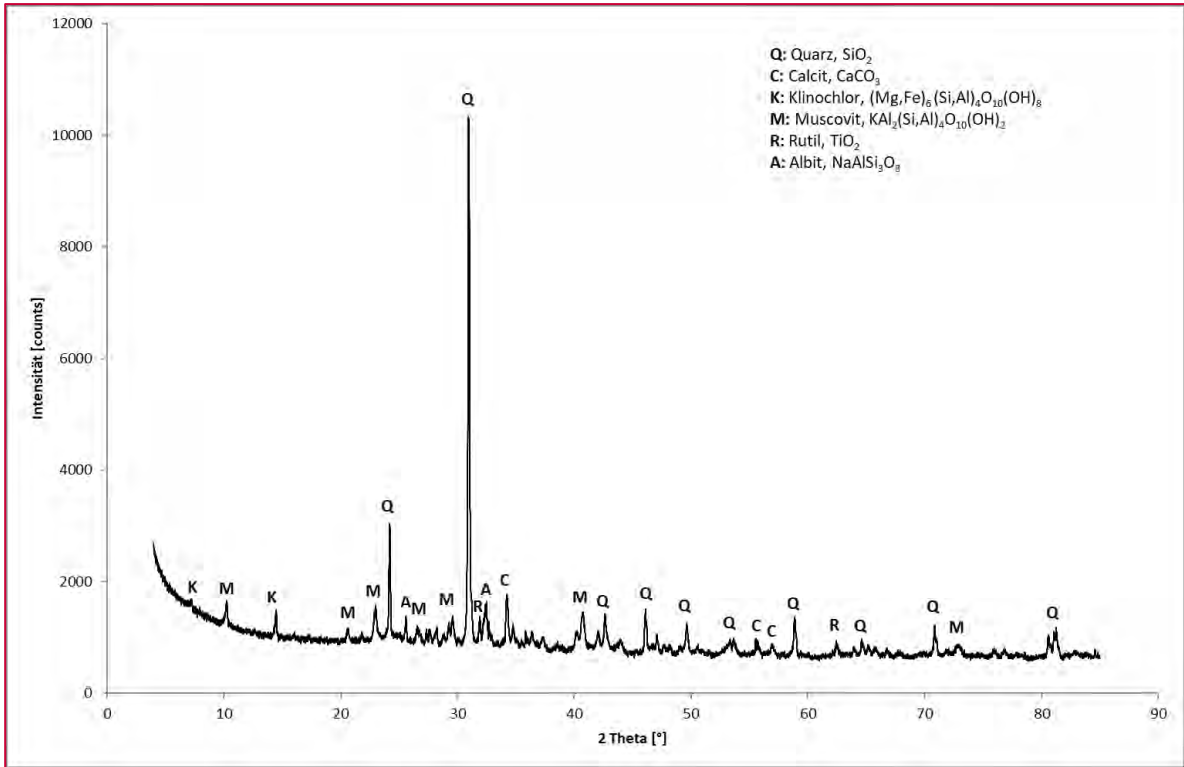


Abbildung 218 Röntgendiffraktogramm der Probe aus der Altlast N82

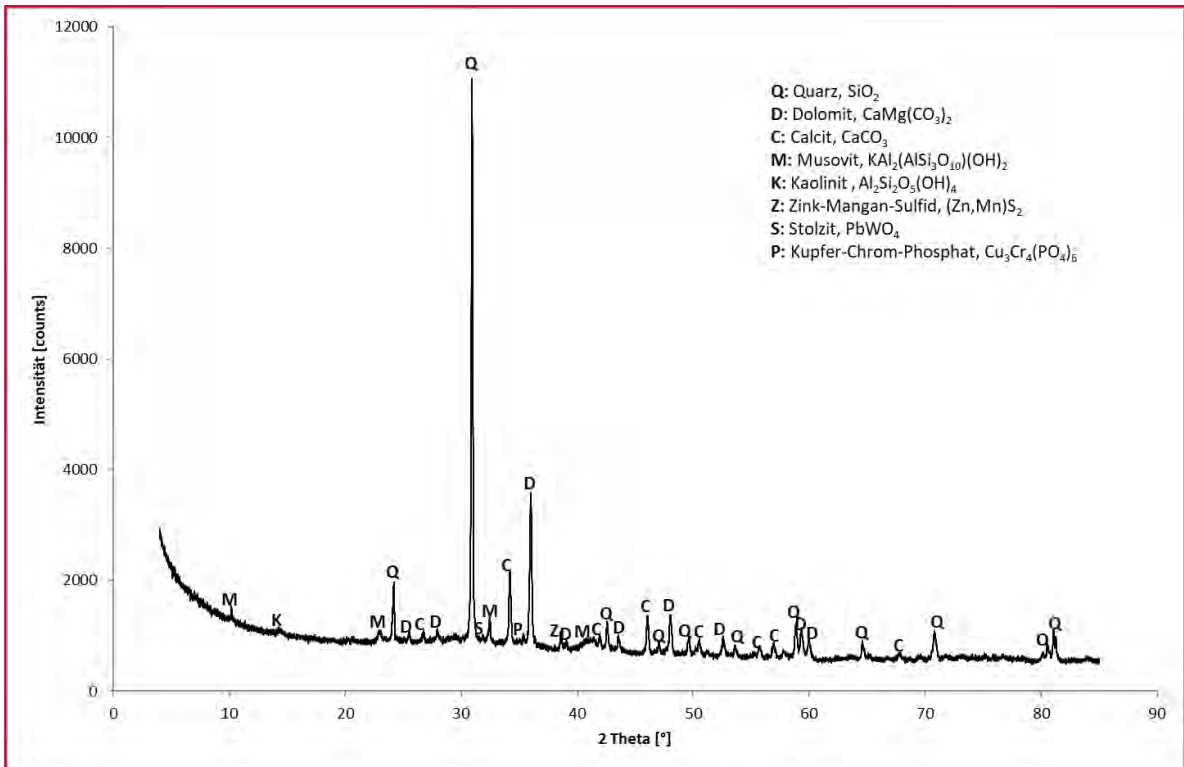


Abbildung 219 Röntgendiffraktogramm der Probe aus der Altlast K29

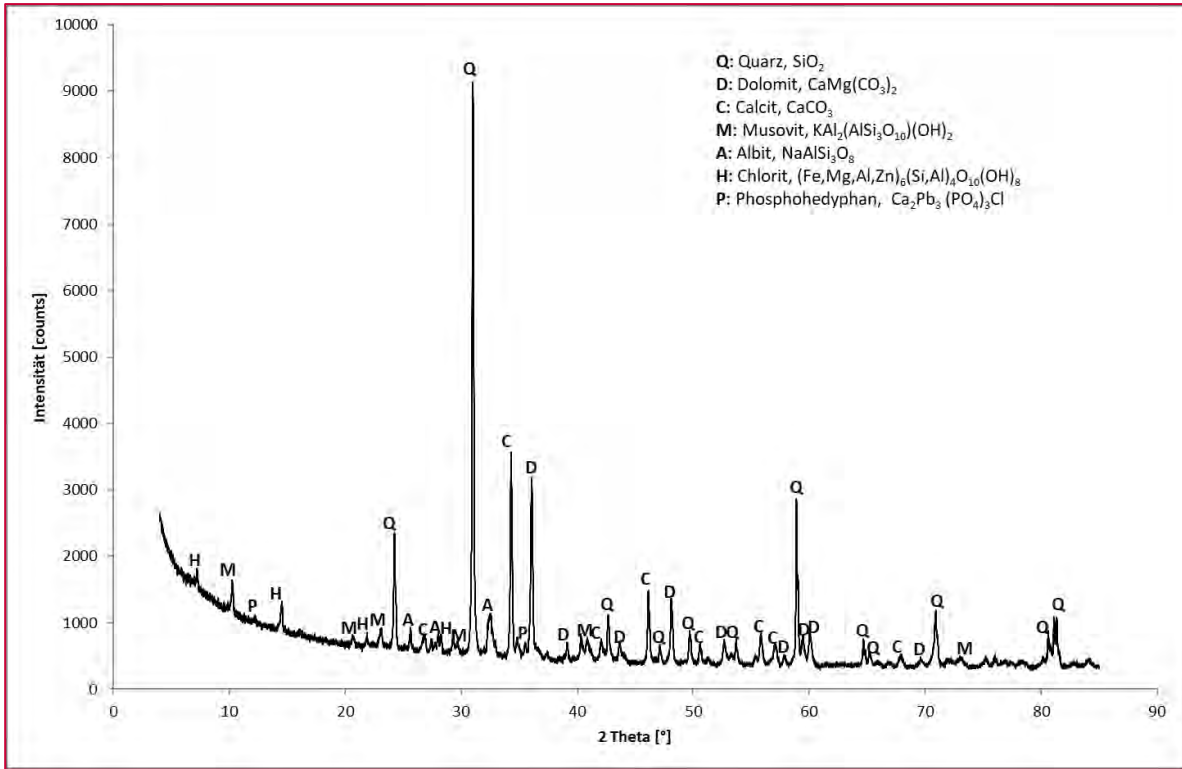
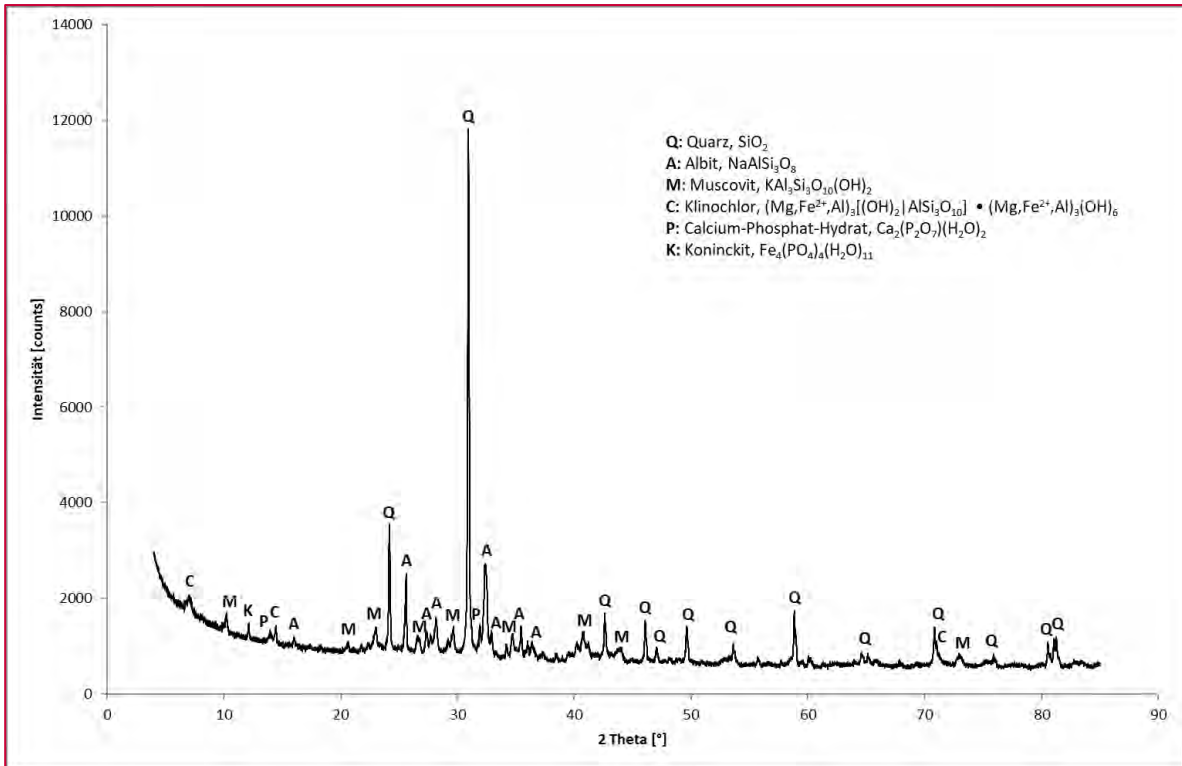


Abbildung 220 Röntgendiffraktogramm der Probe „Poschacher“



Die Bindungsform der umweltrelevanten Elemente wurde am Lehrstuhl für Rohstoffmineralogie der Montanuniversität Leoben mittels Elektronenstrahlmikrosonde (Superprobe JEOL JXA 8200) aufgeklärt.

5.2 Mineralogie und Mobilität von Schwermetallen nach der thermischen Behandlung von Böden

5.2.1 Zweck der thermischen Behandlung

Die thermische Behandlung mit bis zu 500 °C der Bodenproben wurde mit dem Ziel vorgenommen, die Auswirkung der Erwärmung des Probematerials auf die Mobilität von Schwermetallen zu untersuchen. Unter Mobilität wird hierbei der Übergang der untersuchten Schadstoffe aus der Bodenmatrix in die wässrige Phase verstanden.

Bei der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung werden Heizlanzen verbaut, die, je nach Abstand zur Heizlanze, Temperaturen im Bodenkörper von rund 100 °C bis etwa 500 °C erzeugen. Daher wurden zur Simulation dieser Bedingungen im Labormaßstab von den in Kap. 5.1.3 beschriebenen Altlasten entnommen Bodenmaterial Proben angefertigt und bei drei definierten Temperaturen (105 °C, 300 °C, 500 °C) einer thermischen Behandlung unterzogen. Jeweils eine Probe wurde bei 20 °C temperiert und diente als Referenz.

5.2.2 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Für die thermischen Behandlungsversuche wurde – ebenso wie für die Charakterisierung der Ausgangsmaterialien – nur die Fraktion < 2 mm verwendet. Eine Trocknung des Probenmaterials wurde nur für die Altlastprobe ST32 durchgeführt, da wegen regnerischer Wetterverhältnisse am Tag der Probenahme diese Feststoffprobe einen sehr hohen Wassergehalt aufwies.

Die Proben wurden für jeweils sieben Tage folgenden thermischen Behandlungen unterzogen:

- 105 °C im Trockenschrank;
- 300 °C im Muffelofen;
- 500 °C im Muffelofen.

Da das zur Verfügung stehende Probenvolumen bei den beiden eingesetzten Muffelöfen für einen vollständigen Temperaturversuch nicht ausreichend groß war, wurden mehrere Teilversuche pro Temperatur durchgeführt.

Die Mindestprobenmenge pro Temperaturversuch, um anschließend pH-abhängige Elutionsversuche durchführen zu können, betrug 2,97 kg. Die Probengefäße, die für die Muffelöfen verwendet wurden, fassten ein Volumen von durchschnittlich ca. 820 cm³. Je nach Schüttdichte, die schätzungsweise zwischen 0,7 bis 1,2 g/cm³ liegt, beträgt die maximal zu behandelnde Probemenge bei 574 g – 984 g. Die Versuchsdauer bewegt sich somit zwischen 3 – 6 Wochen für eine Bodenprobe und einen Temperaturversuch.

5.2.3 Probencharakterisierung - Versuchsschema

Die Abbildungen 221 bis 225 zeigen das Versuchs- und Analyseschema, nach dem das Probematerial charakterisiert wurde. Einen Überblick über die erhaltenen Teilproben liefert Tabelle 34.

Abbildung 221 Analysenschema K29 < 2 mm

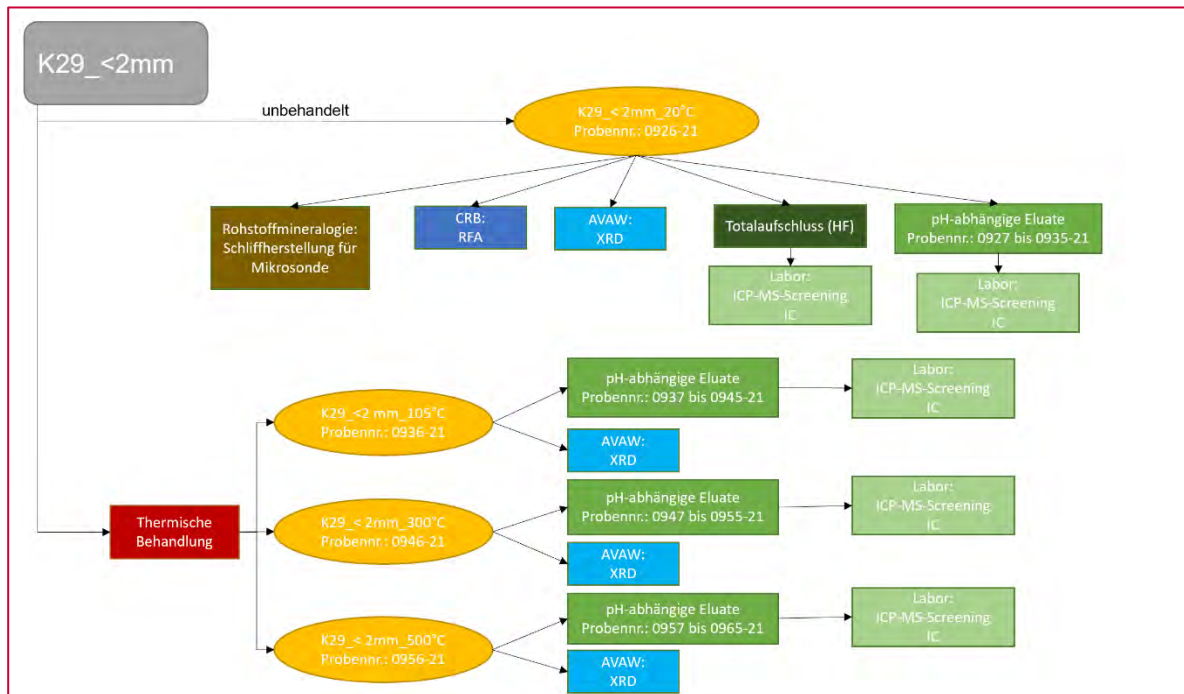


Abbildung 222 Analysenschema N82 < 2 mm

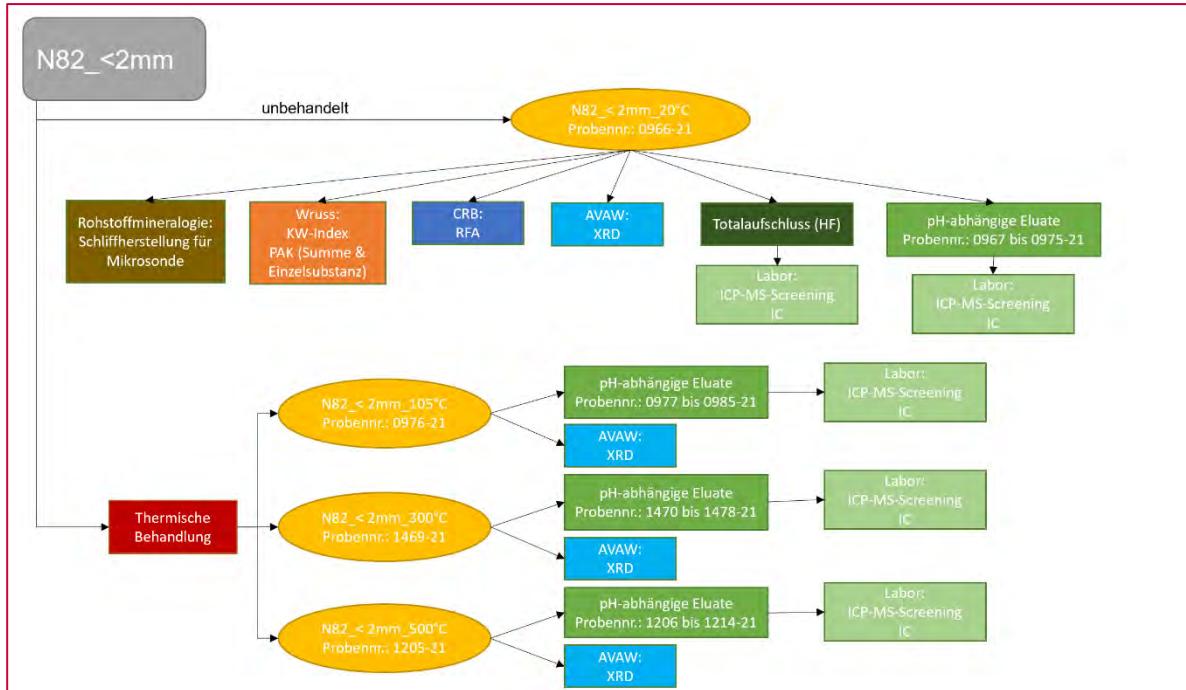


Abbildung 223 Analysenschema Poschacher < 2 mm

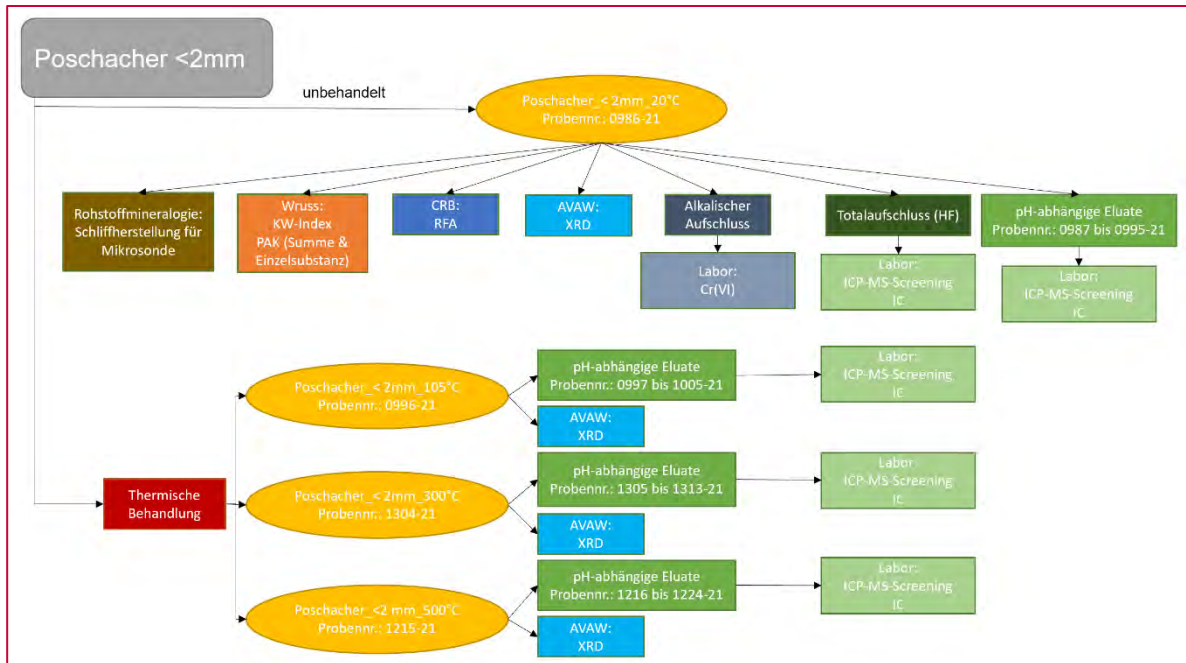


Abbildung 224 Analysenschema ST30 < 2 mm

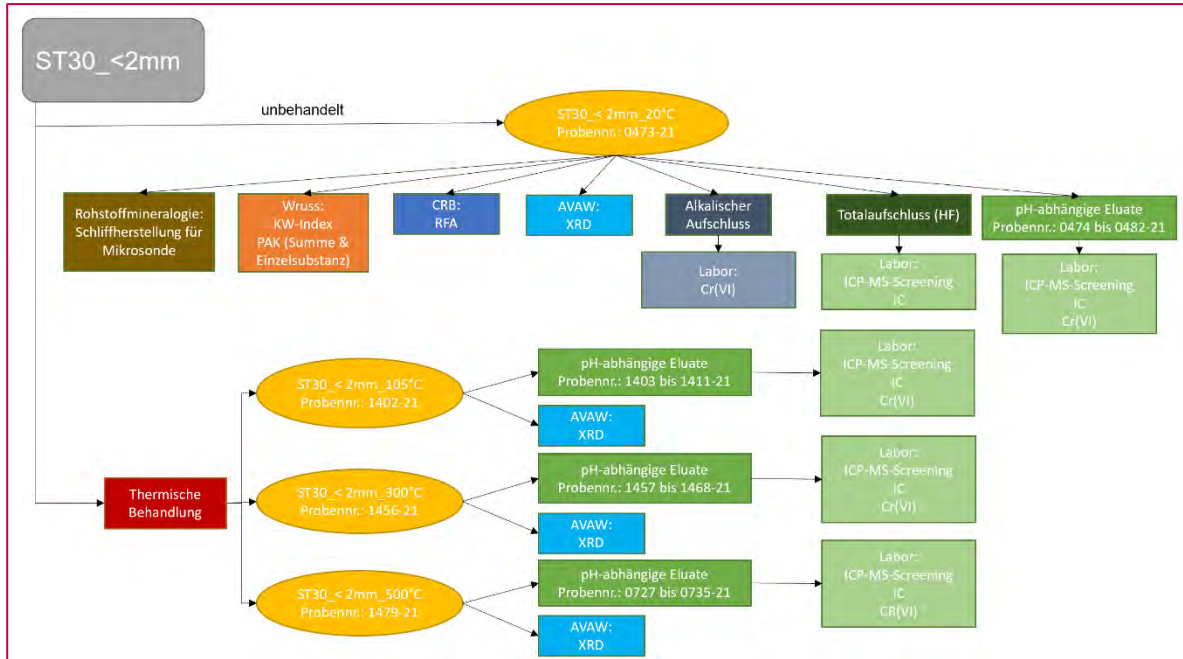


Abbildung 225 Analysenschema ST32 < 2 mm

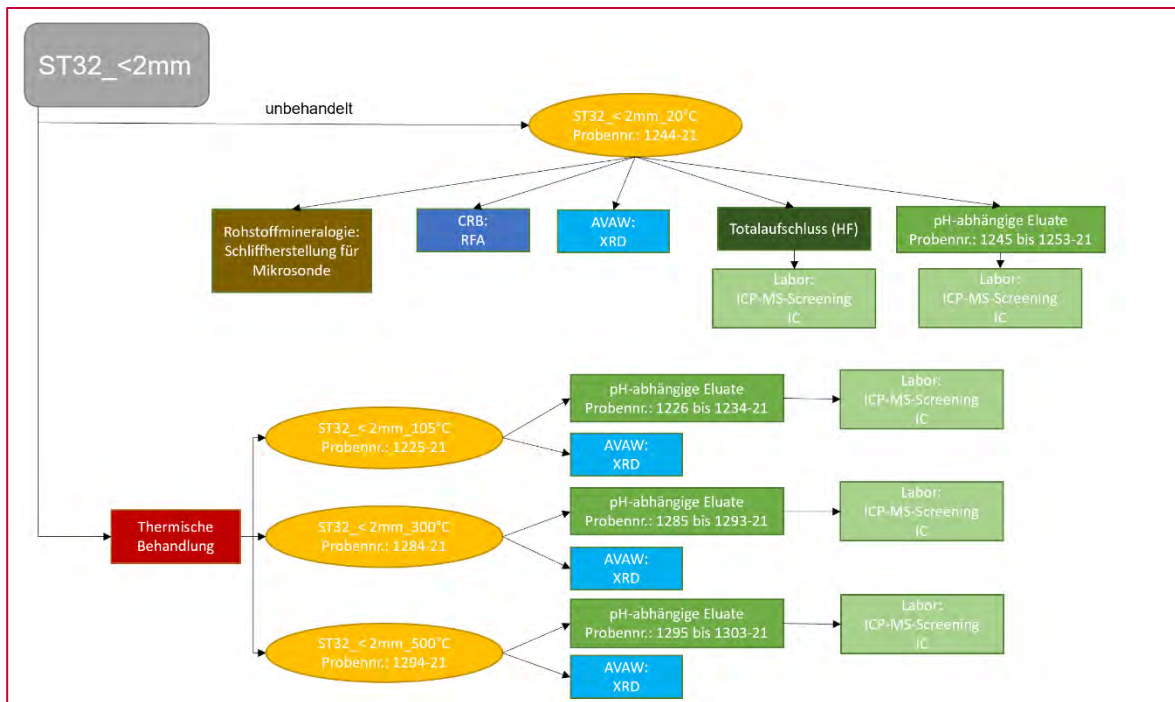


Tabelle 34 Probenbezeichnungen der unbehandelten und behandelten Proben

Herkunft	Probenbezeichnung	
	Thermisch unbehandelt	Thermisch behandelt (105 °C, 300 °C und 500 °C)
Altlast ST30	ST30 < 2 mm 20 °C	ST30_< 2 mm_105 °C ST30_< 2 mm_300 °C ST30_< 2 mm_500 °C
Altlast N82	N82 < 2 mm 20 °C	N82_< 2 mm_105 °C N82_< 2 mm_300 °C N82_< 2 mm_500 °C
Altlast ST32	ST32 < 2 mm 20 °C	ST32_< 2 mm_105 °C ST32_< 2 mm_300 °C ST32_< 2 mm_500 °C
Altlast K29	K29 < 2 mm 20 °C	K29_< 2 mm_105 °C K29_< 2 mm_300 °C K29_< 2 mm_500 °C
Firma Poschacher	Poschacher < 2 mm_20 °C	Poschacher_< 2 mm_105 °C Poschacher_< 2 mm_300 °C Poschacher_< 2 mm_500 °C

5.3 Versuchsergebnisse nach thermischer Behandlung

In Tabelle 35 ist die Massenentwicklung des Probematerials infolge der thermischen Behandlung zusammengefasst. Auffällig ist, dass v.a. in den Feststoffproben ST30 und N82, die neben Schwermetallen auch organische Kontaminationen enthalten, der Massenverlust deutlich höher ausgefallen ist. Diese Tatsache lässt sich unter anderem auf die Volatilisierung organischer Schadstoffe in die Umgebungsluft erklären.

Tabelle 35 Massenbilanz der thermischen Behandlung

Probe	Behandlungstemperatur								
	105 °C			300 °C			500 °C		
	Probenmasse vorher [kg]	Probenmasse nachher [kg]	Masse-Verlust [%]	Probenmasse vorher [kg]	Probenmasse nachher [kg]	Masse-Verlust [%]	Probenmasse vorher [kg]	Probenmasse nachher [kg]	Masse-Verlust [%]
Altlast ST30	2,31944						3,2245	1,4592	54,7
Altlast N82	2,54378	1,54694	39,2				3,0835		
Altlast ST32	2,26537	1,83997	18,8	2,51950					
Altlast K29	2,38792	2,00990	15,8	2,31830	1,90120	18,0	2,3984	1,6475	31,3
Firma Poschacher	2,38892	1,96854	17,6	2,3134	1,90580	17,6	2,4887	1,8821	24,4

Die nachstehenden Abbildungen 226, 227 und 228 zeigen beispielhaft die optischen Unterschiede vor und nach der thermischen Behandlung der Probe ST32. Zwischen 105 und 300 °C kommt es zu einer Rotfärbung der Bodenprobe, was sich auf eine Oxidation von Fe(II) zu Fe(III) zurückführen lässt. Eisen liegt in dieser Probe zunächst in Form von Klinochlor, einem Vierschichtsilikat, vor, das Fe(II) in seiner Oktaederschicht einbaut. Daraus ergibt sich die Frage, wie sich die thermische Behandlung und die Oxidation des Eisens auf die Stabilität dieser Mineralphase auswirkt.

Abbildung 226 Vor (links) und nach (rechts) thermischer Behandlung, ST32 mit 105 °C



Abbildung 227 Vor (links) und nach (rechts) thermischer Behandlung, ST32 mit 300 °C

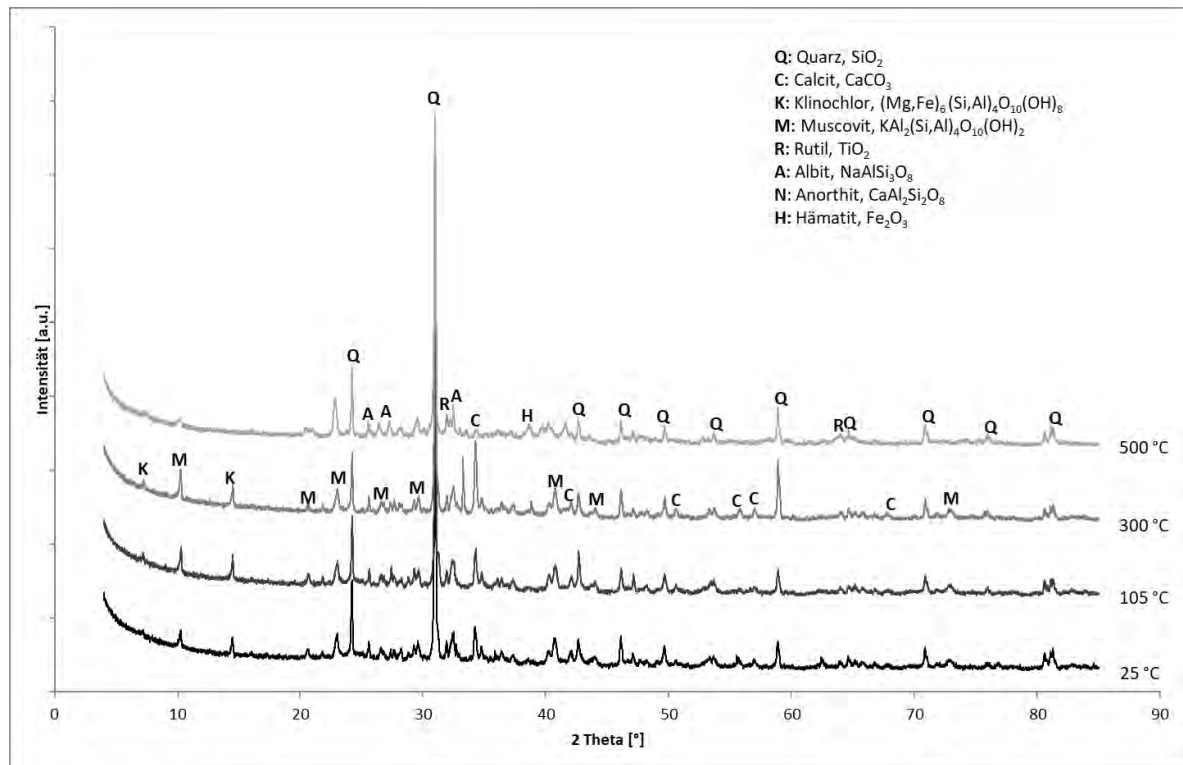


Abbildung 228 Vor (links) und nach (rechts) thermischer Behandlung, ST32 mit 500 °C



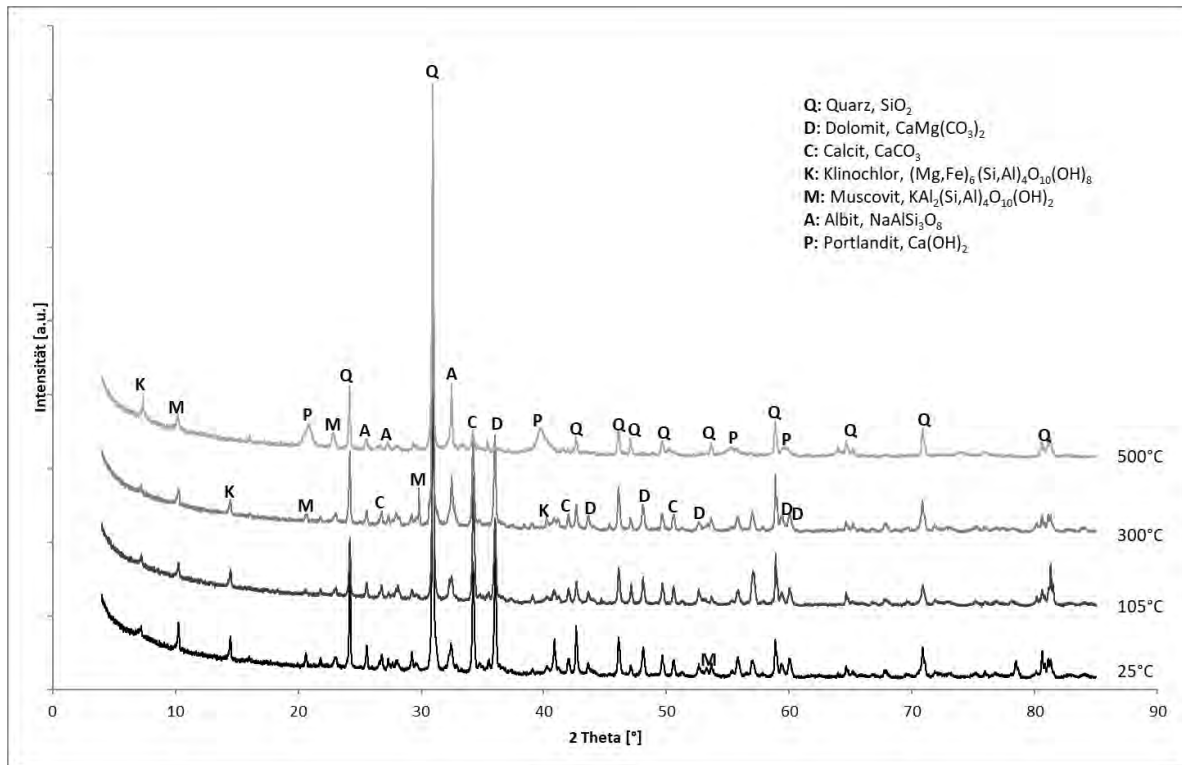
Die Ergebnisse der röntgendiffraktometrischen Untersuchungen zeigen, dass es in der Probe ST32 oberhalb von 300 °C zu einer Zersetzung von Muscovit ($KAl_2[(OH, F)_2]AlSi_3O_{10}]$), Calcit ($CaCO_3$) und Klinochlor kommt (Abbildung 229). Oberhalb von 105 °C kommt es zudem zur Bildung von Hämatit (Fe_2O_3), was mit der Rotfärbung der Proben gut korreliert. Es kann somit gefolgert werden, dass die Erhitzung des Bodens zu einer Oxidation des Eisens und nachfolgend zum Zusammenbruch der Chlorit-Struktur führt, wobei das freigewordene Eisen dann Hämatit bildet. Sowohl Schichtsilikate als auch Eisenhydroxide spielen eine große Rolle hinsichtlich der Sorption von Schwermetallen, unterscheiden sich aber hinsichtlich ihrer Sorptionseigenschaften.

Abbildung 229 Röntgendiffraktogramme der Probe ST32 als Funktion der Temperatur



In Probe K29 (Abbildung 230) kommt es oberhalb von 300 °C zu einer Zersetzung von Calcit und Dolomit. Bei 500 °C tritt dann Portlandit, $Ca(OH)_2$, im Diffraktogramm auf. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich im thermischen Behandlungsversuch durch den Kalzinierungsprozess zunächst Freikalk, CaO , gebildet hat, der dann beim Abkühlen und beim Kontakt mit der Luftfeuchtigkeit zu Portlandit reagiert hat. Es ist zu erwarten, dass sich beim Kontakt des thermisch behandelten Bodens mit wässrigen Lösungen ein höherer pH-Wert einstellt, als dies bei der Reaktion mit unbehandelten Böden der Fall ist. Dies wiederum sollte dann Auswirkungen auf die Mobilität von Schwermetallen haben.

Abbildung 230 Röntgendiffraktogramme der Probe K29 als Funktion der Temperatur



Da schwermetallhaltige Phasen nur in Konzentrationen im Bereich oder unterhalb der Nachweisgrenze der Röntgendiffraktometrie (2 Masse-%) auftreten, wurden an einer mit 105 °C und einer mit 500 °C behandelten Probe aus der Altlast K29 Untersuchungen mittels Elektronenstrahlmikrosonde durchgeführt. Dabei wurden mit einer 950-fachen Vergrößerung in einem typischen Bereich der Probe mit einer Größe von ca. 100 x 100 µm Elementverteilungskarten von Na, Mg, K, Ca, Pb, Al, As, Zr, Fe, P, O, Si, Ti und S aufgenommen (Abbildung 231). Dabei zeigte sich ein unregelmäßig geformter Pb-reicher Partikel mit einer Größe von ca. 25 µm. Der Röntgendiffraktometrie zufolge sollte Pb in dieser Probe als Phosphohedyphan ($\text{Ca}_2\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$) auftreten. Auch die Elementverteilungskarten wiesen eine Korrelation mit Phosphor sowie teilweise mit Calcium auf. Ein energiedispersives Röntgenspektrum (EDX-Spektrum) an dieser Stelle liefert allerdings eine starke Korrelation mit Mangan (

Abbildung 232), welches in der Elementverteilungskarte nicht dargestellt ist. Die Bindung von Blei an Manganhydroxide wäre in Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen an steirischen Böden (Vollprecht et al., 2020). Es erscheint denkbar, dass Phosphohedyphan die Pb-führende Primärphase darstellt, die oberflächlich von einem Film eines Manganhydroxids überzogen ist, so dass die volumensensitive Röntgendiffraktometrie nur die Primärphase, die oberflächensensitive Mikrosonde jedoch ein Mischsignal beider Phasen detektiert.

Abbildung 231 Elementverteilungskarten einer Probe aus der Altlast K29 nach Behandlung mit 105 °C

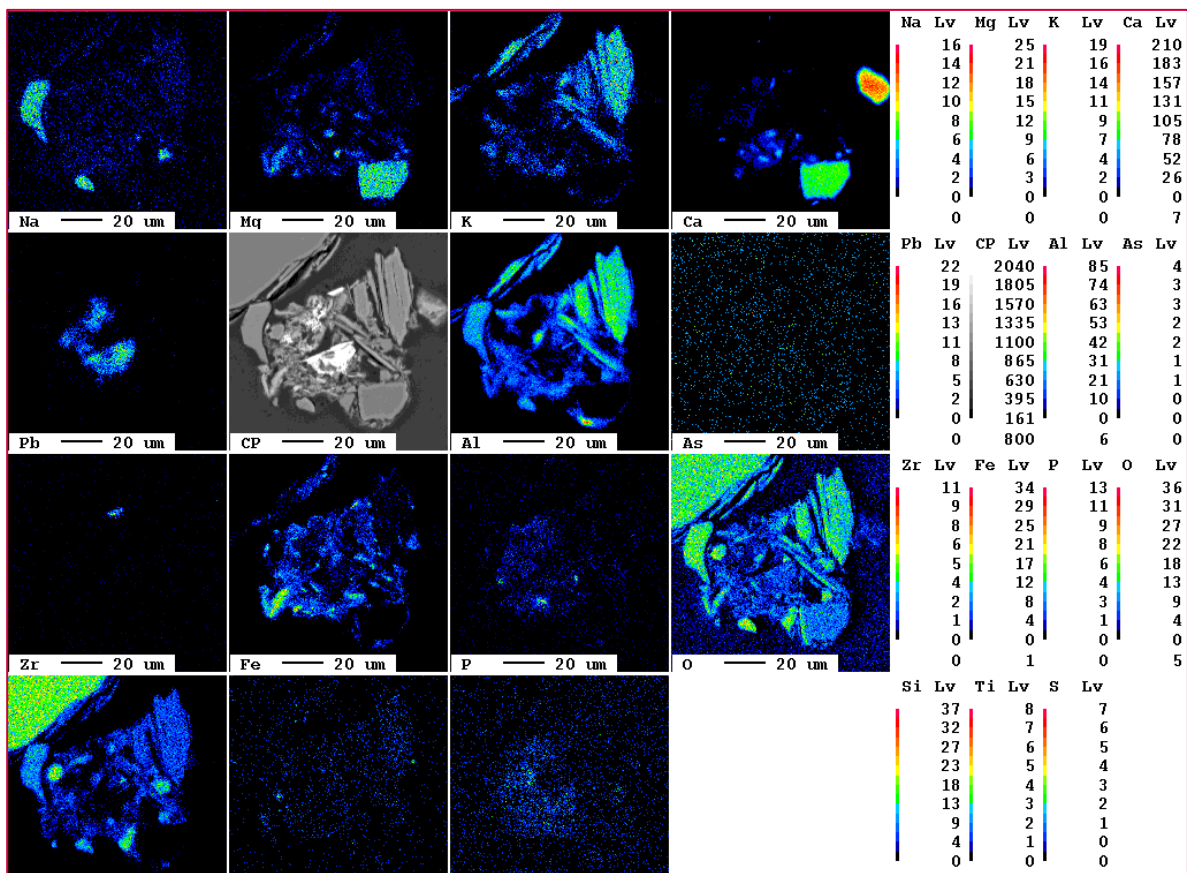
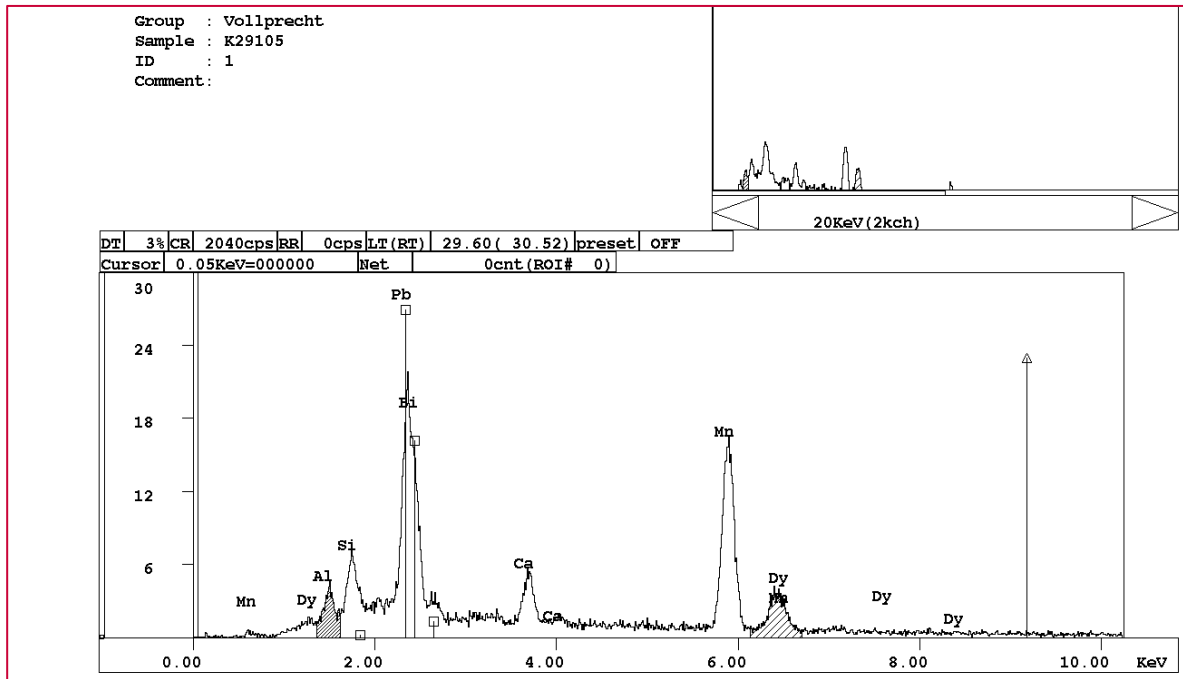


Abbildung 232 SEM-EDX-Spektrum einer Pb-führenden Phase aus der Altlast K29 nach Behandlung mit 105 °C



Die thermische Behandlung der Probe mit 500 °C ändert im Elementverteilungsbild der Probe die Korrelation mit Ca und P nicht, was darauf hinweist, dass die Primärphase Phosphohedyphan erhalten geblieben ist (Abbildung 233). Das EDX-Spektrum am entsprechenden Punkt zeigt jedoch kein Mangan (Abbildung 234). Dies kann damit erklärt werden, dass sich das Manganhydroxid beim Erhitzen zersetzt. Dabei würde das Mangan jedoch in anderer Form zurückbleiben, was an dieser Stelle nicht nachgewiesen werden konnte. Es ist daher auch denkbar, dass der hier betrachtete Partikel nie von einem Mangan-Hydroxid-Film umgeben war.

Abbildung 233 Elementverteilungskarte einer Probe aus der Altlast K29 nach Behandlung mit 500 °C

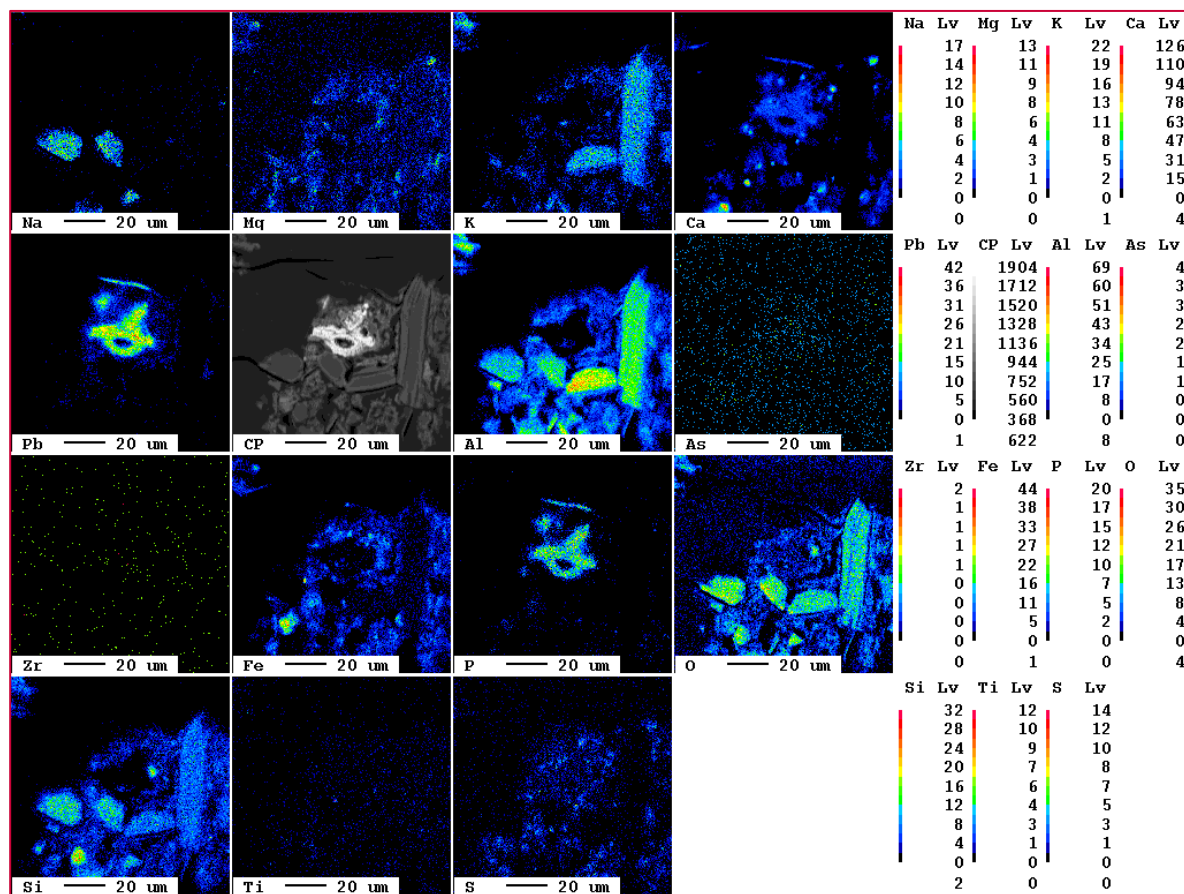
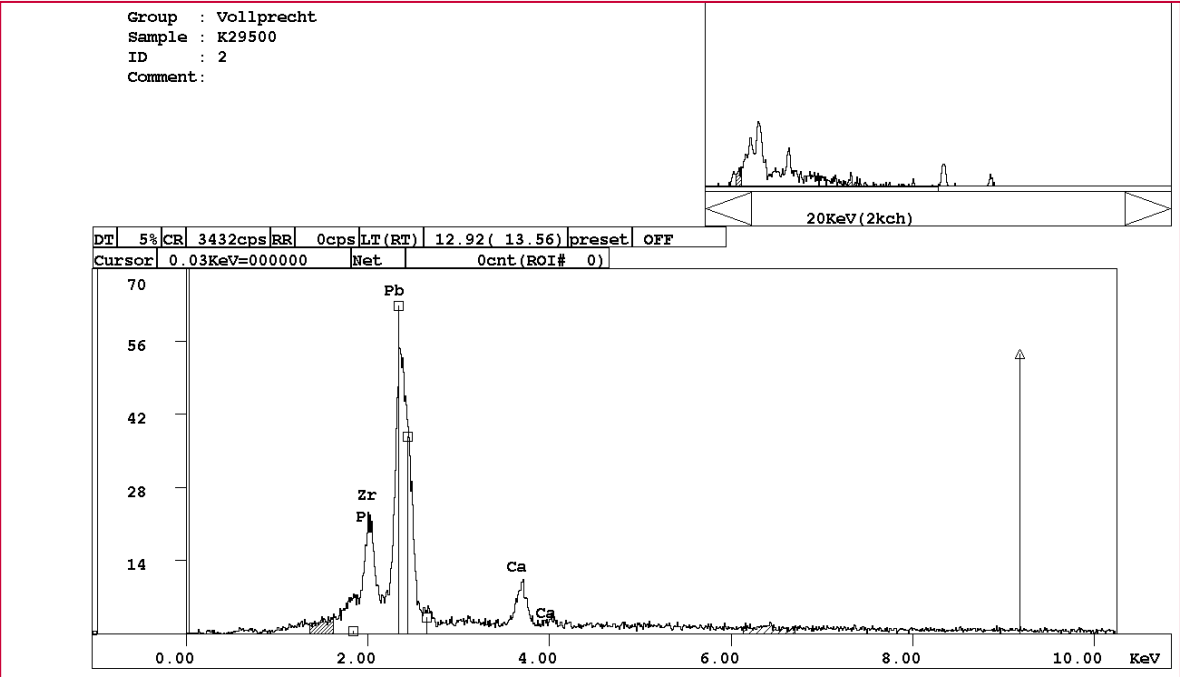


Abbildung 234 SEM-EDX-Spektrum einer Pb-führenden Phase aus der Altlast K29 nach Behandlung mit 500 °C



5.4 Modellierung in LeachXS™ zur Vorhersage von Phasen in Böden

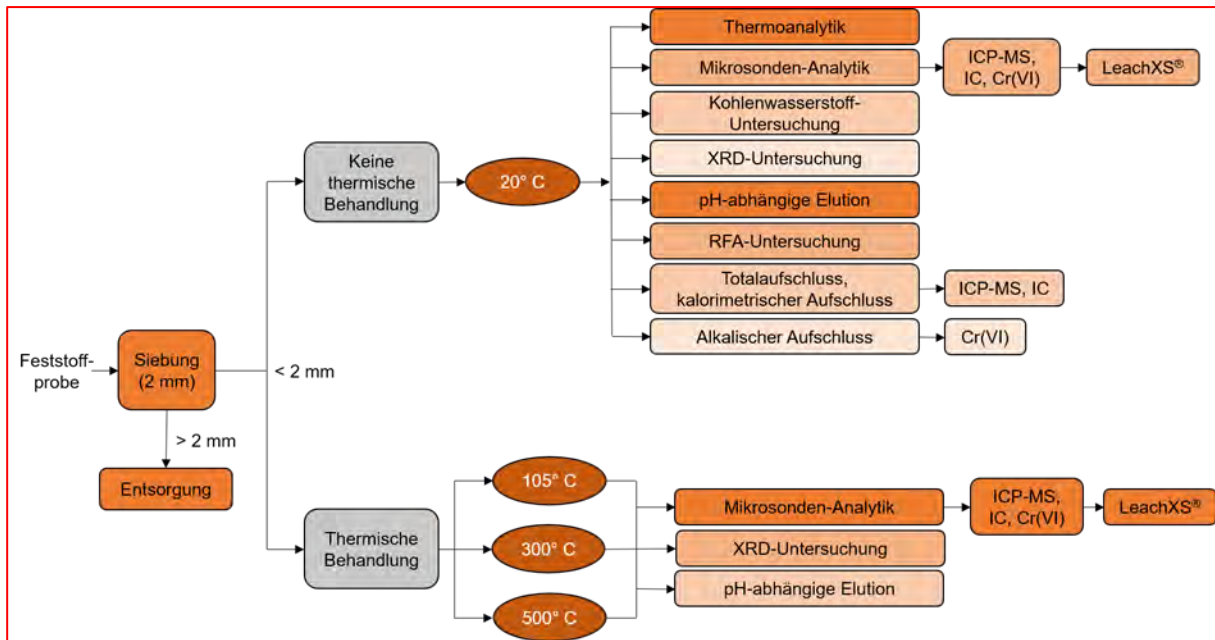
5.4.1 Zweck der Untersuchung in LeachXSTM

Schwermetalle sind neben Chlorkohlenwasserstoffen und Mineralölen eine der am häufigsten auftretenden Verunreinigungen in Altlasten. Semivolatile und volatile organische Schadstoffe können mittels physikalischer Verfahren, wie z.B. der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung, entfernt werden. Schwermetalle bleiben dabei jedoch weiterhin im behandelten Boden. Die Temperaturbelastung beeinflusst die chemische und mineralogische Zusammensetzung sowie die Struktur des Bodens. Es kommt dabei auch zur Änderung des pH-Wertes und des Wasserhaushaltes sowie der mikrobiellen Tätigkeit. Durch den Temperatureinfluss können Schwermetalle auch erneut mobilisiert werden, was möglicherweise dem Sanierungserfolg entgegenwirkt (Berrer 2022).

Fünf Böden unterschiedlicher Bodenarten und -typen von Altlasten, die sowohl organische Kontaminationen als auch Schwermetalle enthielten, wurden beprobt und charakterisiert. Anschließend wurden pH-abhängige Auslaugversuche zur Ermittlung der Schwermetallmobilität durchgeführt.

Mit der Software LeachXS™ wurde der Datensatz aus der Mikrosonden-Analytik ausgewertet, um die Auswirkung der thermischen Behandlung von Böden auf die Schwermetallmobilität zu erfassen (Abbildung 235).

Abbildung 235 Erweitertes Analysenschema mit LeachXS™



Die Modellierungssoftware LeachXS™ bietet eine neue Art der Aufteilung zwischen mineralischen und sorptiven Phasen. Die Software enthält Adsorptionsmodelle für oxidische und organische Oberflächen sowie für festen Phasen (van der Sloot und van Zomeren 2012). Das Programm basiert auf in Auslaugungsversuchen ermittelten Daten zur Freisetzung von Schadstoffen. Diese Versuche schließen Chargen-, Säulen- und Tankversuchen sowie pH-statischen Auslaugungstests ein. LeachXS™ kann zur Charakterisierung von Böden, Schlämmen, Sedimenten, Verbrennungsrückständen, Siedlungsabfällen, Industrie- und gefährliche Abfällen, Bergbauabfällen, Bau- und Abbruchabfällen, behandelten oder stabilisierten Abfällen und zahlreichen anderen Abfällen und Materialien eingesetzt werden (G-MAC und Hjelmars 2014).

Neben LeachXS™ existieren eine Reihe anderer Modellierungsprogrammen zur hydrogeochemischen Charakterisierung, die auf unterschiedliche Datenbanken basieren. Je nach auszuwertendem Abfall- bzw. Materialtyp ist ein entsprechender Spezifikations-Code auszuwählen. Die Datenbank MINTEQA2 bspw. bezieht sich auf mineralische Schlackenphasen (Meima und Comans 1997). CEMDATA07.1 wiederum beinhaltet Mineralien zur Modellierung von Zementabfällen (Martens et al. 2010). LeachXS™ nutzt ORCHESTRA als geochemischen Spezifikations-Code.

5.4.2 Modellierung in LeachXSTM

Die Modellierungsprozess mit LeachXS™ umfasst die Erstellung einer Importdatei mit Eingabeparametern, die hydrogeochemische Modellierung sowie die Ausgabe der Ergebnisse in grafischer und tabellarischer Form. Der einzelnen Arbeitsschritte werden nachfolgend dargestellt.

Erstellung einer Importdatei für LeachXSTM

Für die Dateneingabe sind pH-Wert, Probeneinwaage, Flüssigkeitszugabe sowie die ermittelten Kationen- und Anionenkonzentrationen der untersuchten Schwermetalle aus den Elutionsversuchen erforderlich. Die Ionenkonzentrationen stehen aus den Laborberichten in mg/kg Trockensubstanz zur Verfügung und werden in µg/l für die Importdatei umgerechnet. Liegen die ermittelten Messwerte unter der Nachweisgrenze, wird als Konzentrationswert die halbe Nachweisgrenze angesetzt. Das Extraktionsvolumen beträgt 1.000 ml und die Trockenmasse der Probeneinwaage entspricht 100 g.

Einspielen der Importdatei in LeachXSTM

Die Importdatei kann mit folgenden Schritten in das Programm LeachXS™ überführt werden: "Import or Add New Data" → "Historic Batch, Mass Transport, or Total Content Data" → Auswahl der Importdatei → "A copy of the current database" → "OK" → Zuweisung zu bereits bestehendem oder neuem Projekt.

Modellierungsprozess in LeachXSTM

Nach der erfolgreichen Übertragung der Importdatei kann die Modellierung der Proben gestartet werden. Die Schritte „Advanced Modeling“ → „Equilibrium and Transport Modeling Scenarios“ → „pH Dependence Leaching Test“ → "Start Modeling" führen zur Modellierungsplattform. Die relevanten Menüpunkte gliedern sich dabei in „Model Input“, „Run“ und „Model Results“.

Die gewünschte Probe muss in der Sparte „Model Input“ einerseits unter "Select from Test..." und andererseits unter „Lab Test“ → „Chemical“ → „LeachXS™ Editor“ → „Available Content Options“ aus der Datenbank ausgewählt werden. Im "LeachXS™ Editor" wird unter der „Primary Entity“ PO43- die Komponente PO4 ausgewählt. Zusätzlich kann in diesem Schritt die Menge an Huminsäuren und Eisenhydroxiden während der Modellierung geändert werden. Im Unterpunkt „Extra L/S Simulation“ → „Chemical“ →

„LeachXS™ Editor“ wird das Verhältnis von Extraktionsvolumen zu Trockenmasse auf 10 l/kg angepasst. Die Bestätigung einer Datenänderung im „LeachXS™ Editor“ erfolgt im Allgemeinen mit dem grünen Häkchen links oben.

Der Menüpunkt „Run“ → „Interactive Mode“ → „Chemistry“ führt zur anschließenden Auswahl der chemischen Phasen und Reaktionen. In der Sparte „Reactions“ werden zu Beginn alle im System vorhandenen Einträge ausgewählt. Diese werden schrittweise im Laufe der Modellierung sowie einzeln, je nach Probe und Schwermetall, exkludiert. Im Bereich „Adsorption models“ können „Clay“ (Tonminerale), „Ha“ (Huminsäuren) und „Hfo“ (Eisenhydroxide) dem Modell zugefügt werden. Nach der Bestätigung des „Interactive Mode“ wird der „Batch Mode“ gestartet. Dieser muss bei richtiger Anwendung zum Ergebnis „Calculation was successful“ führen.

Unter „Model Results“ können die erzeugten Ergebnisse der Modellierung abgerufen werden. Mit der Auswahl der Probe in „Samples to Compare“ werden die Konzentrationen mit dem Material verglichen. Die Schritte „Scenario Components“ → „Lab Test“ → „All phases“ sowie „Compared to Material“ führen zur anschließenden Ergebnisdarstellung. Das gewünschte Schwermetall wird mittels Häkchen ausgewählt. Die graphische Darstellung der Modellierungen ist im weiteren Schritt „Graphs“ möglich. Das Speichern der Exportdateien wird mittels „Export all“ → „Export“ durchgeführt und kann als PNG- und Excel-Datei abgerufen werden.

Das Zu- und Abführen der Phasen im „Interactive Mode“ wird so lange wiederholt, bis die Kurve in der Darstellung „Compared to Material“ sich am besten den Messpunkten annähert. Im Optimalfall durchquert der Verlauf alle gemessenen Eluatkonzentrationen. Das Diagramm „All phases“ zeigt in welcher Bindungsform das Schwermetall vorliegt. Im dem jeweiligen Vergleich mit dem Eh-pH-Diagramm können diese Phasen abgeglichen und realistisch angepasst werden.

5.5 Ergebnisse der pH-abhängigen Eluatkonzentrationen, der Modellierungen in LeachXSTM und der Mikrosondenuntersuchungen

Nachfolgend werden die Verläufe der Eluatkonzentrationen aller Proben sowie die Ergebnisse der Modellierungen mit LeachXS™ und der Mikrosondenuntersuchung anhand von Elementarverteilungskarten dargestellt. Im Fokus der Ergebnisauswertung stehen die Schwermetalle, die zuvor in erhöhten Konzentrationen im Probematerial der Altlasten festgestellt wurden. Unabhängig davon werden zusätzlich bei jeder Probe die Elemente Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, Si und Zn ausgewertet.

Eluatkonzentrationen

Die ermittelten pH-abhängigen Eluatkonzentrationen können mittels Diagramme für jedes Element dargestellt werden. Auf der Abszisse ist der pH-Wert von 1 bis 14 aufgetragen. Die Ordinate beinhaltet die gelöste Konzentration in Milligramm pro Liter. Die pH-abhängigen Eluatkonzentrationen liefern das Inputmaterial für die anschließende Modellierung in LeachXS™. Die Temperaturangaben in den Grafiken beziehen sich auf die Temperaturen, mit denen das eluierte Bodenmaterial zuvor thermisch behandelt wurde. Die 20 °C -Eluate wurden von Bodenproben erhalten, die lediglich unter Umgebungsbedingungen temperiert wurde. Um in den folgenden Ausführungen den Zusammenhang zwischen Behandlungstemperatur des Probenmaterials und dem jeweils benannten Eluat im Schriftbild zu verdeutlichen, wird die Temperatur vorangestellt (z.B.: 500°C-Eluat).

Modellierung in LeachXSTM

Bei der Modellierung wurde für jedes Element sowie für jede Probe die Konzentration an Eisenhydroxiden und CO_3^{2-} angepasst. Die verwendeten Werte können den nachstehenden Tabellen 36 und 37 entnommen werden.

Tabelle 36 Eingestellte Konzentrationen an Eisenhydroxiden

Eisenhydroxidkonzentration					
	K29	N82	ST30	ST32	Poschacher
Einheit	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
Al	0	0	0	0	0
As	25	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Ba	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	30.000
Ca	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Cd	500	1.000	500	20.000	500
Cr	n.m.	n.m.	1.500	n.m.	n.m.
Cu	50	100	100	300	30
Fe	0	0	0	0	0
Mg	150.000	250.000	40.000	80.000	20.000
Mn	200.000	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Pb	50	50	5.000	30	30
Si	0	0	0	0	0
Zn	3.000	10.000	30.000	30.000	5.000

Tabelle 37 Eingestellte Konzentrationen an CO_3^{2-}

CO_3^{2-} -Konzentration					
	K29	N82	ST30	ST32	Poschacher
Einheit	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
Ca	3.000	10.000 (20 °C, 105 °C) 17.500 (300 °C, 500 °C)	2.500	6.000	1.000

n.m. = nicht modelliert

Bei manchen Schwermetallen konnte keine vollständige Modellierung durchgeführt werden. Stellenweise kam es zu Softwareproblemen oder es konnten berechnete Phasen, deren Anwesenheit im System eine im Vergleich zu den Messwerten zu geringe Schadstoffmobilität zur Folge hätte, nicht entfernt werden. Die Ergebnisse stellen lediglich eine Annäherung an reale Verläufe der Mobilität von Schwermetallen in Böden dar.

Alle Modelle basieren auf einem Flüssigkeits- zu Feststoff-Verhältnis (L/S-Verhältnis) von 10 Liter pro Kilogramm. Zur Vereinfachung der Lesbarkeit der Diagramme wird von einer exponentiellen Notation der Konzentrationen abgesehen.

Elementarverteilungskarten der Mikrosondenuntersuchung

Eine erste Auswertung der Elementarverteilungskarten erfolgte bereits in Kap. 5.3 sowie in der Masterarbeit Kern (2021). Die im Folgenden vorgenommene erweiterte Auswertung berücksichtigt die temperaturabhängigen Veränderungen bei der Schwermetallmobilität. Für die Interpretation der LeachXSTM-Modellierungsergebnisse sind die Elemente C, O, P, S, Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Si und Zn sowie die Hauptkontamination jeder Altlast von Bedeutung.

5.5.1 Altlast K29 BBU Miniumfabrik Saag

Der Altlast der BBU Miniumfabrik Saag ist mit Blei und Arsen verunreinigt. Ebenso betrachtet wurden die Elemente Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Si und Zn.

Eluatkonzentrationen K29

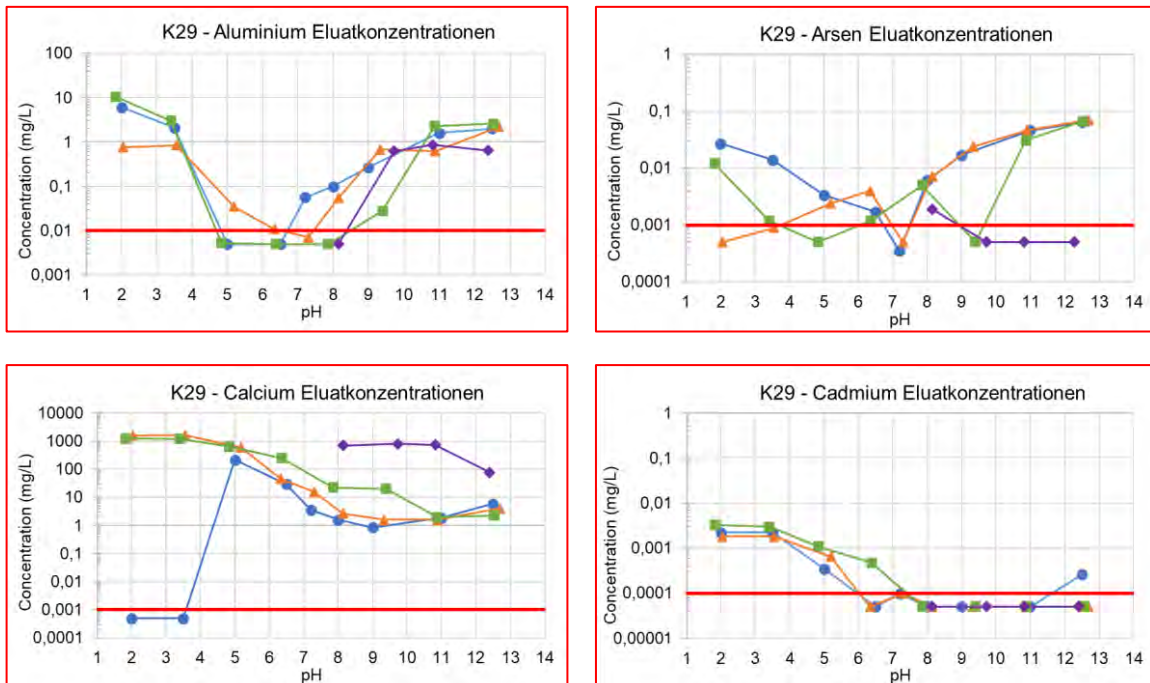
Die pH-abhängigen Eluatkonzentrationen der Altlast K29 sind in Abbildung 236 ersichtlich. Eluate von Probematerial, das mit 500 °C-thermisch behandelt wurde, konnten nicht vollständig gemessen werden. Es liegen lediglich Werte aus den Proben mit einem pH-Wert $\geq 8,2$ vor. Aussagen zum Auslagverhalten für den pH-Bereich $< 8,2$ sind daher nicht möglich.

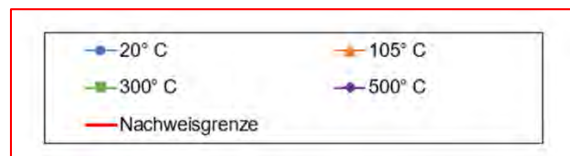
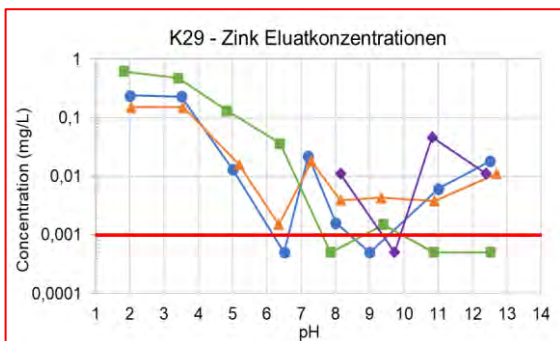
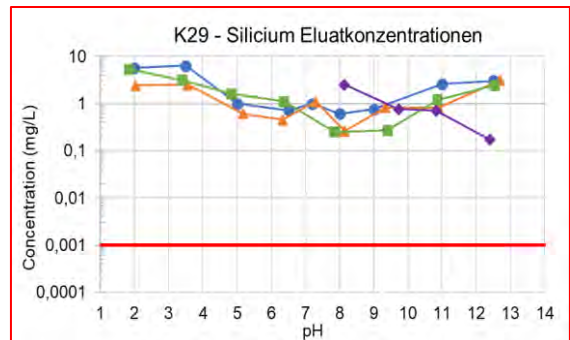
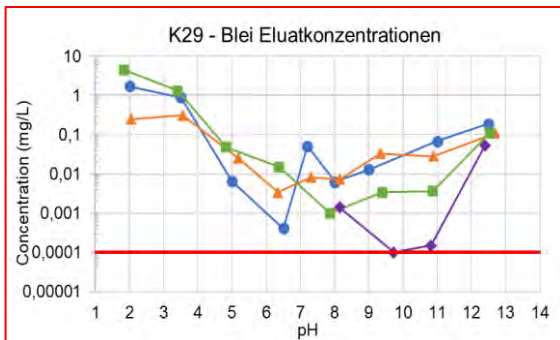
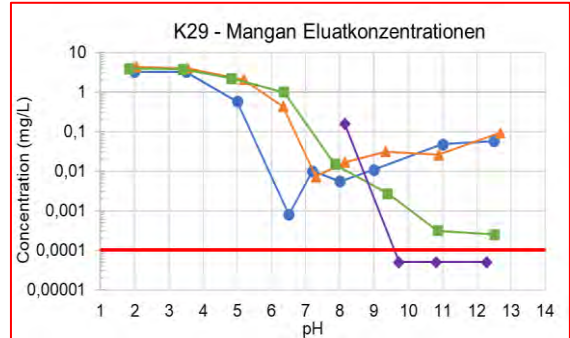
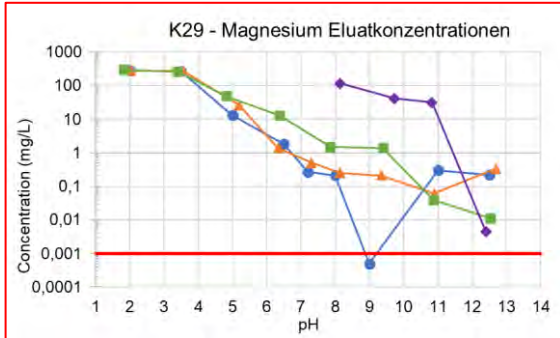
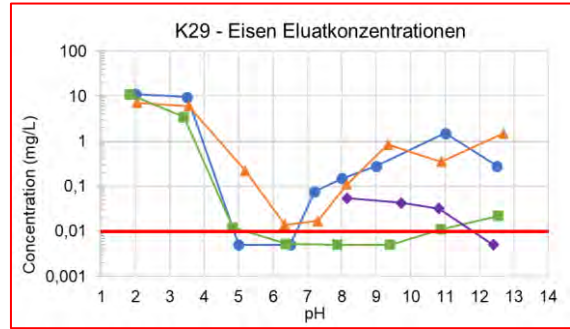
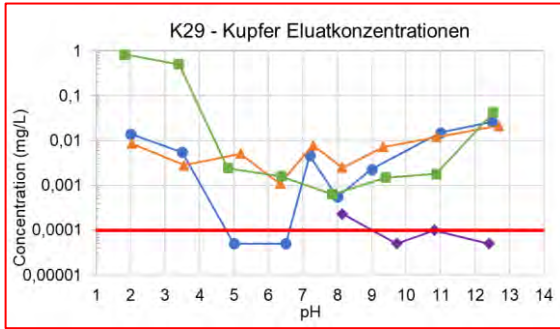
Die höchsten Eluatkonzentrationen bei allen Proben treten im sauren Bereich auf. Mg wird bis zu 400 mg/l und Ca bis zu 1.000 mg/l freigesetzt. Für die Elemente Al, Fe, Mn, Pb, und Si konnten Höchstwerte zwischen 1 und 10 mg/l gemessen werden. Die Eluatkonzentrationen der Elemente As, Cd, Cu, und Zn liegen über den gesamten pH-Bereich unter 1 mg/l. Der Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Mobilisierbarkeit

der untersuchten Elemente ist nicht eindeutig erkennbar. Zusammenfassend lassen sich folgende Auffälligkeiten feststellen:

- Im sauren Bereich führen höhere Behandlungstemperaturen bei den Elementen Ca und Cu zu einer erhöhten Mobilität.
- Im pH-Bereich 5 bis 8 ist mit steigender Behandlungstemperatur eine zum Teil starke Zunahme der Mobilität bei den Elementen Ca, Cd, Cu, Mg, Mn und Pb feststellbar. Bei Al und Fe dagegen nimmt die Mobilität ab.
- Im alkalischen Bereich (etwa pH > 8) ist der Einfluss der Behandlungstemperatur auf das Auslaugverhalten deutlich bei den Elementen Al, As, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb, Si und Zn in den 300 °C- und 500 °C-Proben zu erkennen. Während hier die Mobilität von Ca am höchsten ist (500 °C-Probe), zeigen die übrigen Elemente bei Behandlungstemperaturen von 300 °C bzw. 500 °C die niedrigsten Eluatkonzentrationen.
- Die Mobilität von Cd ist weitestgehend unabhängig von der Behandlungstemperatur des Probematerials. Lediglich im pH-Bereich 5 bis 6,5 nehmen die Eluatkonzentrationen mit steigender Behandlungstemperatur zu.

Abbildung 236 Eluatkonzentrationen K29 Al, As, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb und Si





Modellierungsergebnisse K29

Es konnten nur ein begrenzter Ergebnisvergleich durchgeführt werden, da die Elutionsversuche bei 500 °C im pH-Bereich < 8,2 keine Ergebnisse erbrachte. Trotz der fehlenden Daten wurde eine Modellierung in LeachXS™ durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass sich die vorgeschlagenen Phasen der Software nur auf diesen Teilinput beziehen. Eine Verallgemeinerung über den gesamten pH-Bereich kann nicht vorgenommen werden.

Aluminium (Error! Reference source not found.)

Aluminium löst sich vermehrt im sauren sowie alkalischen Bereich. Eine geringere Mobilität ist im pH-Bereich 5 bis 8 zu beobachten. Dabei treten Konzentrationen bis unter die Nachweisgrenze von 0,01 mg/l auf. Im alkalischen Bereich verändert sich die Löslichkeit des Elements durch den thermischen Einfluss nicht. Die Auslaugbarkeit von Al liegt bei einem Wert von etwa 1 mg/l. In den Modellen wird Boehmit bzw. bei 300 °C Gibbsit als Hauptphase vorgeschlagen. Bei diesen Mineralen handelt es sich um die Klasse der Aluminiumoxide und -hydroxide. Im pH-Bereich 4,5 bis 6 liegt Aluminium in silikatischer Form als Kaolinit oder Nontronit vor.

Arsen (Abbildung 238)

Bei Arsen zeigt sich ein uneinheitlicher Verlauf der Eluatkonzentrationen in Abhängigkeit des pH-Wertes. Während die 20 °C- und 300°C-Eluate maximale As-Konzentrationen im stark sauren und im stark alkalischen Bereich zeigen, verläuft die 105 °C-Kurve linear steigend mit zunehmenden pH-Wert. Die geringste Mobilität besteht bei den 20 °C-Eluaten bei pH 7 und bei den 300 °C-Eluaten bei pH 4,8. Im alkalischen Bereich liegen die gemessenen 20 °C -, 105 °C- und 300 °C-Eluatkonzentrationen auf vergleichbarem Niveau. Die 500 °C-Eluatkurve zeigt dagegen eine deutlich reduzierte Auslaugbarkeit. Beim Vergleich zwischen Messwerten und modellierten Konzentrationen lassen sich keine übereinstimmenden Konzentrationsverläufe feststellen. Mit der Modellierung wird für alle Proben eine höhere Löslichkeit von Arsen im sauren Bereich berechnet. Allenfalls im stark alkalischen Bereich sind gemessene und modellierte Eluatkonzentrationen ähnlich. Der im Modell eingestellte Eisenhydroxidgehalt betrug 25 mg/kg. Die bei 105 °C und 300 °C vorgeschlagenen Phasen, deuten auf eine Korrelation von Arsen mit Calcium hin.

Calcium (Abbildung 239)

Die maximale Eluatkonzentration von Calcium tritt im sauren Bereich auf und beträgt rund 1.000 mg/l. Die Erhöhung der Behandlungstemperatur führt zu einer signifikanten Zunahme der Mobilität um mehrere Größenordnungen. Auch im pH-Bereich von 5 bis 8 ist diese Zunahme feststellbar, wenn auch nicht so stark ausgeprägt. Bei hohen pH-Werten zeigt die 500 C-Probe die höchste Eluierbarkeit von Ca. In der Modellierung wurde ein Gehalt an Eisenhydroxiden, die als Adsorbens fungieren, von 3.000 mg/kg sowie eine CO_3^{2-} -Konzentration von 3.000 mg/kg verwendet. Calcium liegt im Probenmaterial bei allen Behandlungstemperaturen adsorbiert an Eisenhydroxiden oder in gebundener Form als Calcit vor. Die Zunahme der Mobilität von Calcium im alkalischen Bereich nach der thermischen Behandlung lässt sich auf die Erhöhung der Löslichkeit des Calcits zurückführen. Da das Löslichkeitsprodukt aus Ca-Ionen und Karbonat-Ionen eine Konstante ist, bedeutet eine höhere Aktivität an Ca-Ionen eine geringere Aktivität an Karbonat-Ionen. Wenn durch die thermische Behandlung CO_2 freigesetzt wurde, sinkt die im Boden gebundene Menge an Kohlenstoff und damit möglicherweise auch die verfügbare Konzentration an Carbonat.

Cadmium (Abbildung 240)

Die ermittelten Cadmiumkonzentrationen aus den Elutionsversuchen zeigen, dass die maximale Löslichkeit im sauren Bereich gegeben ist. Die Werte liegen dabei bei den 20 °C-, 105 °C- und 300 °C-Eluaten zwischen 0,002 und 0,003 mg/l. Die Mobilität nimmt ab einem pH-Wert von 3,5 ab. Im alkalischen Bereich zeigt sich die geringste Auslaugbarkeit und die Konzentrationen liegen bei allen Behandlungstemperaturen unter der Nachweisgrenze. Eine Veränderung der Löslichkeit aufgrund des thermischen Einflusses ist nicht zu erkennen. Der Vergleich der Modelle mit den gemessenen Konzentrationen veranschaulicht, dass die modellierte Verteilung zwischen gelöstem und adsorbiertem Cadmium nicht den tatsächlichen Werten entspricht. Laut den Modellen sollte sich mehr Cadmium lösen. Das theoretische thermodynamische Gleichgewicht konnte durch den Modellierungsprozess bei allen vier Temperaturen nicht erreicht werden.

Kupfer (Abbildung 241)

Die Kupfermobilität zeigt bis pH 6,5 einen signifikanten Anstieg bei der 300 °C-Probe im Vergleich mit der 20 °C- und der 105 °C-Probe. Im alkalischen Milieu sinkt die Auslaugbarkeit mit Zunahme der Behandlungstemperatur. Bei der 105 °C-Probe fällt auf, dass die Löslichkeit über den gesamten pH-Bereich in konstant verläuft. Im Gegensatz dazu ist bei den 20 °C- und den 300 °C-Eluaten im neutralen Bereich eine geringere Auslaugbarkeit vorhanden. Durch die hydrogeochemische Modellierung wird die Sorption

an Eisenhydroxid als freisetzungsbestimmender Mechanismus vorhergesagt. Der Eisenhydroxidgehalt wurde mit 50 mg/l angesetzt. Laut Modell sollte die Adsorption im alkalischen Bereich maximal sein, während im sauren Bereich keine Adsorption auftritt. Die experimentellen Daten zeigen ebenfalls die geringsten Eluatkonzentrationen im alkalischen Bereich, d.h. unter der Nachweisgrenze von 0,1 µg/l. Ebenso zeigen die experimentellen Daten unabhängig von der Behandlungstemperatur im sauren Bereich Eluatkonzentrationen von 0,01 mg/l bis 1 mg/l. Während diese Messwerte mit den modellierten Ergebnissen prinzipiell übereinstimmt, weichen bei pH > 3,5 die berechnete und gemessene Eluatkonzentrationen deutlich voneinander ab. Dies kann so interpretiert werden, dass im Experiment kein thermodynamisches Gleichgewicht erreicht werden konnte.

Eisen (Abbildung 242)

Die maximale Auslaugbarkeit liegt bei Eisen im sauren Bereich und bleibt bei den 20 °C-, 105 °C- und 300 °C-Eluaten konstant bei rund 10 mg/l. Mit Zunahme der Behandlungstemperatur des Probematerials auf 300 °C bzw. 500 °C sinkt die Mobilität von Eisen im alkalischen Bereich. Ab pH 7 bei den 20 °C- und den 105 °C-Eluaten nehmen die Fe-Konzentrationen wieder zu. Eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen liegt nur bis pH 3,5 vor. Bei den vorgeschlagenen Phasen handelt es sich um Eisenhydroxide und -hydroxide. Bei einer Behandlungstemperatur des Probematerials von 300 °C wird die Bildung einer Eisenchloridphase vorhergesagt.

Magnesium (Abbildung 243)

Die Messwerte von Magnesium lassen darauf schließen, dass die maximale Auslaugbarkeit unabhängig von der Behandlungstemperatur des Probematerials ist. Bei den 20 °C-, 105 °C- und 300 °C-Eluaten liegt diese bei ungefähr 200 mg/l bei pH ≤ 3,5. Mit zunehmendem pH-Werte nehmen die Eluatkonzentrationen der 20 °C-, 105 °C- und 300 °C- Probe deutlich bis auf 0,01 mg/l ab. In den Eluaten der 500 °C-Probe dagegen ist nur eine geringfügige Abnahme zu verzeichnen. Der Vergleich von berechneten mit gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt nur bis pH 3,5 eine gute Übereinstimmung. Mit der auftretenden Phase der Eisenhydroxide kann die tatsächliche Menge an freigesetztem Magnesium nur beschränkt dargestellt werden. Die angesetzte Eisenhydroxidkonzentration von 150.000 mg/kg führt zu einer höheren Löslichkeit vor allem im neutralen Bereich in den Modellen. Eine Erhöhung der Konzentration führt zu keiner Berichtigung der Eluatkurven. Bei den 300 °C-Eluaten führen Magnesiumhydroxide

und -oxide, als Brucit auftretend, zu einer besseren Übereinstimmung des Modells an die gemessenen Eluatkonzentrationen.

Mangan (Abbildung 244)

Die Eluatkonzentrationen von Mangan liegen bei den 20 °C-, 105 °C- und 300 °C-Proben bis pH 5 auf einem konstanten Niveau von 3,5 mg/l bis 6 mg/l. Bei den 20 °C- und 105 °C-Eluaten sinkt die Auslaugbarkeit im neutralen Bereich und steigt mit zunehmendem pH-Wert wieder leicht an. Dagegen sinken die Eluatkonzentrationen der 300 °C-Probe kontinuierlich bis fast auf die Nachweisgrenze ab. Die Eluate der 500 °C-Probe zeigen, von einer Ausnahme abgesehen, zeigen nur Mn-Konzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze. Die berechneten und gemessenen Mn-Konzentrationen zeigen bis pH 7 eine gute Übereinstimmung, im alkalischen Bereich sind die Abweichungen beträchtlich. Mangan liegt laut Modell adsorbiert an Eisenhydroxide vor. Die Eisenhydroxidkonzentration entspricht 150.000 mg/kg. Die Modellierungen ergeben bei allen Behandlungstemperaturen des Probematerials ein ähnliches Phasenbild. Das thermodynamische Gleichgewicht kann durch LeachXSTM im alkalischen bis neutralen Bereich hergestellt werden.

Blei (Abbildung 245)

Die höchsten Bleikonzentrationen in den Eluaten treten in allen Proben im sauren Bereich (pH ≤ 3,5) auf. Bis pH 6,5 (300 °C-Probe bis pH 8) nimmt die Mobilität ab, um im weiteren pH-Verlauf wieder anzusteigen. Die 500 °C-Probe zeigt eine Abnahme der Eluatkonzentrationen von pH 8 nach pH 11. Allerdings ist bei pH 12,5 wieder ein starker Anstieg der Pb-Konzentrationen zu verzeichnen. Ein Einfluss der thermischen Behandlung des Probematerials lässt bei pH > 8 feststellen. Hier nimmt die Mobilisierbarkeit mit steigender Behandlungstemperatur ab. Der Vergleich zwischen berechneten und Eluatkonzentration zeigt eine gute Übereinstimmung bis etwa pH 6,5. Bei höheren pH-Werten liefert die Modellierung von den experimentellen Daten stark abweichende Werte. Der eingestellte Eisenhydroxidgehalt in LeachXSTM beträgt für alle Temperaturen 50 mg/l. Bei allen Temperaturen treten ähnliche Phasen auf. Plattnerit, β-PbO₂ zählt ebenso wie Pb(OH)₂ zur Gruppe der Hydroxide und Oxide.

Silicium (Abbildung 246)

Die Si-Eluatkonzentrationen der 20 °C-, der 105 °C- und der 300 °C-Probe verlaufen ähnlich. Die höchsten Konzentrationen werden im stark sauren und alkalischen Milieu gemessen. Zwischen pH 4 und 11 ist eine leichte Abnahme der Mobilität zu erkennen. Die 500 °C-Probe verzeichnet, abweichend zu den übrigen Proben, bei pH 12,5 die geringste

Auslaugbarkeit. Die berechneten Eluatkonzentrationen stimmen mit den Messwerten allenfalls im sauren Bereich annähernd überein.

In den Modellen werden im Vergleich zu anderen Elementen eine Vielzahl von Phasen vorgeschlagen.

Zink (Abbildung 247)

Die maximale Eluatkonzentration von Zn liegt im sauren Bereich und wurde im 300 °C-Probe mit 0,7 mg/l gemessen. Die in den Eluaten der 20 °C-, der 105 °C- und der 300 °C-Probe ermittelten Messwerte deuten darauf hin, dass die Auslaugbarkeit im alkalischen Bereich abnimmt. Bei den 500 °C-Eluaten ist hier zwar kein eindeutiger Verlauf der Zn-Konzentrationen erkennbar, jedoch wurden höhere Konzentration im Vergleich zu den Eluaten der anderen Proben gemessen. Die berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen stimmen nur im sauren Bereich überein. Die für den übrigen pH-Bereich modellierten Werte zeigen eine deutliche Abweichung von den experimentellen Daten. Im Modellierungsprozess wurde eine Eisenhydroxidkonzentration von 3.000 mg/kg angesetzt. Mit dieser Phase, sowie auch mit Ca-Zincat und Zincit, kann jedoch der Verlauf der Konzentrationen nicht mit den Modellen beschrieben werden.

Abbildung 237 Modellierung K29 Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

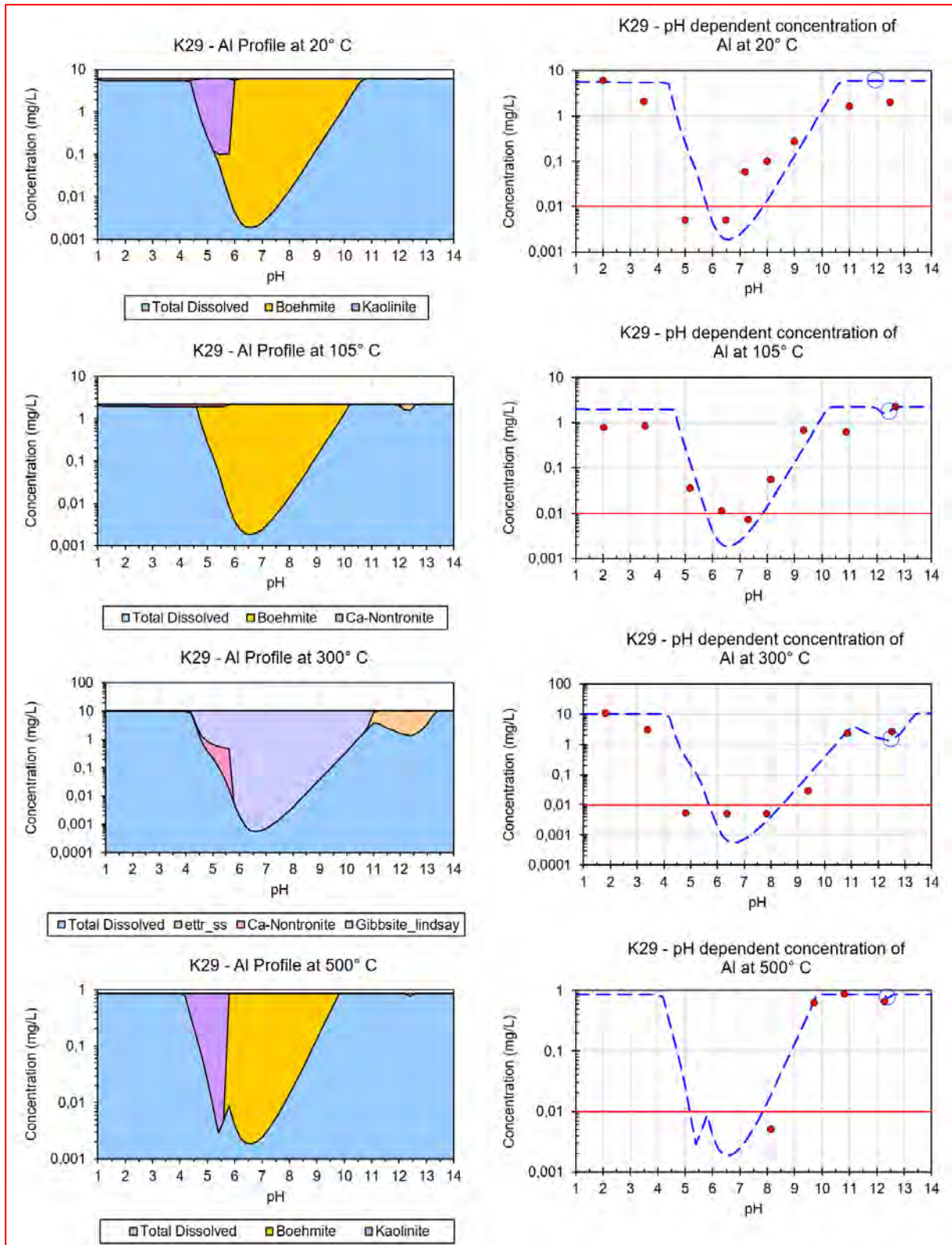


Abbildung 238 Modellierung K29 Arsen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

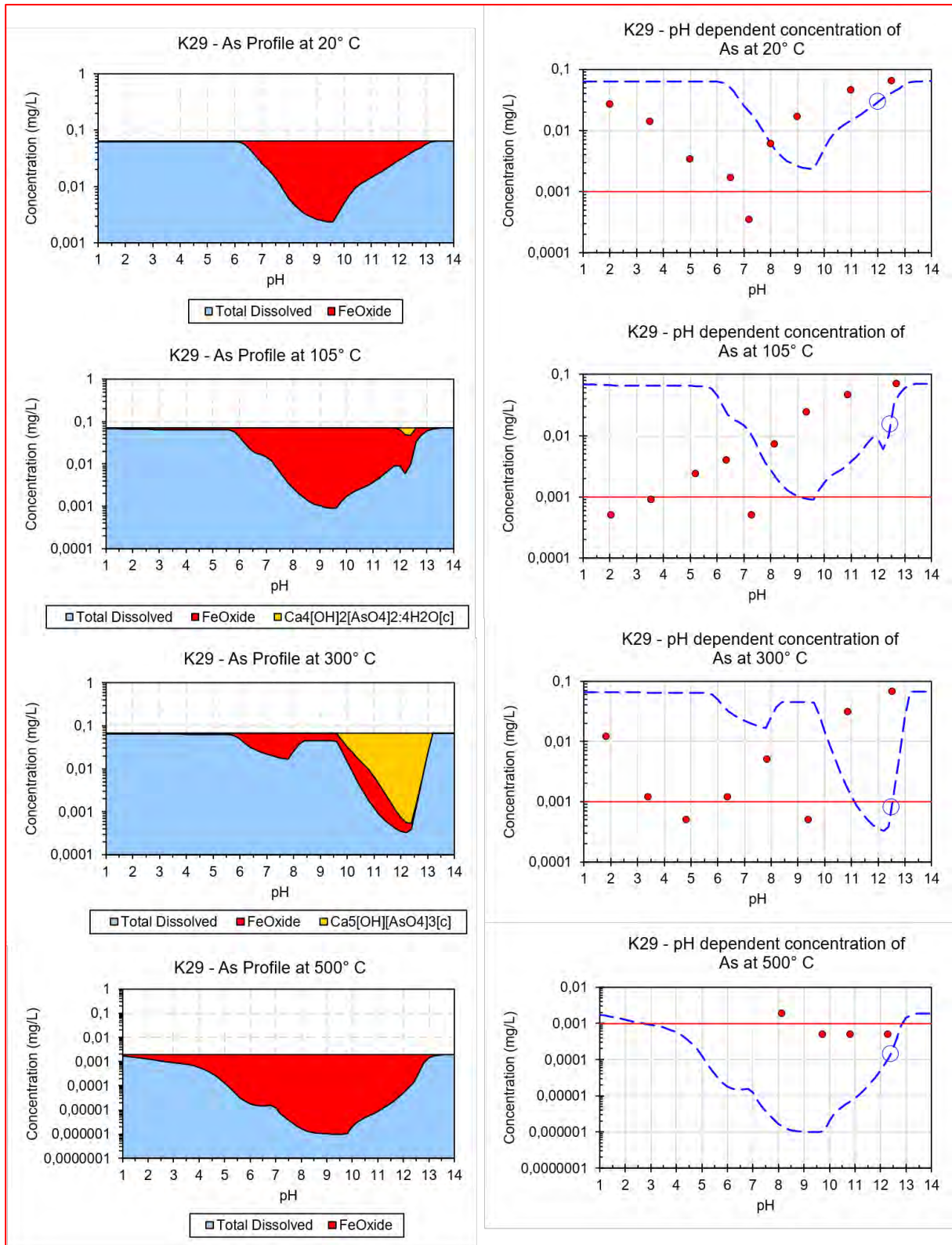


Abbildung 239 Modellierung K29 Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

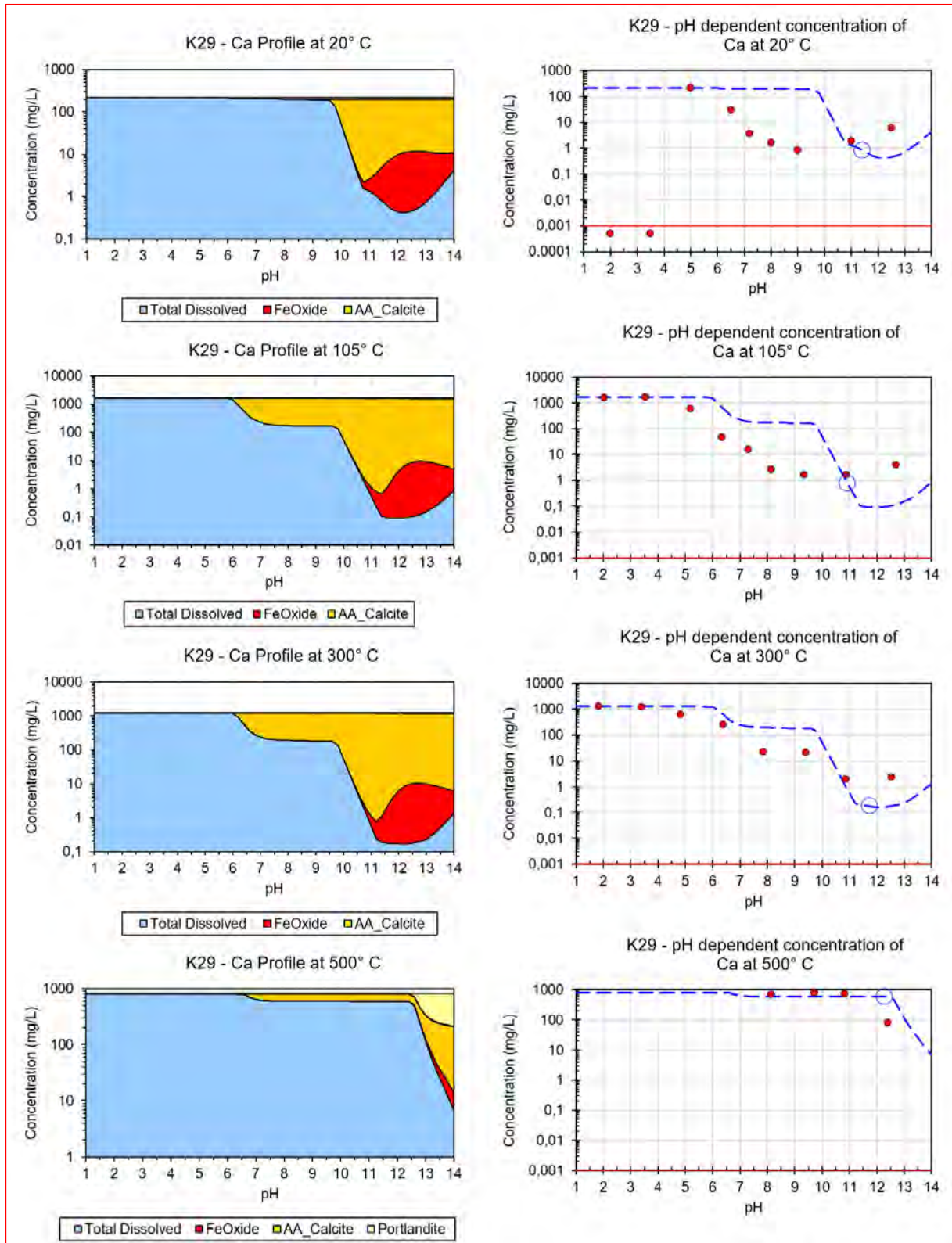


Abbildung 240 Modellierung K29 Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

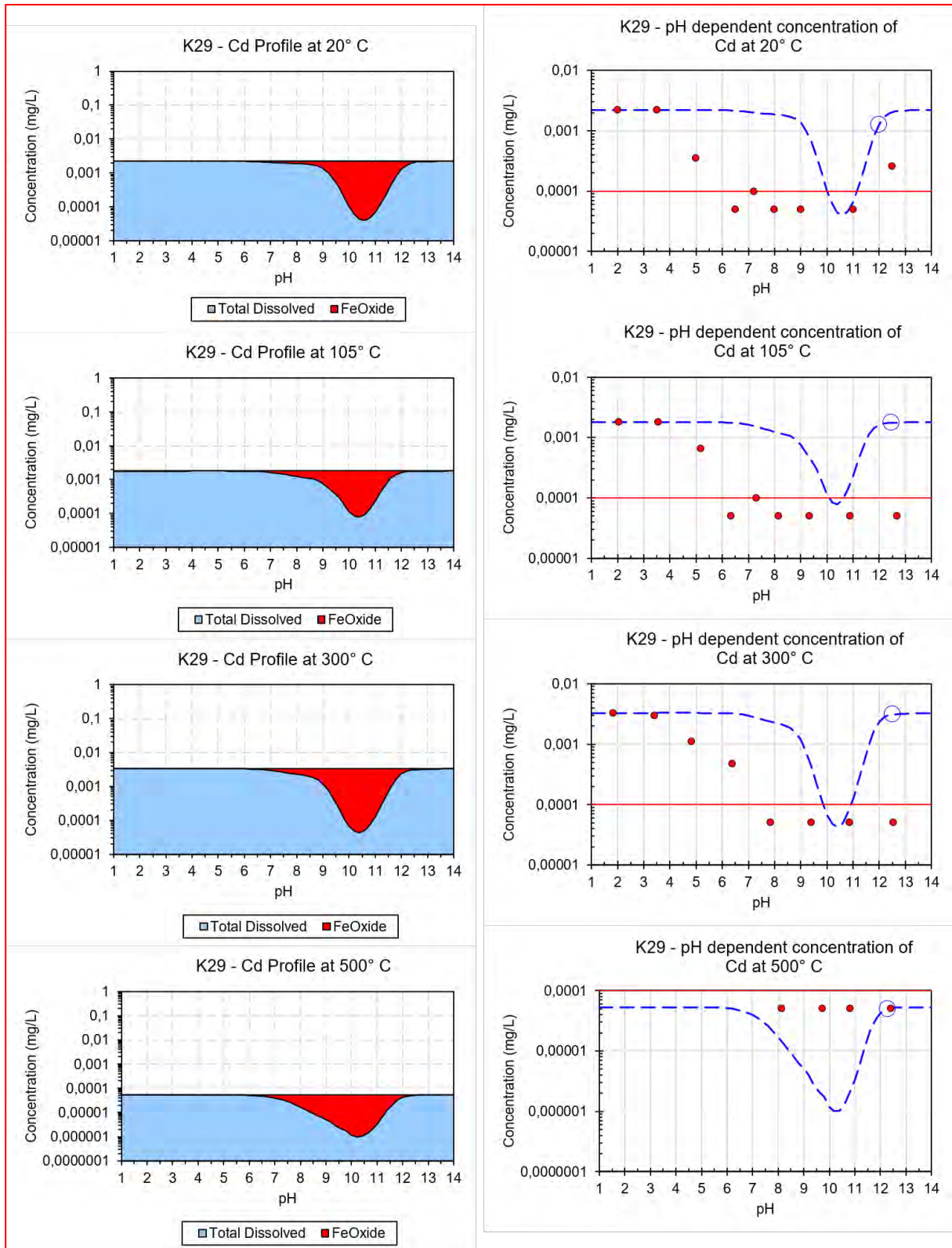


Abbildung 241 Modellierung K29 Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

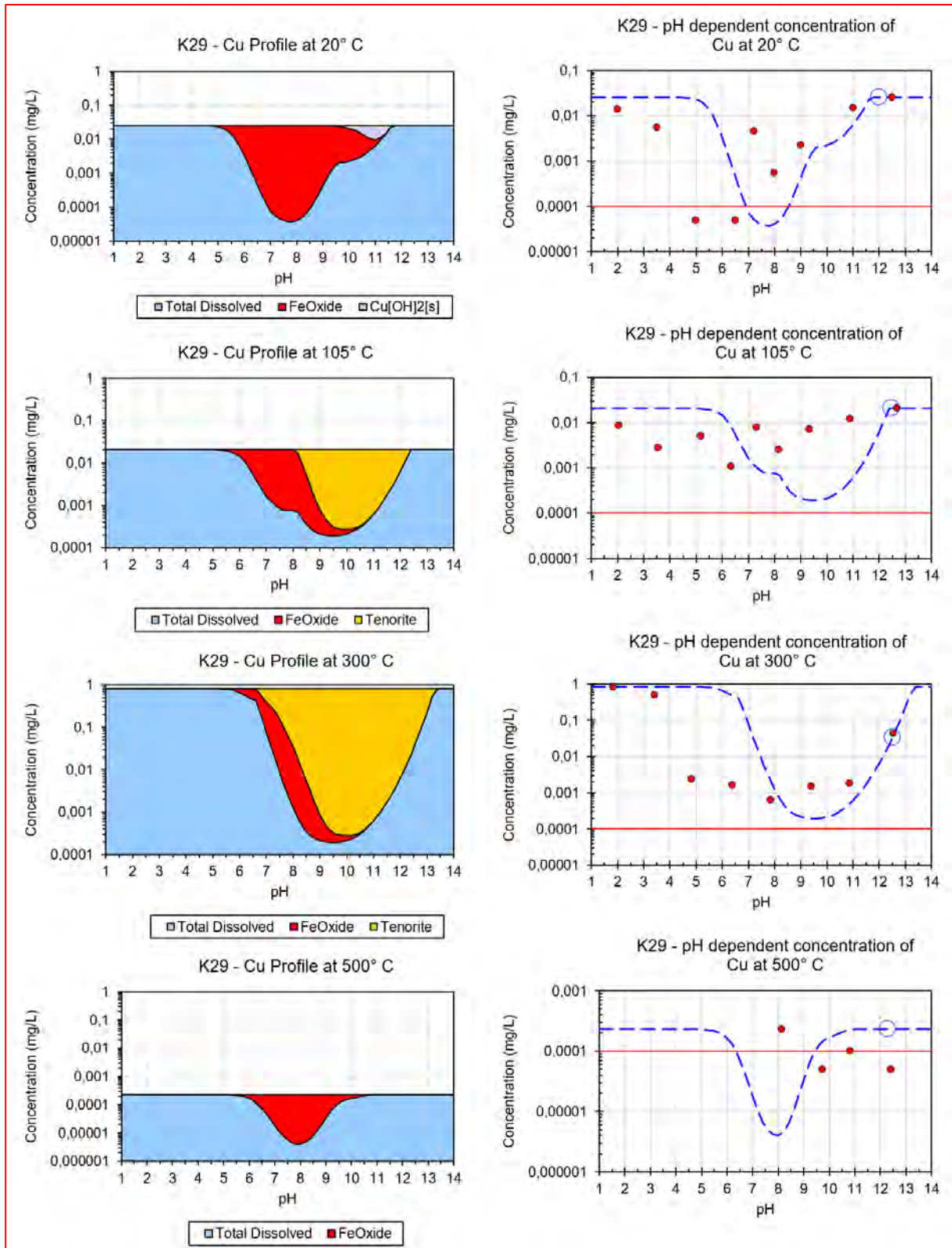


Abbildung 242 Modellierung K29 Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

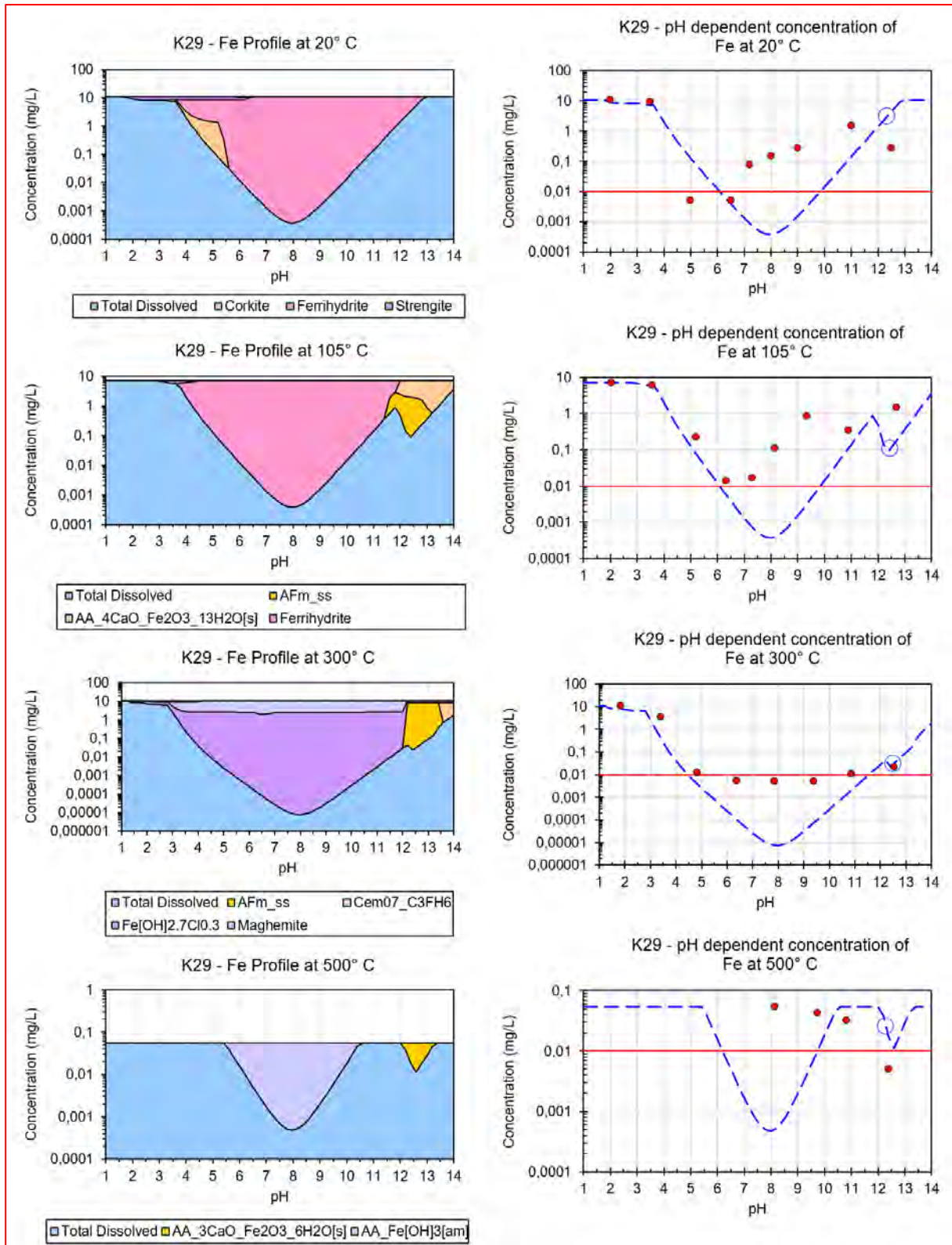


Abbildung 243 Modellierung K29 Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

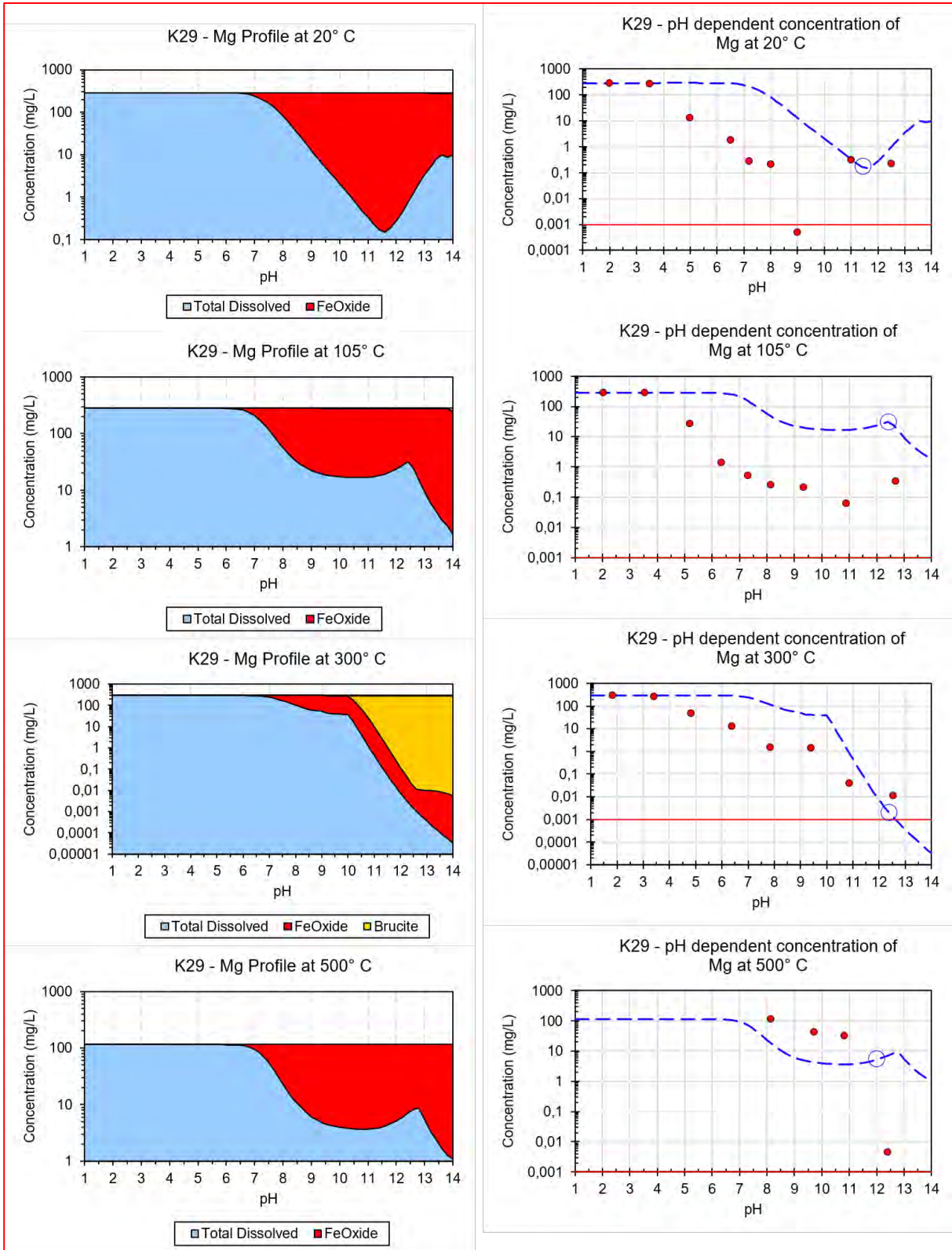


Abbildung 244 Modellierung K29 Mangan (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

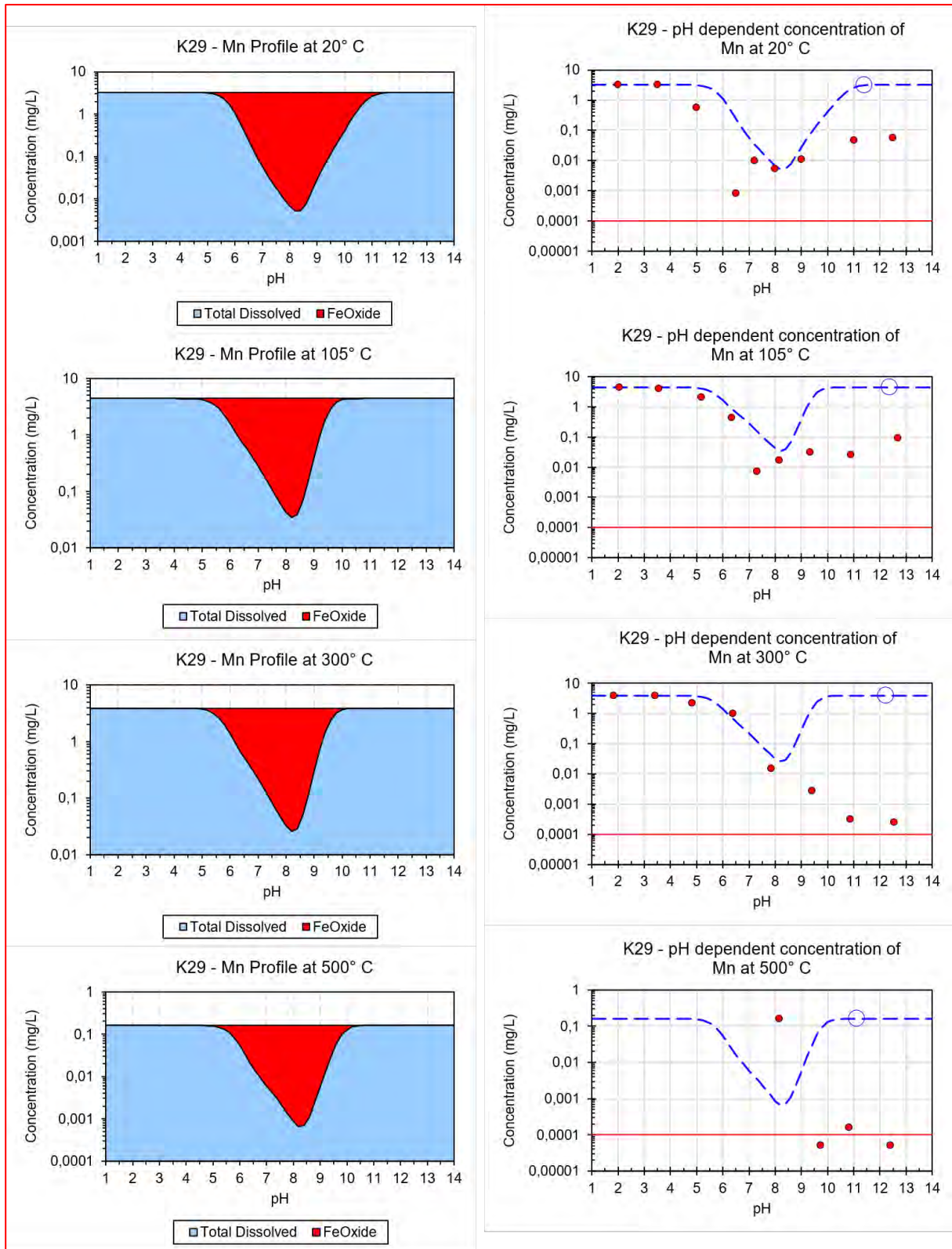


Abbildung 245 Modellierung K29 Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

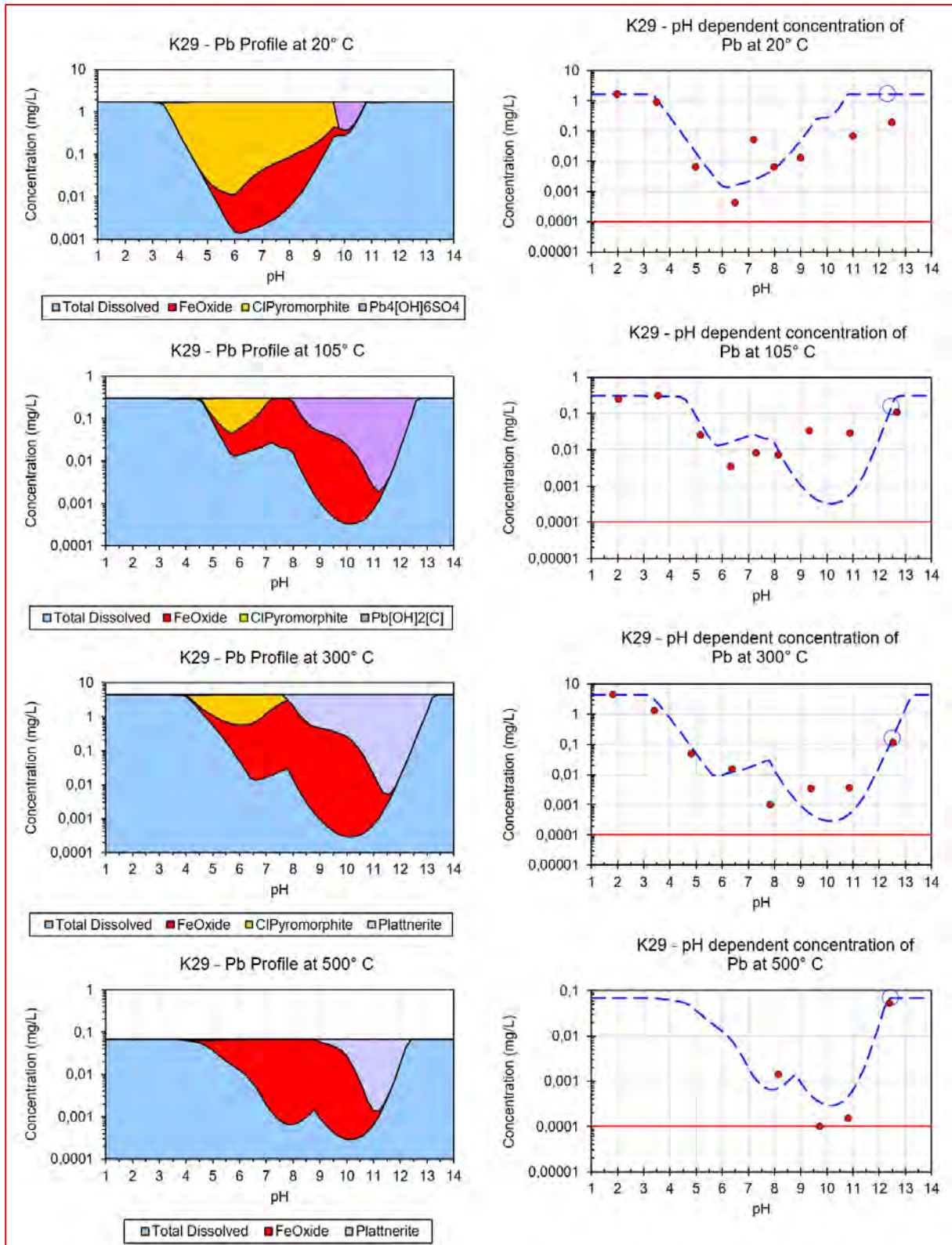


Abbildung 246 Modellierung K29 Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

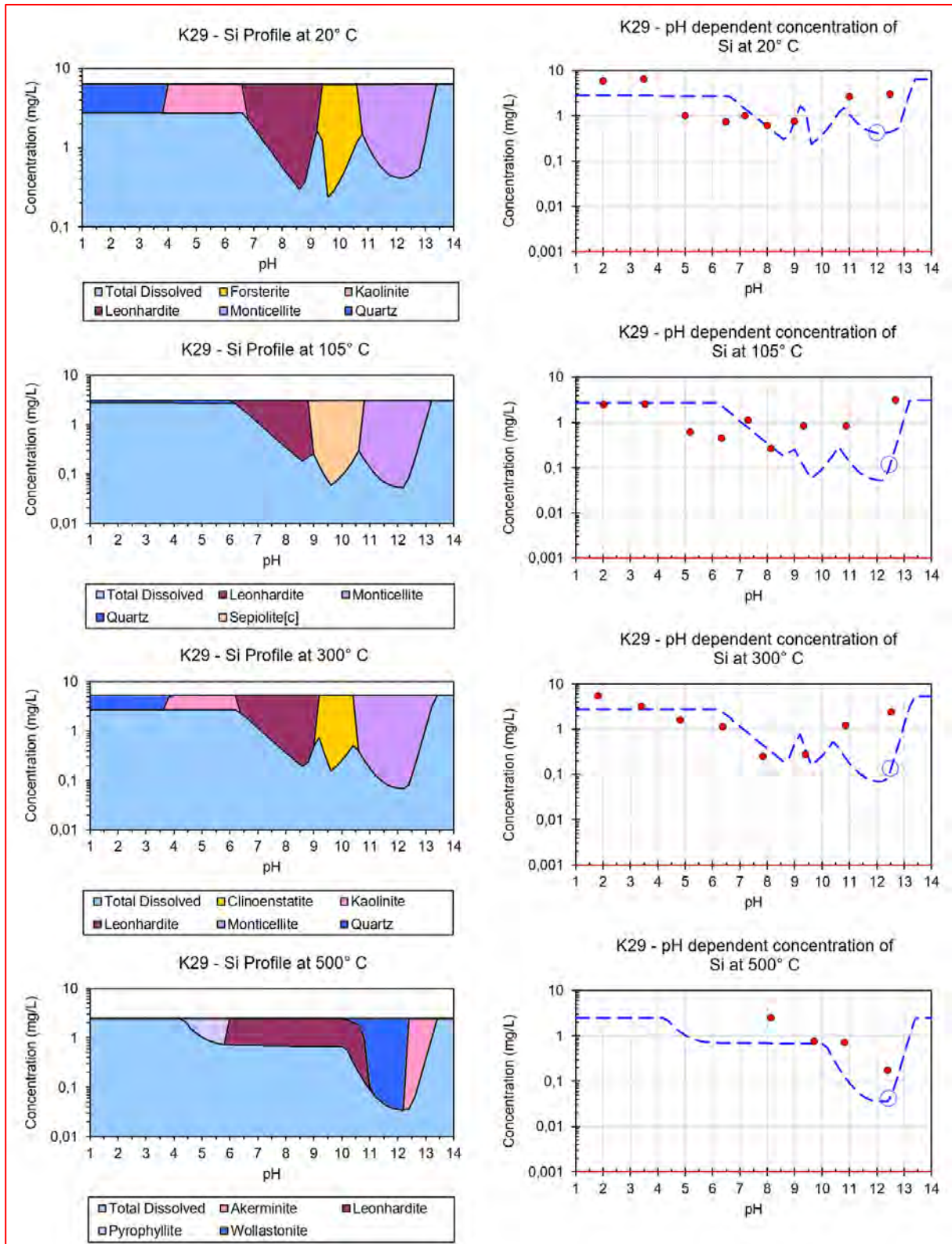
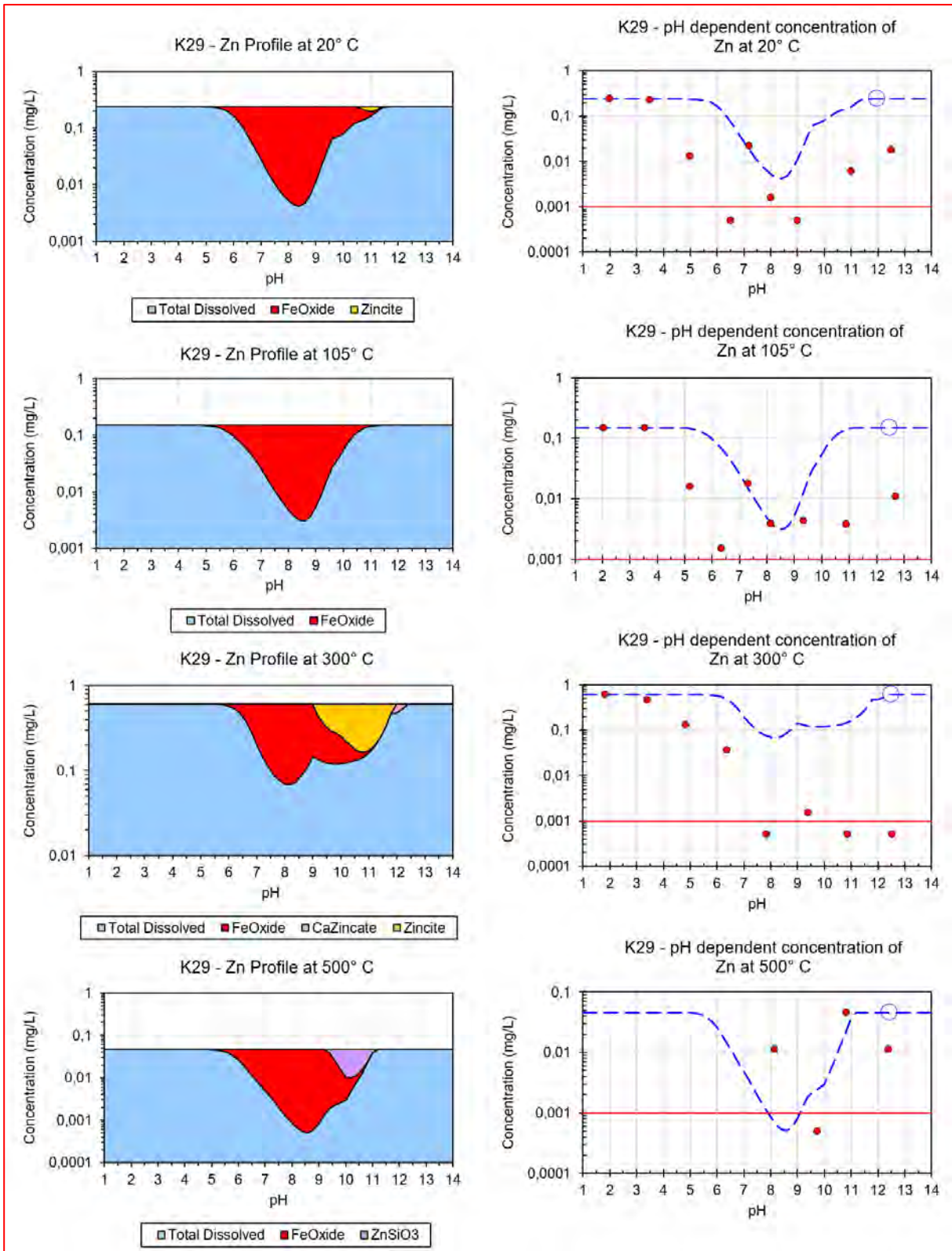


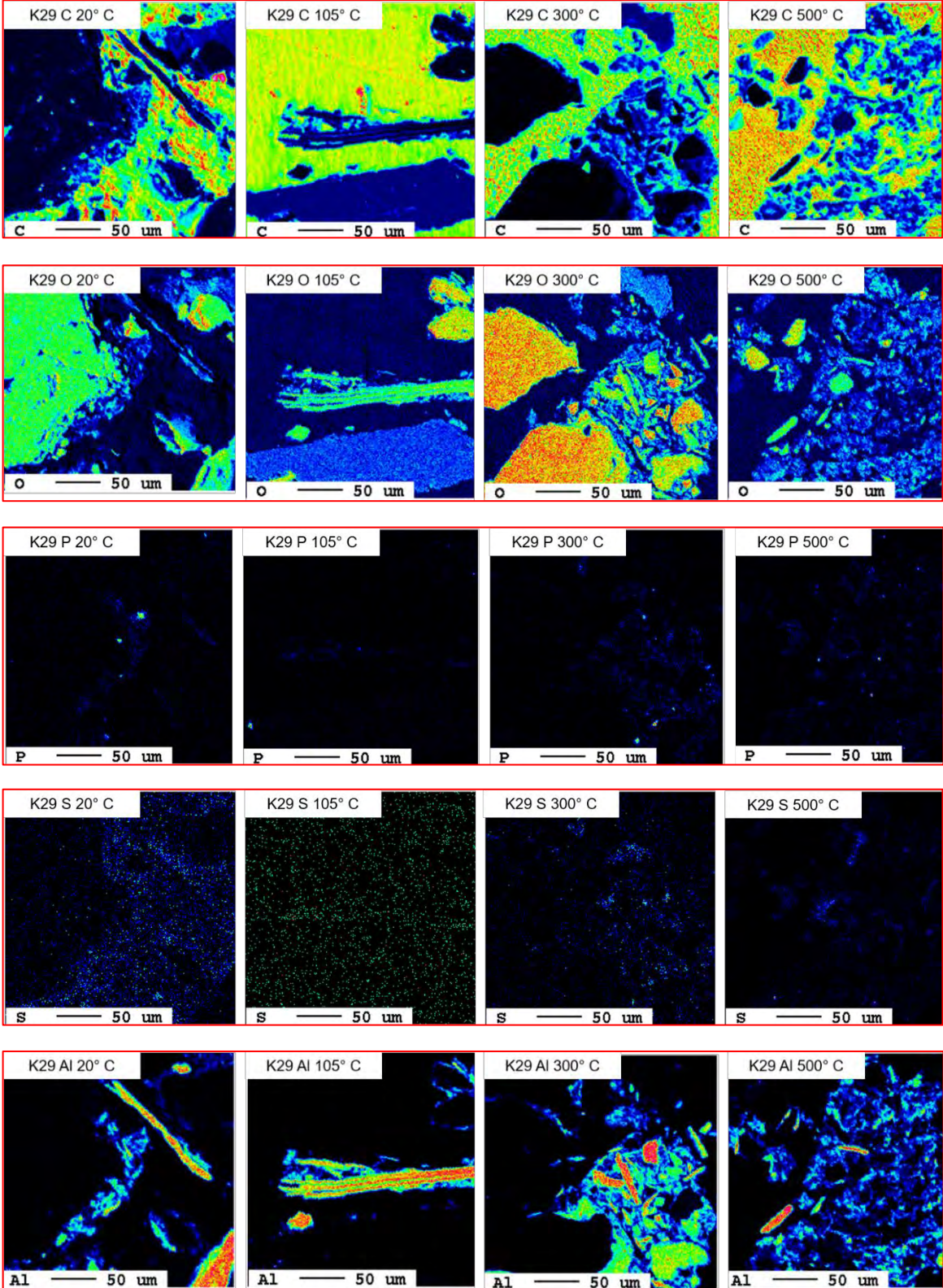
Abbildung 247 Modellierung K29 Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

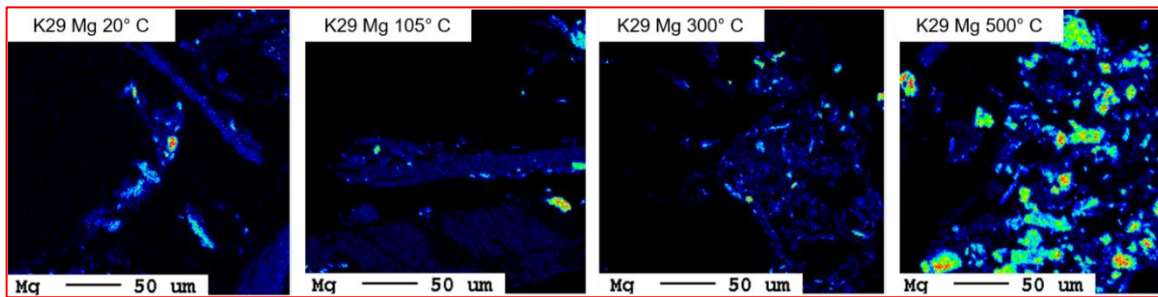
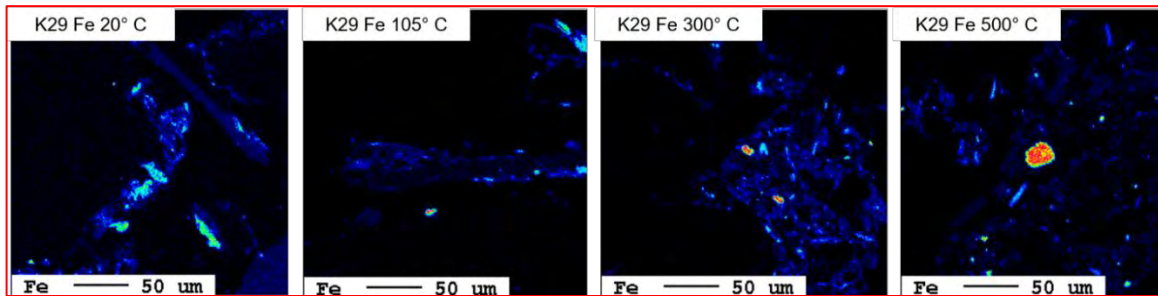
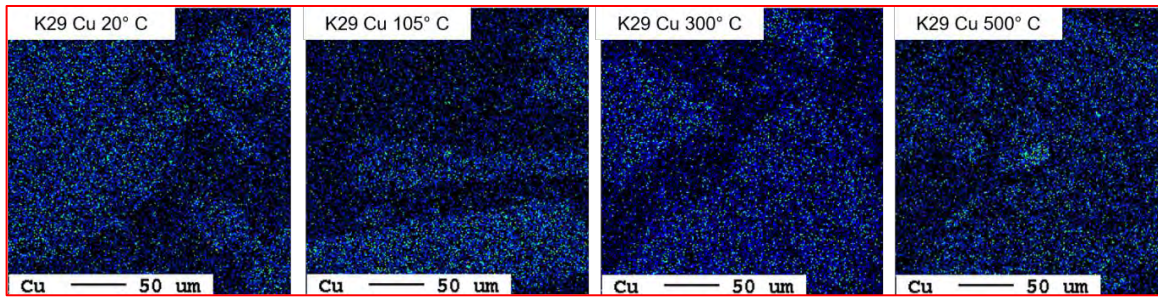
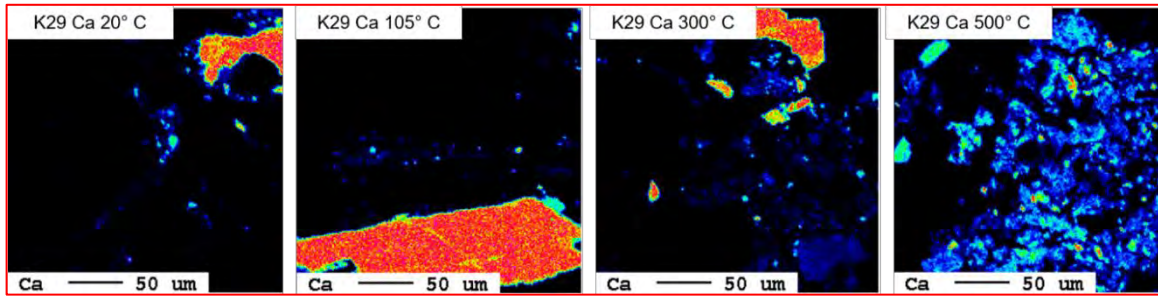
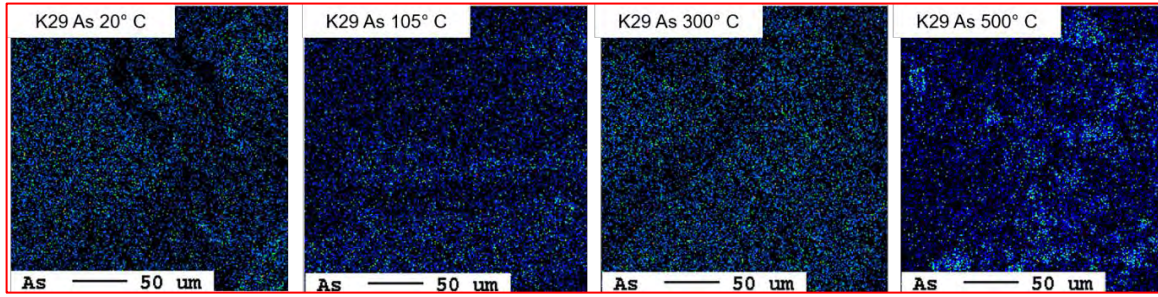


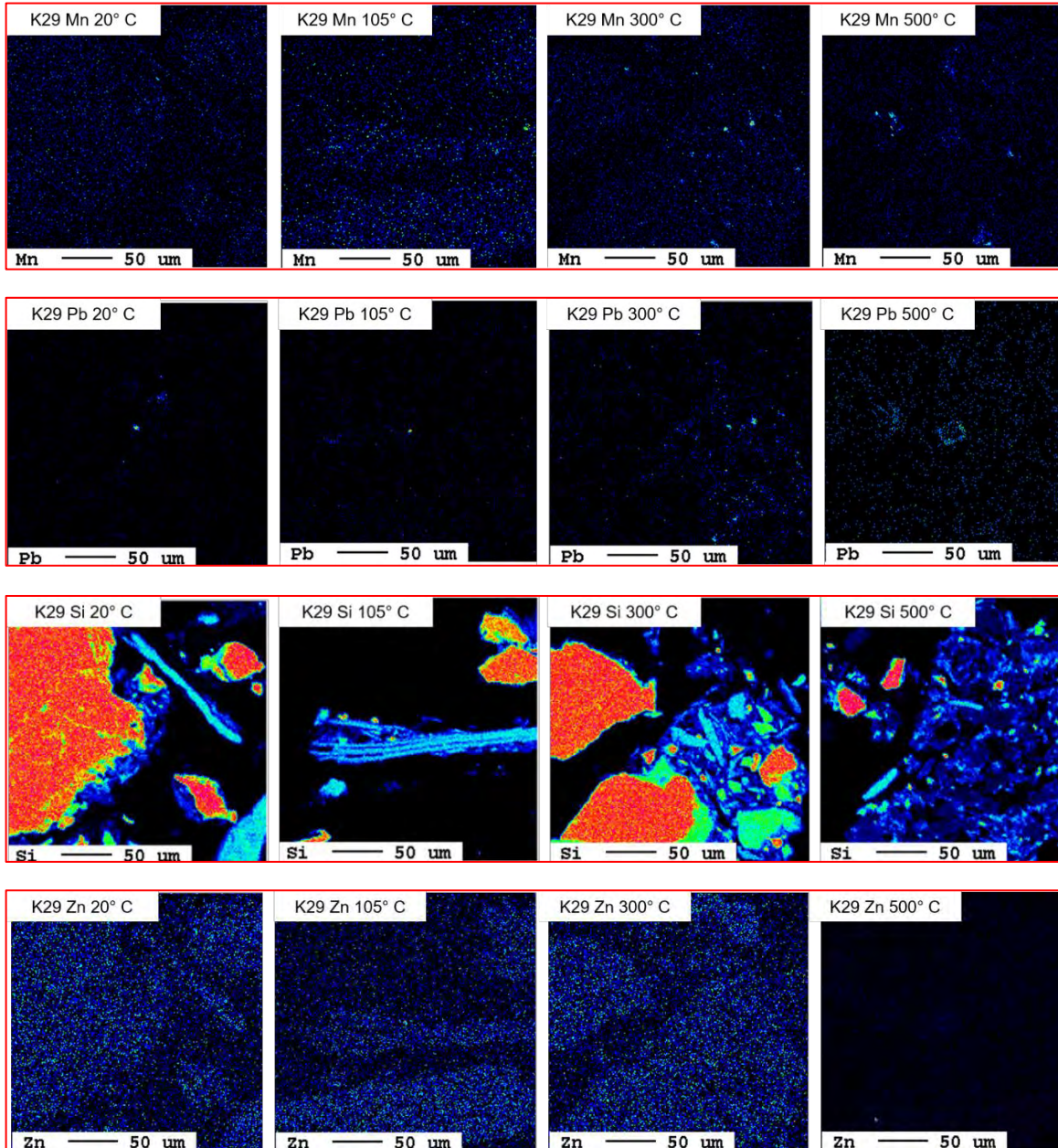
Mikrosondenergebnisse K29

Die Mikrosondenergebnisse der K29 beziehen sich auf die Elementarverteilungskarten aus Abbildung 248. Die 20 °C-Probe der K29 weist einen kleinen Pb-Bereich auf, welcher vor allem aus Quarz (Si und O) aufgebaut ist. Eine Korrelation konnte mit P, teils Ca und Cl festgestellt werden. Es lässt vermuten, dass es sich dabei um Phosphohedyphan handelt. Diese Form bleibt bis 105 °C bestehen. Zusätzlich korrelieren bei der 105 °C-Probe Si, Fe, Al und O mit einem weiteren Pb-Korn. Kern (2021) weist darauf hin, dass eine SEM-EDX-Spektrum Aufnahme einer Pb-Phase keine Korrelation mit Cl und P zeigt. Vielmehr konnte eine Übereinstimmung mit Manganhydroxid beobachtet werden. Bei Manganhydroxid kann es sich um einen Oberflächenfilm handeln, welcher auf der Primärphase Phosphohedyphan vorliegt. Die Elementarverteilung bei der 300 °C-Probe weist auf keine Pb-Bereiche hin. Die erkannten Cu-Phasen korrelieren mit Zn. In einer zusätzlichen zweiten Mikrosondenaufzeichnung wurde ein Zusammenhang mit Si und O sowie wieder mit Zn erkannt. Die Erhöhung der Behandlungstemperatur auf 500 °C verändert die Elementarverteilung nicht. Pb tritt stellengleich mit Ca und P auf. Das EDX-Spektrum zeigt kein Mn, was wiederum dem Manganhydroxidfilm widerspricht (Kern 2021). Die Cu-Konzentration bleibt offensichtlich, unabhängig von der Behandlungstemperatur, relativ konstant. Im Probematerial, das bis 300 °C behandelt wurde, ist Zink vorhanden, scheint aber in der 500 °C-Probe nicht mehr vorzuliegen. Bei Pb wird eine Zunahme der Konzentrationen über die steigende Temperatur verzeichnet.

Abbildung 248 Elementarverteilungskarten K29 von C, O, P, S, Al, As, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb, Si, und Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis – grün – gelb – orange – rot – pink – weiß)







5.5.2 Altlast N82 Glanzstoff – Traisenau

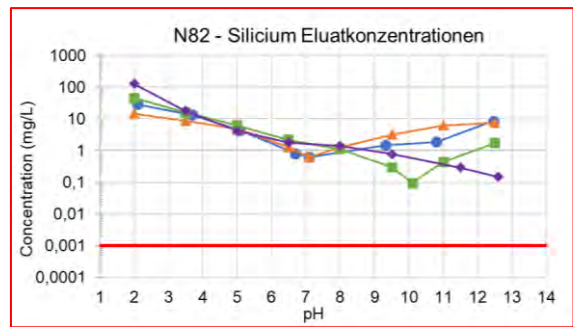
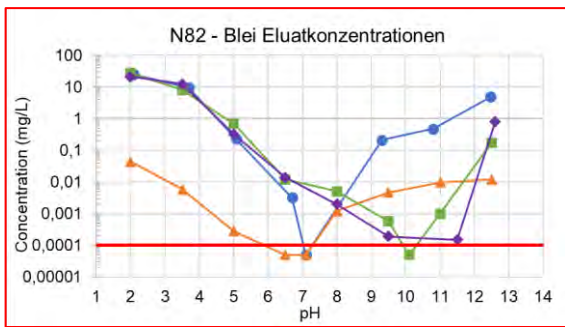
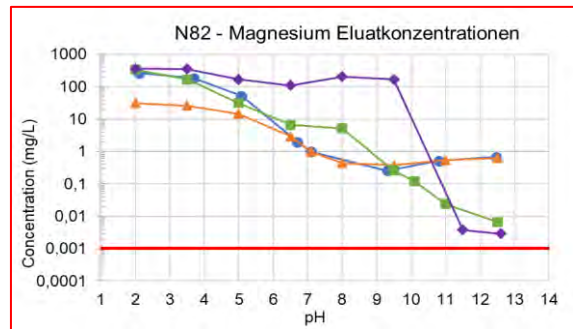
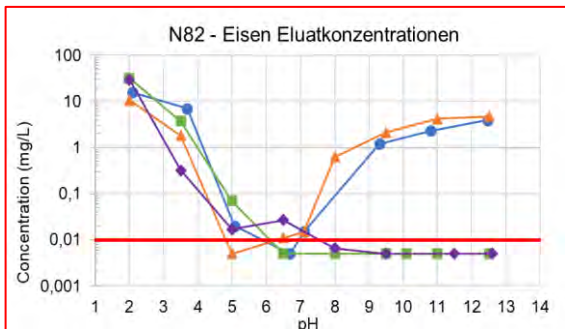
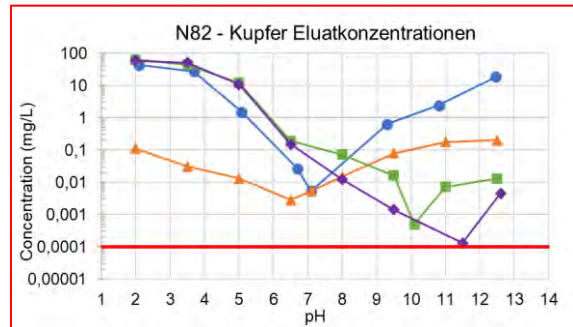
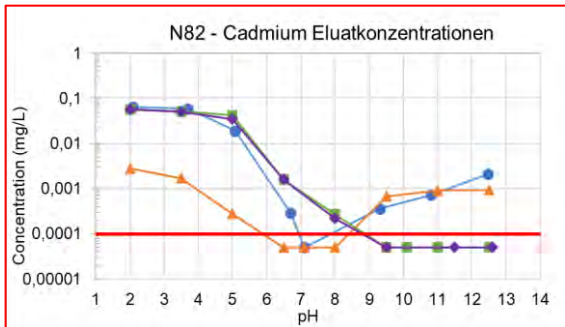
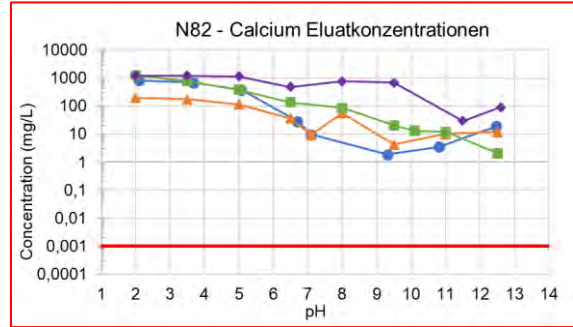
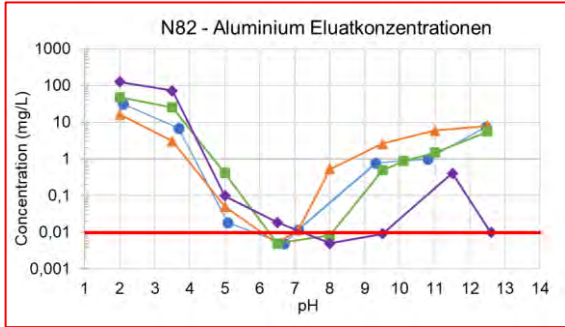
Im Fokus der Ergebnisauswertung der Altlast N82 standen die Hauptkontaminationen Zink, Kupfer und Blei. Für die Elemente Al, Ca, Cd, Fe, Mg, Si und Zn wurden ebenso Modelle in LeachXS™ erstellt.

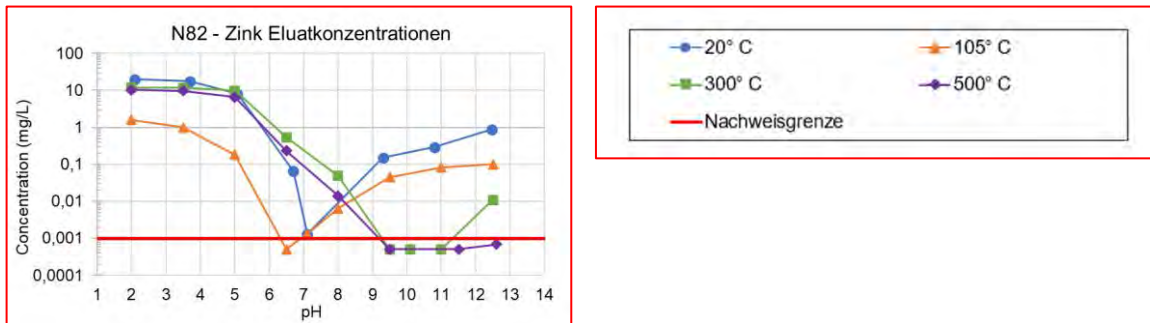
Eluatkonzentrationen N82

Die pH-abhängigen Eluatkonzentrationen der Altlast N82 sind in Abbildung 249 ersichtlich. Ca und Mg weisen mit bis zu 1.000 mg/l bzw. 500 mg/l die höchsten Konzentrationen auf. Die Elemente Al, Cu, Fe, Pb, Si und Zn liegen in etwa im Bereich 10 bis 100 mg/l. Cd zeigt die geringste Auslaugbarkeit. In Bezug auf die Behandlungstemperatur des Probematerials lassen sich bei den Eluatuntersuchungen folgende Auffälligkeiten feststellen:

- Die Eluatkonzentrationen der 105 °C-Probe im sauren Bereich sind für die Elemente Al, Ca, Cd, Cu, Mg, Pb und Zn deutlich niedriger als jene, die bei den anderen Behandlungstemperaturen gemessen werden.
- Bei pH-Werten > 7 ist bei den Elementen Cd, Cu, Mg, Si und Zn ein Einfluss der Behandlungstemperatur erkennbar. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Auslaugbarkeit dieser Elemente.
- Die Eluatkonzentrationen der Elemente Al, Cd, Cu, Fe, Pb und Zn weisen im Bereich von etwa pH 7 ein Minimum auf und steigen mit zunehmenden pH-Wert wieder an.
- Die 500 °C-Probe zeigt mit Ausnahme von Ca für die übrigen Elemente die geringste Mobilität im Vergleich mit der 20 °C-, der 105 °C- und der 300 °C-Probe.
- Für die Elementen Al, Ca, Mg und Si werden die maximalen Eluatkonzentrationen bei der 500 °C-Probe im stark sauren Bereich (pH 2) ermittelt.
- Die Mobilität von Ca ist über den gesamten pH-Bereich in der 500 °C-Probe am höchsten.

Abbildung 249 Eluatkonzentrationen N82 Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, Si und Zn





Modellierungsergebnisse N82

Bei der Modellierung wurden die variablen Konzentrationen an Eisenhydroxide und CO_3^{2-} für jedes Element einzeln angepasst.

Aluminium (Abbildung 250)

Die sauren Bereich steigen die Eluatkonzentrationen von Al mit zunehmender Behandlungstemperatur des Probematerials von 15 mg/l auf über 100 mg/l an. Mit zunehmenden pH-Wert nimmt die Mobilität bis etwa pH 6,5 ab, um im weiteren pH-Verlauf wieder anzusteigen. Ausgenommen hiervon ist die 500 °C-Probe, die bei pH > 6,5 keinen Anstieg aufweist. Die Modellierung ergibt für die berechneten Eluatkonzentrationen eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Eine Ausnahme stellen die Eluate der 500 °C-Probe bei pH > 5 dar. Hier tritt eine signifikante Abweichung zwischen modellierten Konzentrationen und experimentellen Daten auf. Bei den berechneten Phasen nimmt Boehmit, ein Aluminiumhydroxid, den größten Anteil ein. Im pH-Bereich 3,5 bis 6 wird Aluminium als Kaolinit und Alunit vorhergesagt.

Calcium (Abbildung 251)

Bei Calcium liegen die maximale Eluatkonzentrationen im sauren Bereich vor und betragen in der 20 °C-, der 300 °C- und der 500 °C-Probe etwa 1.000 mg/l. Die geringeren Eluatkonzentrationen in diesem pH-Bereich bei der 105 °C-Probe könnten auf die zufällige Probenahme zurückzuführen sein. Im weiteren pH-Verlauf gehen die Eluatkonzentrationen der 20 °C- und der 105 °C-Probe bei pH 9,5 auf ein Minimum zurück, um dann wieder leicht anzusteigen. Die 300 °C-Probe zeigt eine abnehmende Mobilität über den gesamten pH-Bereich. Die gemessenen Ca-Konzentrationen in den Eluaten der 500 °C-Probe verlaufen bis pH 11,5 relativ konstant mit ca. 1.000 mg/l und gehen dann um zwei Größenordnungen zurück. Zu erkennen ist auch, dass mit Erhöhung der Behandlungstemperatur die Auslaugbarkeit im alkalischen Milieu steigt. Der Vergleich der

berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt bei der 105 °C-, der 300 °C- und der 500 °C-Probe eine gute Übereinstimmung im gesamten pH-Bereich. Die modellierten Werte für die Eluate der 20 °C-Probe zeigen bei pH > 5 große Abweichungen von den experimentellen Daten. Die Anpassung der Konzentration von CO_3^{2-} führt zur Berichtigung der Calcitphase und folglich der Modellkurve. Die CO_3^{2-} -Konzentration entspricht bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe 10.000 mg/kg. Um eine Annäherung an die Messpunkte zu ermöglichen, wurde diese bei der 300 °C- und der 500 °C-Probe auf 17.500 mg/kg erhöht. Es liegen bei allen Modellen Eisenhydroxidkonzentrationen von 3.000 mg/kg vor.

Cadmium (Abbildung 252)

Die maximale Auslaugbarkeit von Cadmium liegt im sauren Bereich bis etwa pH 5 (20 °C-, 300 °C- und 500 °C-Probe bzw. bis etwa pH 3,5 (105 °C-Probe) zwischen 0,003 mg/l und 0,07 mg/l. Im weiteren pH-Verlauf nehmen die Eluatkonzentrationen der 20 °C- und 105 °C-Probe auf ein Minimum bei etwa pH 7 ab, um im alkalischen Milieu wieder anzusteigen. In der 300 °C- und der 500 °C-Probe nimmt die Mobilität um mehrere Größenordnungen bis unter die Nachweisgrenze ab (bei pH 9,5) und bleibt bei weiter ansteigendem pH-Wert auf diesem Konzentrationsniveau. Der Vergleich zwischen den modellierten und gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt bis etwa pH 5 (20 °C-, 300 °C- und 500 °C-Probe) eine gute Übereinstimmung. Mit dem Modell wurde die geringste Cd-Mobilität bei pH 10,5 berechnet, was die gemessenen Konzentrationen bei der 300 °C- und der 500 °C-Proben in guter Näherung bestätigen. Für die Modellierung wurde ein Eisenhydroxidgehalt von 1.000 mg/kg angesetzt.

Kupfer (Abbildung 253)

Die maximalen Eluatkonzentrationen von Kupfer werden im sauren Bereich bis pH 3,5 gemessen. Auffällig ist, dass in diesem pH-Bereich die 105 °C-Probe um zwei Größenordnungen geringere Cu-Konzentrationen aufweist. Mit zunehmenden pH-Wert nehmen die Eluatkonzentrationen der 20 °C- und der 105 °C-Probe bis pH 7 ab und steigen dann im alkalischen Milieu wieder an, wobei die Konzentrationen ähnliche Werte erreichen, die im stark sauren Bereich gemessen werden. Die Cu-Konzentrationen der 300°C- und der 500 °C-Probe nehmen bei pH > 5 kontinuierlich ab und erreichen signifikant niedrigere Werte im Vergleich zur 20 °C- und zur 105 °C-Probe. Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt zumindest im stark sauren (pH < 3) und stark alkalischen Milieu (pH > 10,5) eine gute Übereinstimmung. Die Modellierung der Phasen weist auf Kupferadsorption an Eisenhydroxidphasen hin, welche bei 105 °C als einzige Phase vorliegen. Bei den hohen Temperaturen verkleinert sich der Bereich der Eisenhydroxidphasen und $\text{Cu}(\text{OH})_2$ bzw. Tenorit dominieren in der

Modellierung. Tenorit ist ein Kupfer(II)-oxid. Die eingestellte Eisenhydroxidkonzentration in LeachXS™ entspricht 100 mg/kg.

Eisen (Abbildung 254)

Die maximale Auslaugbarkeit von Eisen liegt bei einem pH-Wert von 2 zwischen 10 mg/l und 30 mg/l. Bei dem mit 20 °C und 105 °C behandelten Probematerial ist eine Abnahme der Mobilität bis pH 7 zu verzeichnen. Bei höheren pH-Werten steigen die Eluatkonzentrationen der 20 °C- und der 105 °C-Probe wieder an. Die Eluate der 300 °C- und der 500 °C-Probe zeigen dagegen ab einem pH-Wert von 6,5 einen nahezu konstanten Konzentrationsverlauf. Die berechneten Eluatkonzentrationen zeigen nur im pH-Bereich < 4 eine Übereinstimmung mit den Messwerten und weisen ein Minimum bei pH 8 auf. Tendenziell wurden diese Minima durch die Messwerte bei den Eluaten der 20 °C- und der 105 °C-Probe bestätigt. Allerdings liegen hier die minimalen Konzentrationen bei pH 7 um Größenordnungen höher als die berechneten Eluatkonzentrationen.

Magnesium (Abbildung 255)

Magnesium verzeichnet im sauren Bereich die höchsten Eluatkonzentrationen, die mit Ausnahme der Eluate der 105 °C-Probe bei 150 mg/l bis 300 mg/l liegen. Die gemessenen Konzentrationen bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe nehmen bei pH > 5 ab und liegen schließlich bei Werten zwischen 0,5 mg/l und 0,8 mg/l (pH 12,5). Bei der 300 °C-Probe wird eine lineare Abnahme der Eluatkonzentrationen mit steigendem pH-Wert auf 0,008 mg/l ermittelt. Die Konzentrationen in den Eluaten der 500 °C-Probe verlaufen bis pH 9,5 annähernd konstant und reduzieren sich dann im stark alkalischen Bereich um mehrere Größenordnungen. Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt im stark sauren (pH < 4) und im alkalischen Bereich (pH > 9) für alle Proben eine gute Übereinstimmung. Ausgenommen hiervon sind die Messwerte von der 300 °C-Probe, bei denen sich die Übereinstimmung nur auf den pH-Bereich < 4 bezieht. Bei pH 4 bis 9 sind nur bei der 500 °C-Probe die berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen in ähnlichen Bereichen. Der Eisenhydroxidgehalt wurde bei der Modellierung an 250.000 mg/kg angepasst.

Blei (Abbildung 256)

Die maximalen Eluatkonzentrationen liegen mit Ausnahme der 105 °C-Probe bei 20 bis 30 mg/l und treten bei pH 2 auf. Die geringste Mobilität von Blei bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe ist bei pH 7 zu beobachten. Beim Probematerial, das mit 300 °C und 500 °C behandelt wurde, verschiebt sich das Minimum der Pb-Konzentration im Eluat auf pH 10 bzw. pH 9,5 bis 11,5. Nur die für die 300 °C- und die 500 °C-Probe berechneten

Eluatkurven zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Bei den dabei vorkommenden Phasen, Plattnerit und Cl-Pyromorphit, handelt es sich um Blei(IV)-Oxide und -phosphate. Für die 20 °C- und die 105 °C-Probe wurden im kleineren Maßstab Cl-Pyromorphit berechnet. In der 20 °C-Probe lässt sich Minium sowie ein Bleioxid erkennen. Gemäß der Modellierung liegen in der 105 °C-Probe Phosphate als Plumbogummit vor. Für die Modellierung von Blei wurde ein Eisenhydroxidgehalt von 50 mg/kg verwendet.

Silicium (Abbildung 257)

Die Si-Konzentrationen in den Eluaten liegen bei allen Proben im Vergleich zu den anderen Elementen nicht unter 0,1 mg/l. Die maximale Mobilität steigt bei der 500 °C-Probe auf über 100 mg/l an. Im sauren Bereich ist die Löslichkeit am höchsten. Die mit 500 °C behandelte Probe zeigt einen abnehmenden linearer Trend der Eluatkonzentrationen. Bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe tritt die geringste Konzentration in den Eluaten bei pH 7 auf und steigt im alkalischen Bereich wieder an. Bei der 300 °C-Probe liegt das Minimum bei pH 10. Im Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt sich die beste Übereinstimmung bei der 105 °C- und der 300 °C-Probe. Die modellierten Siliciumphasen weisen keine vollständige Löslichkeit im sauren Bereich auf wie es aufgrund der Messwerte zu erwarten wäre. Silicium liegt in allen Modellen in verschiedensten Phasen vor. Das thermodynamische Gleichgewicht konnte nicht erreicht werden und die Phasenbereiche führen zu sprunghaften Diagrammen. Das Modell der 105 °C-Probe ergibt das plausibelste Ergebnis.

Zink (Abbildung 258)

Die maximalen Eluatkonzentrationen tritt bei allen vier Proben bei pH 2 auf. Die gelöste Menge liegt dabei, mit Ausnahme der 105 °C-Probe, zwischen 10 mg/l und 20 mg/l. Die geringste Mobilität von Zink zeigt sich bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe bei einem pH-Wert zwischen 6,5 und 7 mit Eluatkonzentrationen nahe an der Nachweisgrenze. In den Eluaten der 300 °C- und der 500 °C-Probe sind die Zn-Konzentrationen in diesem pH-Bereich höher und liegt erst ab einem pH-Wert von 9,5 unter der Nachweisgrenze und bleiben mit steigenden pH-Wert auf diesem Konzentrationsniveau. Die berechneten Eluatkurven für die 20 °C- und die 105 °C-Probe zeigen im sauren sowie alkalischen Bereich eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Im neutralen Bereich sind die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Konzentrationen beträchtlich. Die Modelle weisen Eisenhydroxide mit einer Konzentration von 10.000 mg/kg, Ca-Zincat und Zincit auf. Das thermodynamische Gleichgewicht wurde bei 300 °C und 500 °C im alkalischen Milieu nicht erreicht.

Abbildung 250 Modellierung N82 Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

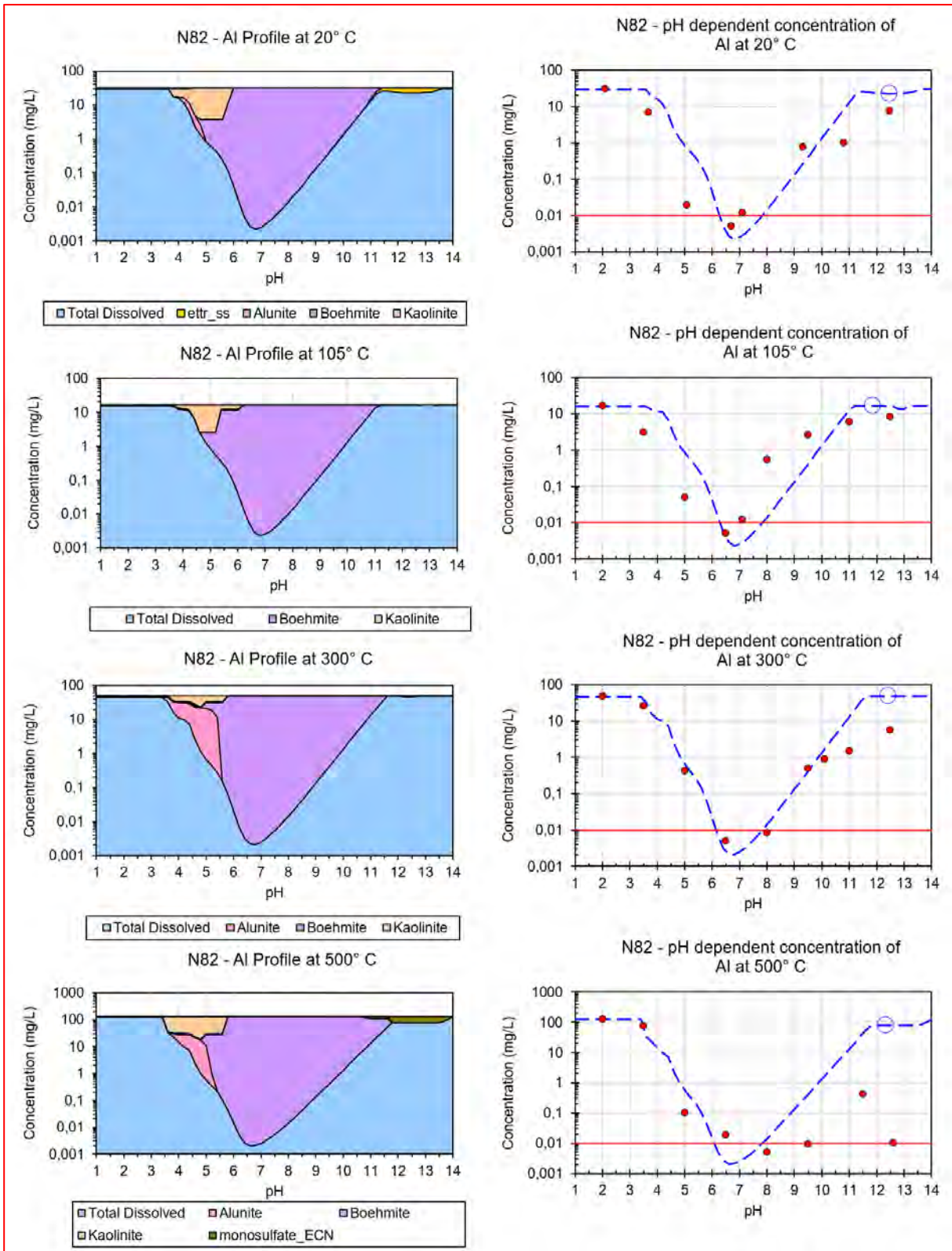


Abbildung 251 Modellierung N82 Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

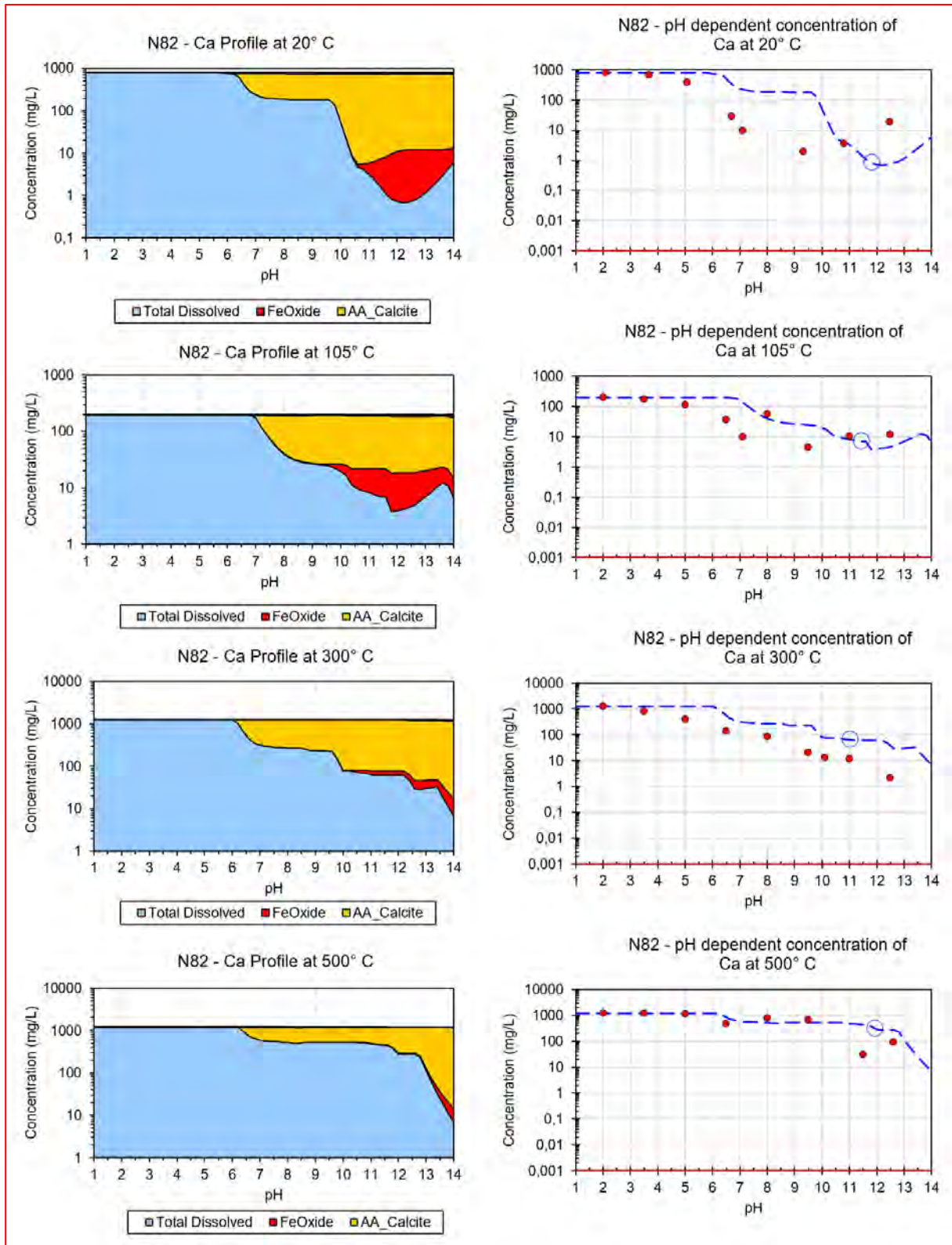


Abbildung 252 Modellierung N82 Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

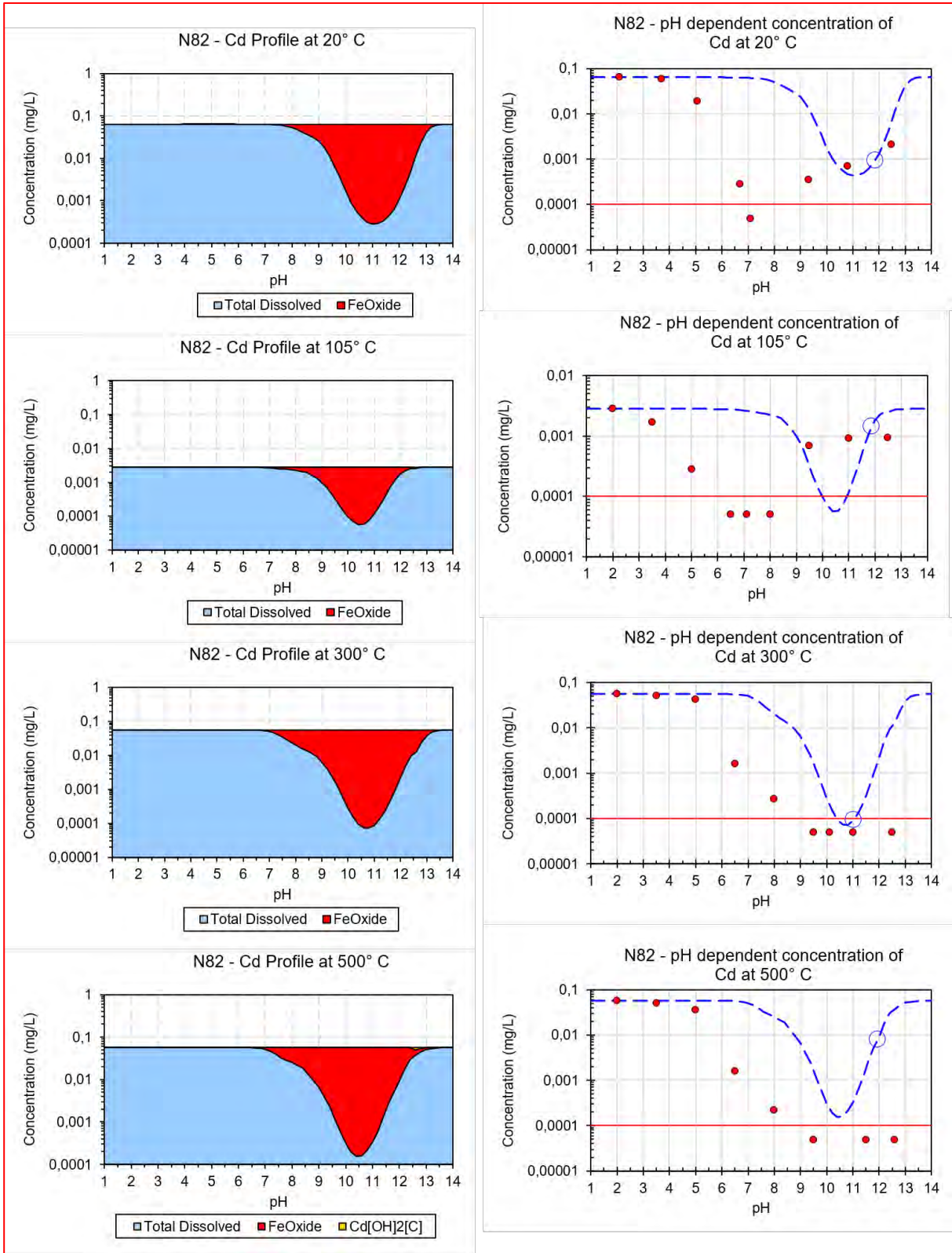


Abbildung 253 Modellierung N82 Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

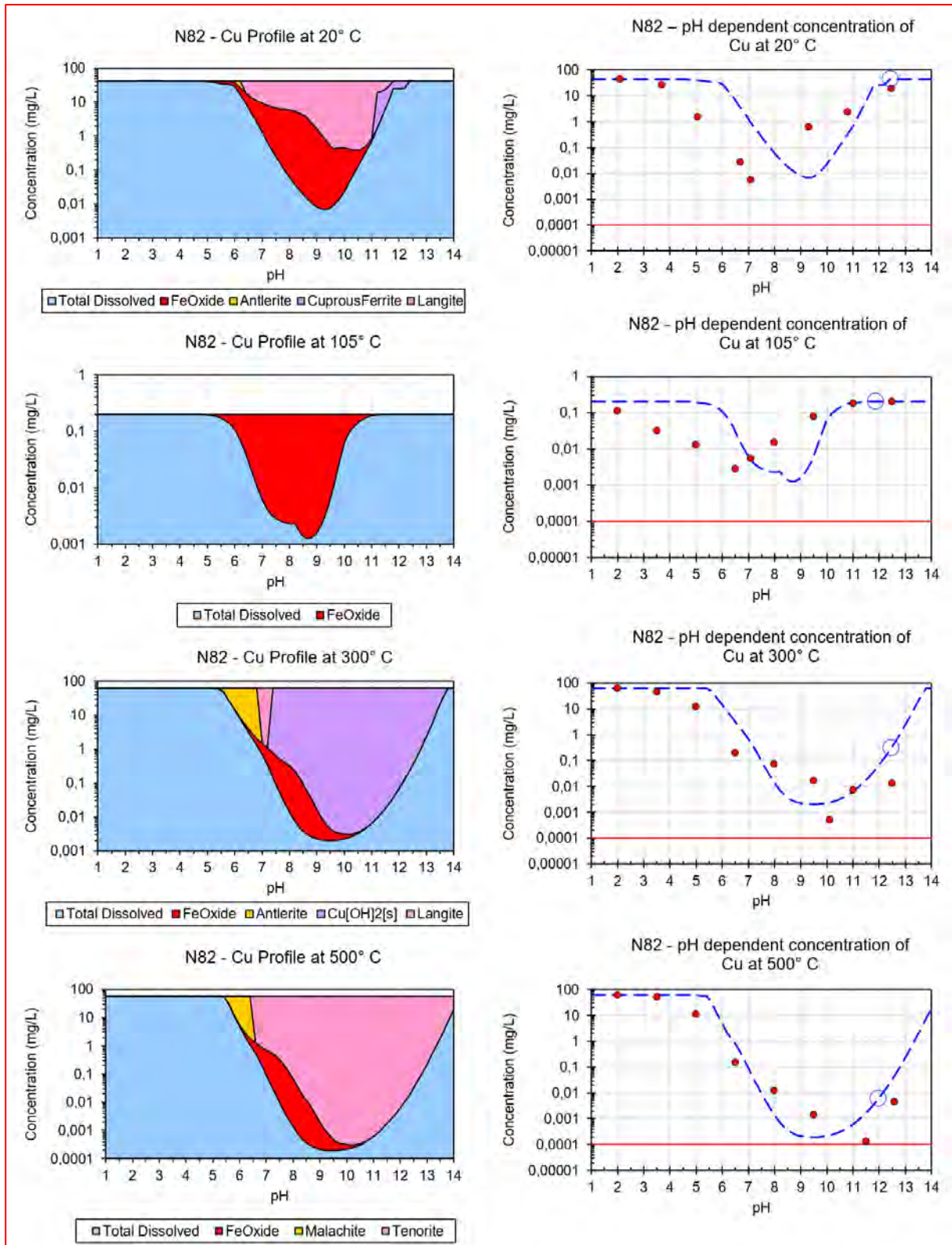


Abbildung 254 Modellierung N82 Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

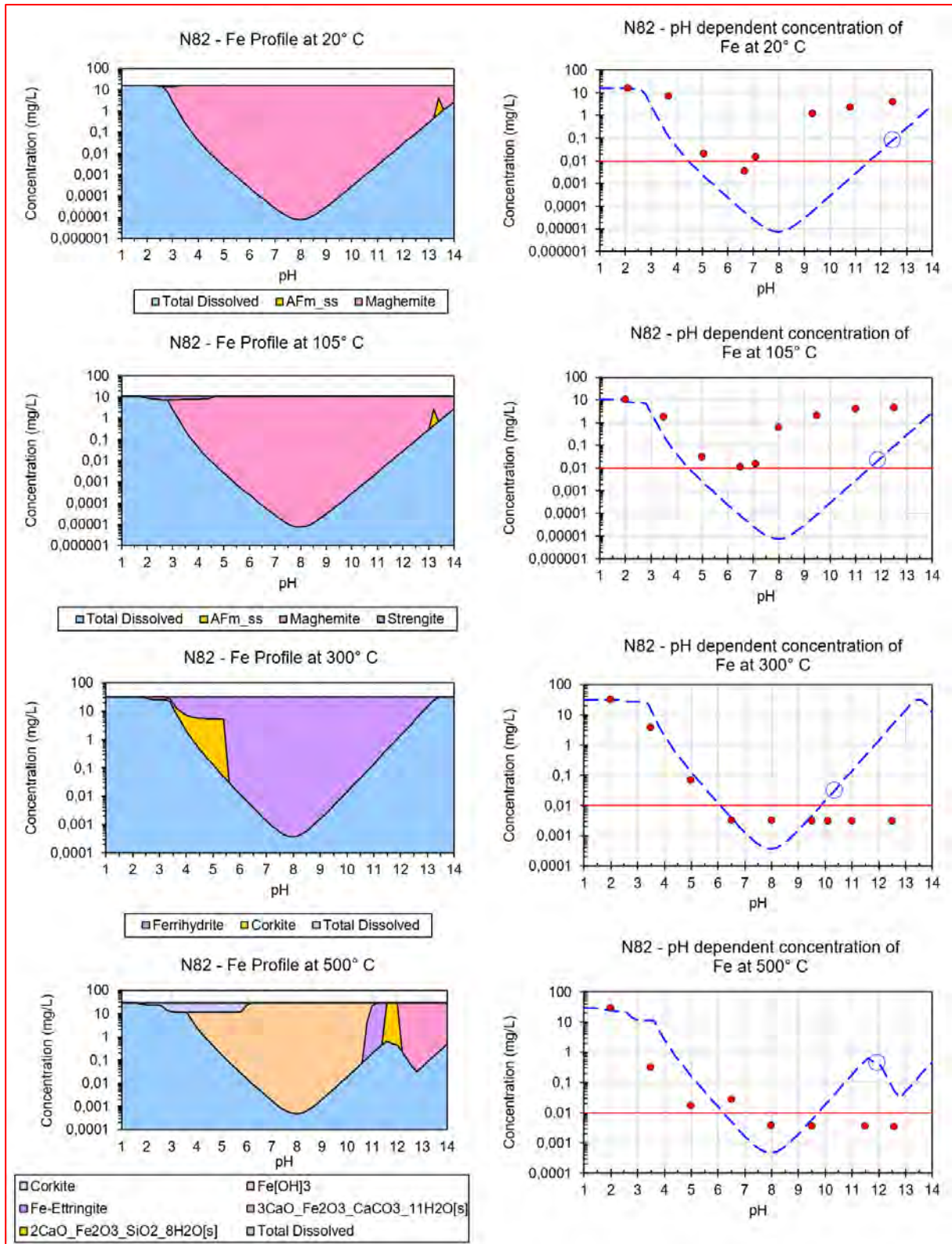


Abbildung 255 Modellierung N82 Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

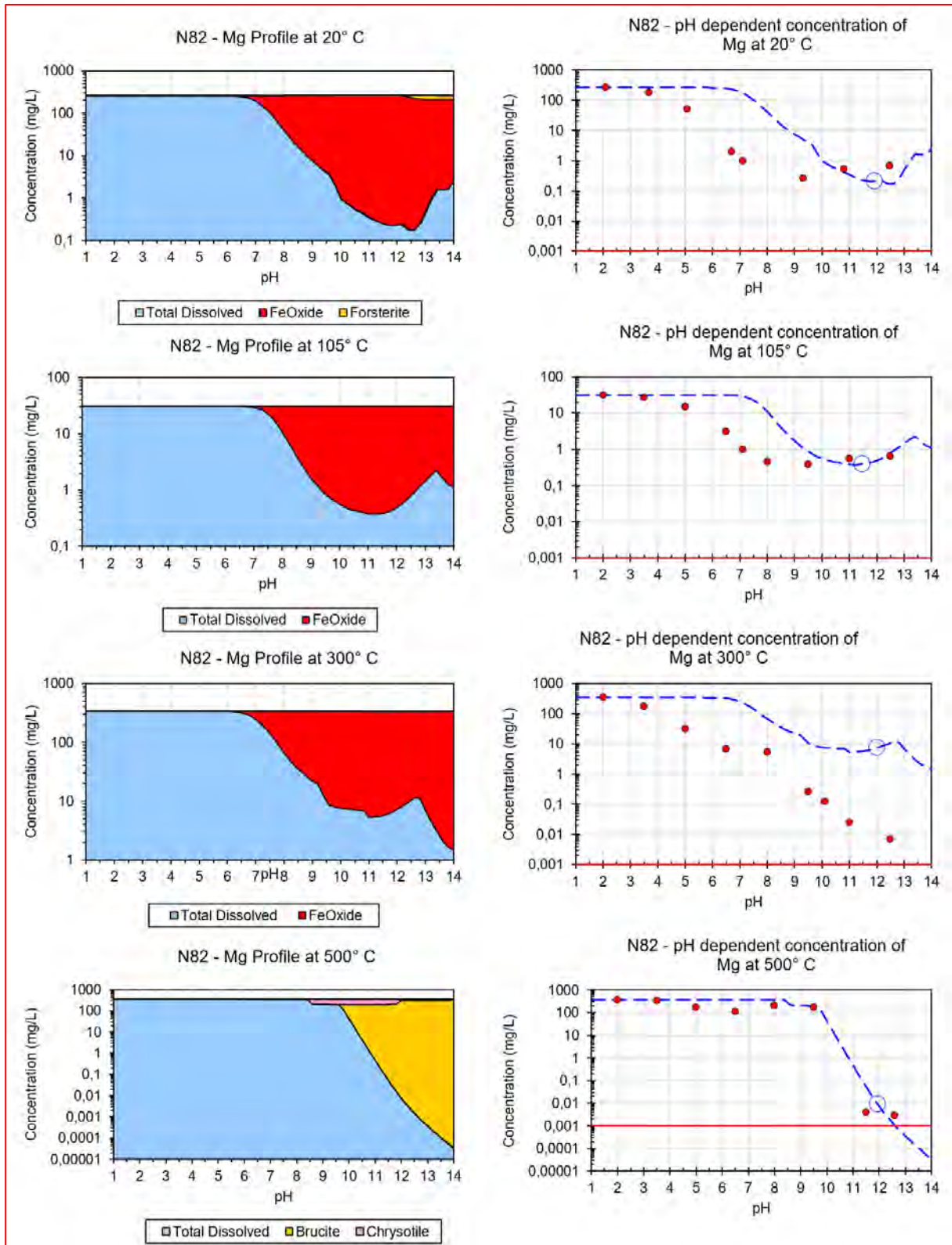


Abbildung 256 Modellierung N82 Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

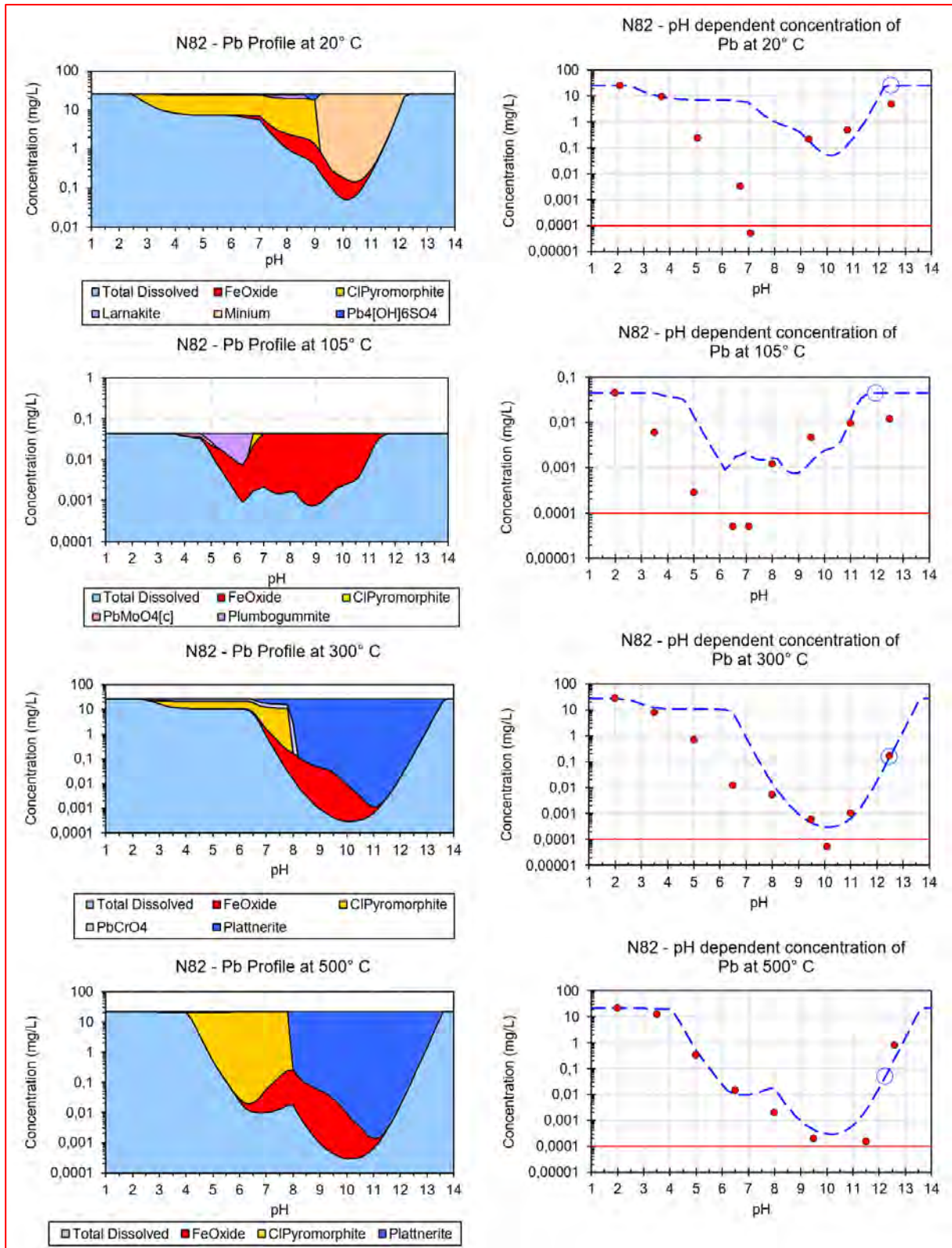


Abbildung 257 Modellierung N82 Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

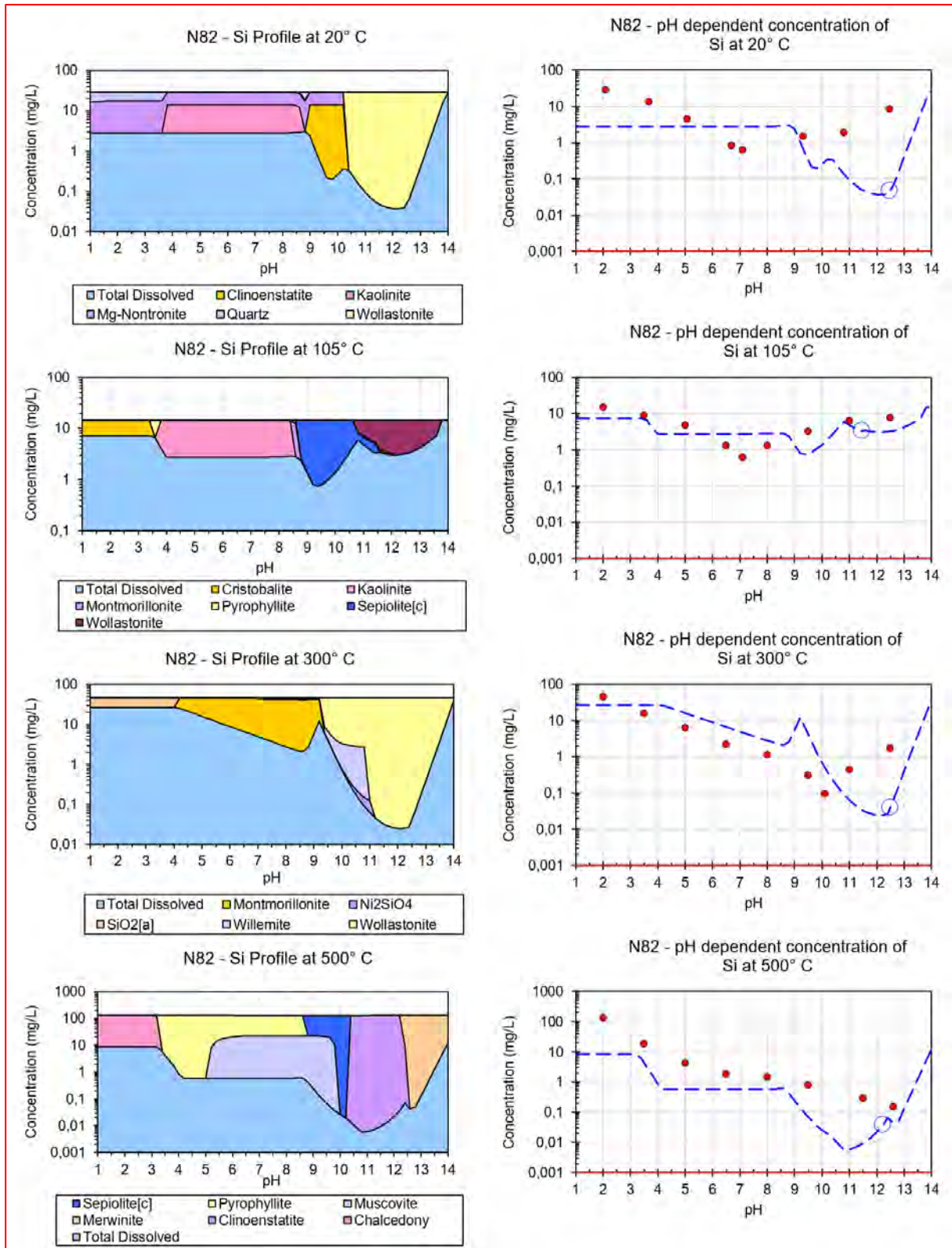
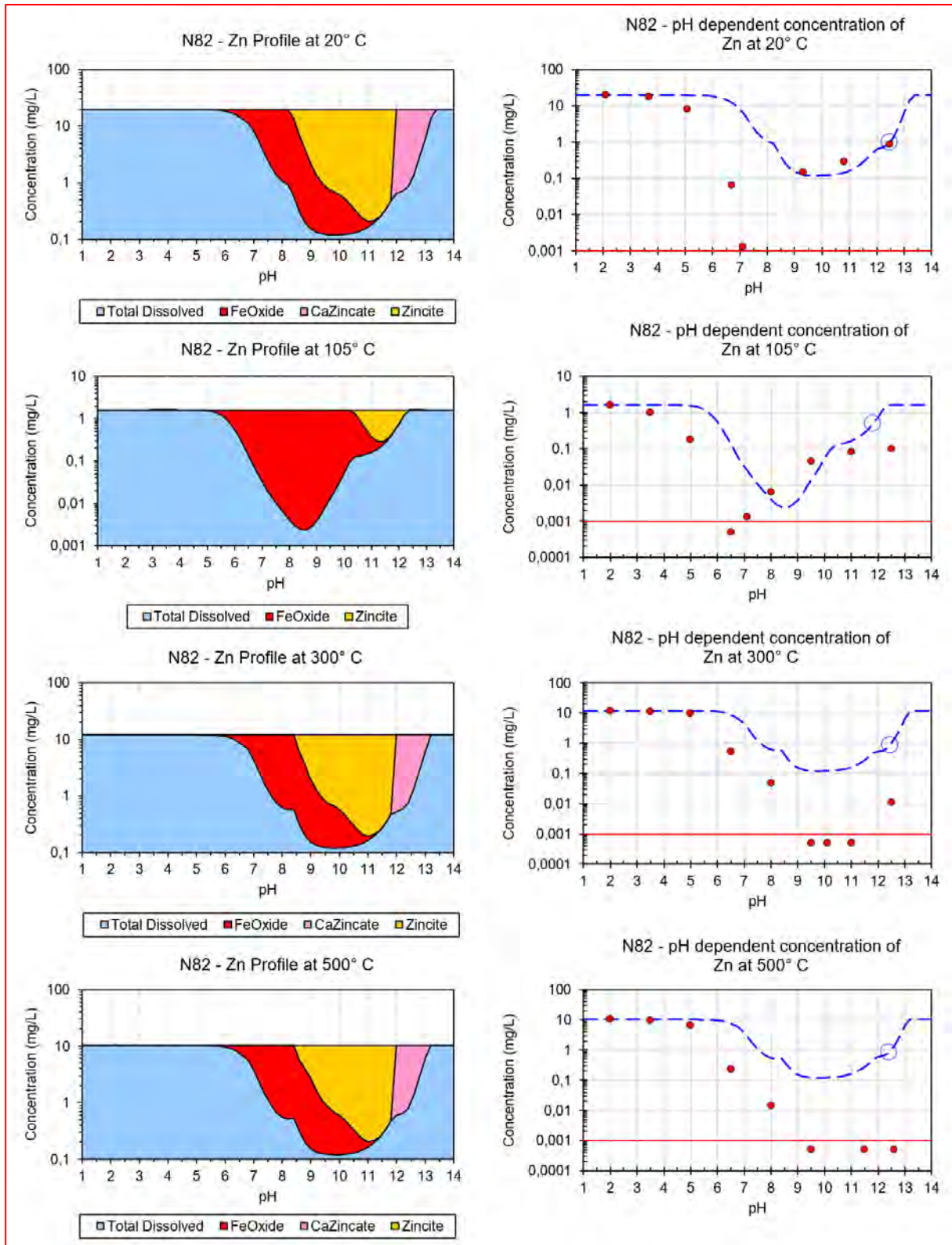


Abbildung 258 Modellierung N82 Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)



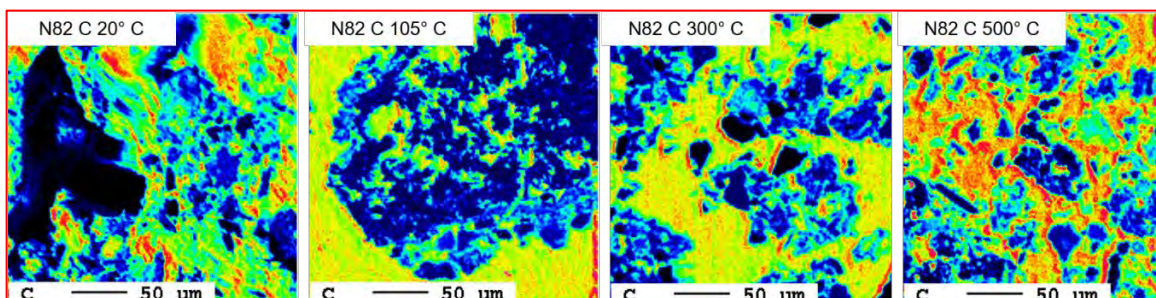
Mikrosondenergebnisse N82

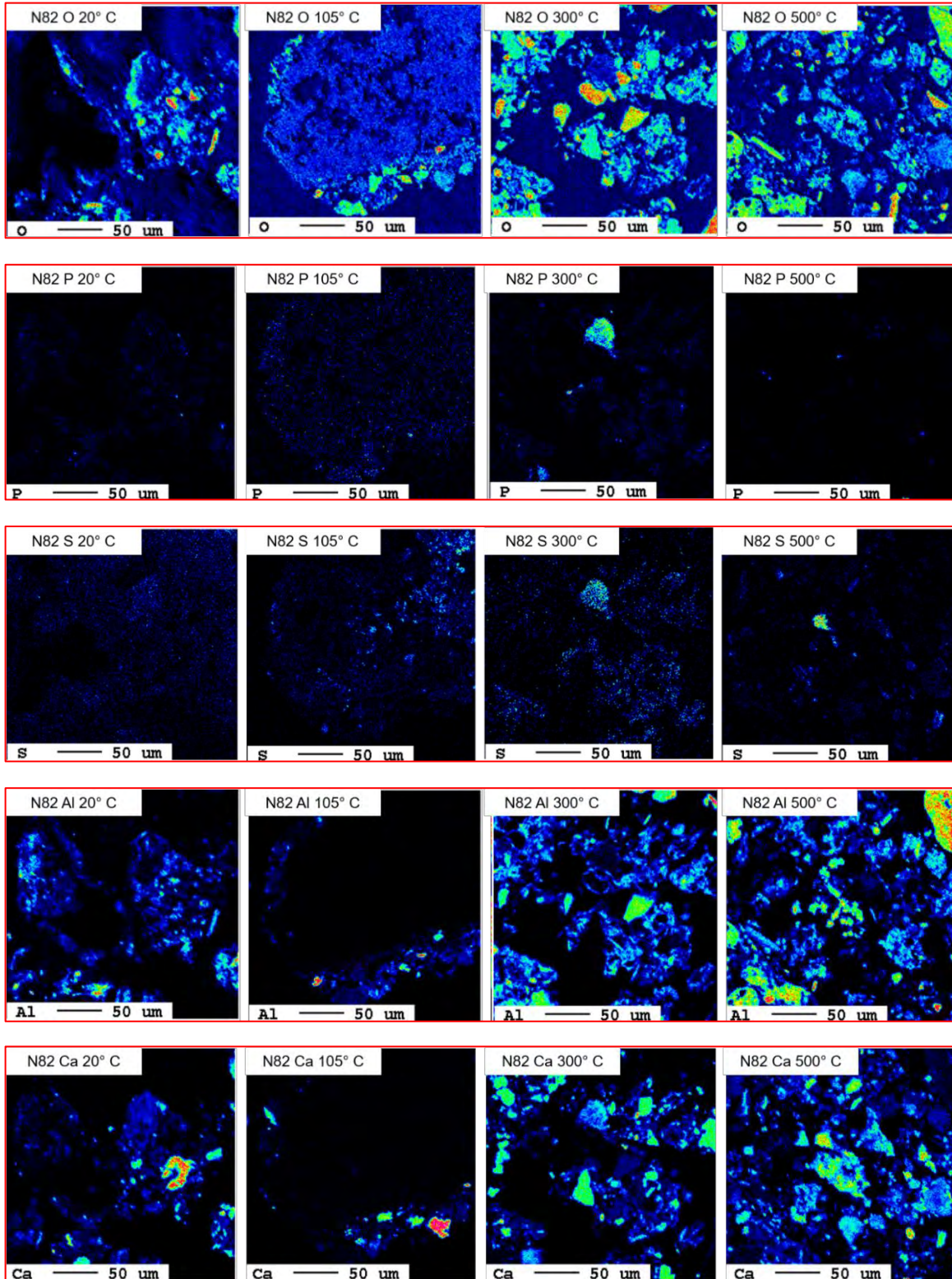
Die Elementarverteilungskarten in Abbildung 259 zeigen bei der 20 °C-Probe einen konzentrierten Pb-Bereich, der mit O, Al, Si und teils mit Zn korreliert. Zn sowie Pb können dabei in Form von Silikaten auftreten. Bei der 105 °C-Probe wird ein großes Pb-Partikel aufgenommen. Der Zusammenhang mit S und O in Teilbereichen lässt dabei auf ein Bleisulfat vermuten. Kern (2021) weist ebenso auf das Vorhandensein von Bleicarbonat hin. An den Pb-freien Korngrenzen können Konzentrationen an Al, Fe, Ca, Mg, Si und O festgestellt werden. Dabei kann es sich um Al-, Fe- und Si-Oxide handeln. Zusätzlich ist zu vermerken, dass sich durch die thermische Behandlung auf 105 °C das zuvor vorliegende Bleisilikat in Bleisulfat, Bleizinksulfat und Bleicarbonat zersetzt hat (Kern 2021).

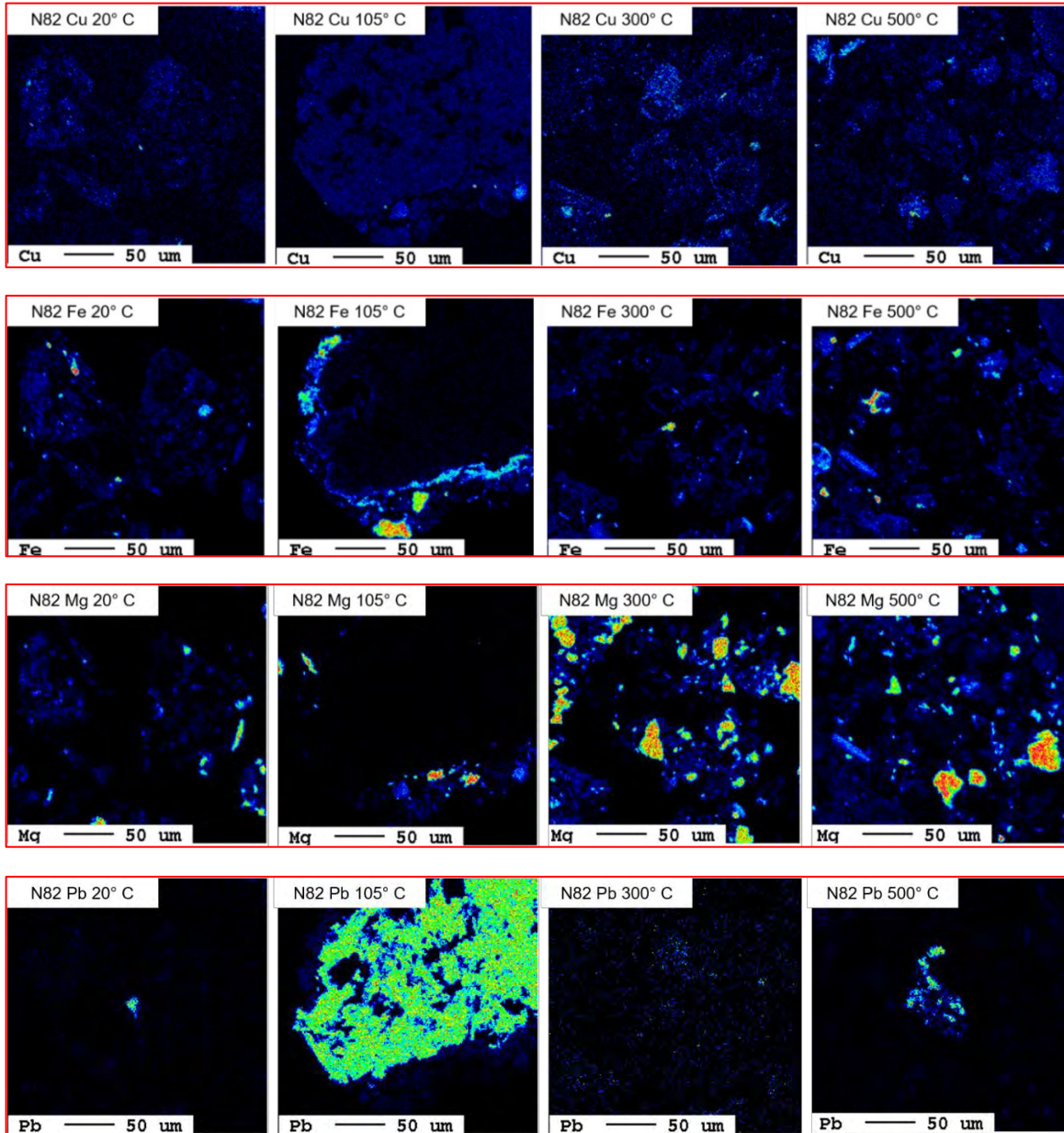
Bei der 300 °C-Probe tritt ein Korn mit Korrelationen von P, S, Cu, Zn, Si und kleinen Konzentrationen an Pb auf. Si ist dabei hochkonzentriert im Korn und Zn nur an den Korngrenzen vorliegend. Dabei kann es sich um Phosphate, Sulfate und Silikate handeln.

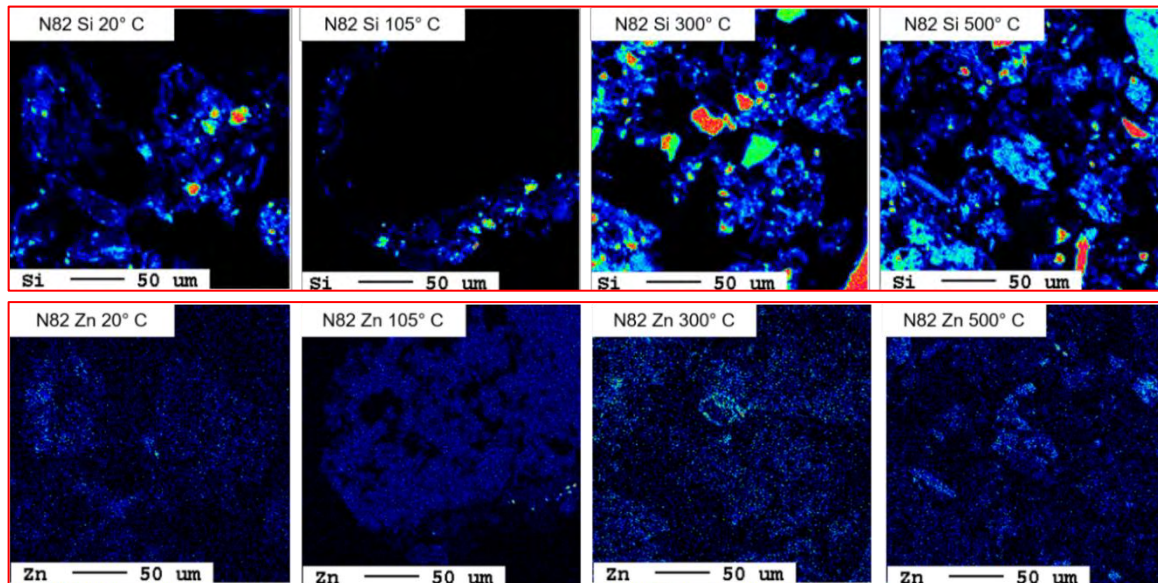
Bei der 500 °C-Probe kann bei Pb wiederum, wie schon bei der 20 °C-Probe, ein Zusammenhang mit Al, Si und O erkannt werden und liegt vermutlich in silikatischer Bindung vor. Die Konzentrationen an Pb zeigen sich entgegengesetzt zu jenen von Ca (Kern 2021).

Abbildung 259 Elementarverteilungskarten N82 von C, O, P, S, Al, Ca, Fe, Mg, Pb, Si, Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis - grün – gelb – orange – rot – pink – weiß)









5.5.3 Altlast ST30 Lederfabrik Schmidt

Bei der Altlast ST30 liegt Chrom als Hauptkontamination vor. Kupfer und Cadmium überschreiten ebenso die Richtwerte laut ÖNORM 2088-2. Gegenstand der Auswertung sind zusätzlich die Elemente Al, Ca, Fe, Mg, Pb, Si und Zn.

Eluatkonzentrationen ST30

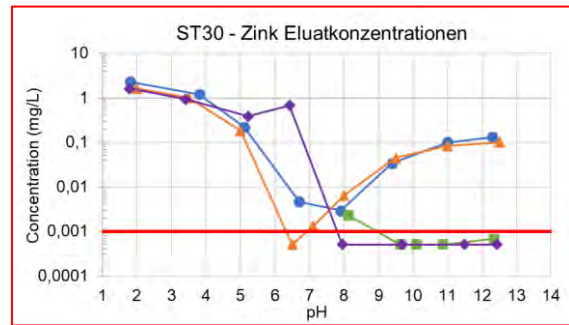
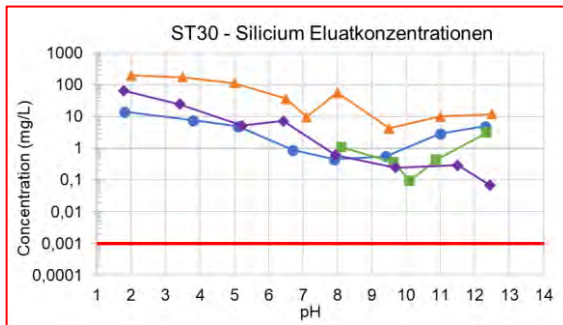
Bei der 300 °C-Probe konnten nur Eluatkonzentrationen ab pH 8,2 bestimmt werden. Die Diagramme der Eluatkonzentrationen sind in Abbildung 260 zusammengefasst. Die höchsten Konzentrationen in den Eluaten des untersuchten Probematerial werden für die Al, Ca, Fe, Mg und Si nachgewiesen. Die Elemente Cr, Pb und Zn weisen eine maximale Auslaugbarkeit bis zwischen 1 mg/l und 5 mg/l auf. Die geringsten Maximalkonzentrationen treten bei Cu und Cd auf. Der Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Eluatkonzentrationen lässt sich zusammenfassend wie folgt darstellen:

- Bei den Elementen Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Mg, Pb und Zn treten die maximalen Konzentrationen in den Eluaten der 500 °C-Probe auf: Cu und Pb bis pH 4,5; Al und Zn bis pH 7,5; Cd und Cr bis pH 8; Mg bis pH 10,5; Ca pH 1,8 bis pH 12,5.
- Die Elemente Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, und Zn zeigen eine Abnahme der Mobilität im alkalischen Bereich mit steigender Behandlungstemperatur auf 300 °C bzw. 500 °C.

- Cr verzeichnet ebenso eine höhere Mobilität bei steigenden Behandlungstemperaturen. Allerdings sinkt im stark alkalischen Milieu die Eluatkonzentration von Cr in der 500 °C-Probe auf den in der 20 °C-Probe gemessenen Wert.
- Si weist eine lineare Abnahme der Mobilität mit Zunahme des pH-Wertes auf. Die Eluatkurve der 500 °C-Probe zeigt dabei die größte Abnahme.
- Bei Mg ist eine Mobilisierung mit zunehmender Behandlungstemperatur bis zum pH-Wert 9,5 zu erkennen. Im stark alkalischen Bereich liegen die Eluatkonzentrationen der 300 °C- und der 500 °C-Probe unter denen, die in den übrigen Proben gemessen wurden.
- Bei den Elementen Al, Cd, Fe, Pb, Zn ist bei allen Behandlungstemperaturen ein Minimum der Eluatkonzentrationen im neutralen Bereich zu erkennen.

Abbildung 260 Eluatkonzentrationen ST30 Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Pb, Si und Zn





Modellierungsergebnisse ST30

Für die Altlast ST30 liegen bei der 300 °C-Probe die Eluatkonzentrationen ab dem pH-Wert 8,2 vor. Aufgrund der fehlenden Daten können die erstellten Modelle nur begrenzt in die Ergebnisauswertung miteinbezogen werden. Vor allem bei den Elementen Cd, Fe und Pb ist die Simulation fehlerbehaftet, da eine Reihe von gemessenen Eluatkonzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze liegen. Für die Behandlungstemperaturen 20 °C, 105 °C und 500 °C sind alle Laborwerte vorhanden.

Aluminium (Abbildung 261)

Die Eluate der 20 °C- und der 105 °C-Probe zeigen die höchsten Konzentrationen im stark sauren Bereich und nehmen dann bis pH 6,5 auf ein Minimum ab. Im weiteren pH-Verlauf steigen die Al-Konzentrationen wieder an. Die Eluate der 300 °C-Probe nehmen im alkalischen Bereich ebenfalls zu. Bei den Eluaten der 500°C-Probe nimmt die Mobilität im alkalischen Bereich deutlich ab. Die Phasenmodellverläufe bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe stimmen in etwa mit den gemessenen Konzentrationen überein. Dies trifft auch auf den alkalischen Bereich der 300 °C-Probe zu, der ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messergebnissen zeigt. Bei der 500 °C-Probe ist hingegen keine Korrelation zwischen Modell und den tatsächlichen Werten ab pH 8,2 gegeben. Die vorgeschlagenen Hauptphasen ergeben bei allen Behandlungstemperaturen ein ähnliches Bild. Sie sind aus Aluminiumoxiden und -hydroxiden aufgebaut.

Calcium (Abbildung 262)

Die höchsten Ca-Konzentrationen in den Eluaten von allen Proben treten im sauren Bereich auf. Mit steigendem pH-Wert nimmt die Mobilität von Ca ab. Dabei treten deutliche Unterschiede bei den einzelnen Proben auf. In den Eluaten der 20 °C-Probe nehmen die Ca-Konzentrationen im Bereich pH 5 bis 9,5 um etwa zwei Größenordnungen ab und steigen im stark alkalischen Milieu wieder an. Die Eluate der 105 °C-Probe verhalten sich ähnlich, allerdings ist bei pH > 9,5 kein Anstieg zu verzeichnen. In der 300 °C-Probe nimmt die Mobilität im gemessenen pH-Bereich (pH 8,2 bis pH 12,5) kontinuierlich ab. Die Ca-Konzentrationen in den Eluaten der 500 °C-Probe nehmen über den gesamten pH-Bereich leicht ab, wobei diese Probe die höchste Auslaugbarkeit von Ca im Vergleich mit den übrigen Proben aufweist. Die berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt im Bereich bis pH 5 eine gute Übereinstimmung. Im weiteren pH-Verlauf treten mit Ausnahme bei der 500 °C-Probe doch beträchtliche Abweichungen zwischen den modellierten Werten und den experimentellen Daten auf. Das Phasenbild ergibt vorliegenden Calcit und die Adsorption an Eisenhydroxide. Der in Abbildung 262 als CSH_1.8 bezeichnete Bereich besteht aus Mineralen der Calciumsilikate. Für die 500 °C-Probe berechnet die Simulation zusätzlich Ettringit. Die Konzentration an CO_3^{2-} beträgt 2.500 mg/kg. Der Eisenhydroxidgehalt liegt bei 3.000 mg/kg.

Cadmium (Abbildung 263)

Die maximalen Eluatkonzentrationen an Cadmium treten im sauren Milieu auf (pH 2) und nehmen im weiteren pH-Verlauf deutlich ab. Die Eluate der 20 °C-, der 105 °C-Probe zeigen die geringste Mobilität bei pH 6,5. Bei der 500 °C-Probe tritt das Minimum bei pH 8 auf. Die Cd-Konzentrationen im Eluat der 20 °C- und der 105 °C-Probe steigen im alkalischen Bereich wieder an, während in der 300 °C- und der 500 °C-Probe die Eluatkonzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze verbleiben. Die berechneten Eluatkonzentrationen zeigen keine Übereinstimmung mit den Messwerten. Die geringste Mobilität sollte nach dem Simulationsmodell bei einem pH-Wert von 10,2 auftreten. Laut Modell liegt Cadmium adsorbiert an Eisenhydroxide vor. Der Gehalt der Eisenhydroxidkonzentration wurde mit 500 mg/kg angesetzt.

Chrom (Abbildung 264)

Die Eluatkonzentrationen von Chrom in der 20 °C- und der 105 °C-Probe sind im sauren Bereich am höchsten und erreichen ein Minimum bei pH 6,5 bis 7, um im alkalischen Milieu wieder anzusteigen. Davon abweichend verlaufen die Konzentrationen der Cr-Eluate der 300 °C- und der 500 °C-Probe. Zum einen ist eine deutlich erhöhte Mobilität in beiden Proben festzustellen, zum anderen nehmen die Eluatkonzentration im alkalischen

Bereich bei pH > 10 ab (500 °C-Probe). Der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt eine relativ gute Übereinstimmung bis pH 5 (20 °C-, 105 °C-, 500 °C-Probe) bzw. im alkalischen Milieu (300 °C-Probe). Die für LeachXS™ veranschlagte Eisenhydroxidkonzentration beträgt 1.500 mg/kg.

Kupfer (Abbildung 265)

Die Eluatkonzentrationen von Kupfer nehmen in der 20 °C- und der 105 °C-Probe von pH 2 nach pH 6,5 um etwa zwei Größenordnungen ab. Im weiteren pH-Verlauf steigt die Mobilität wieder an. Bei pH 11 werden die bei pH 2 gemessenen Cu-Konzentrationen ermittelt. Die 300 °C-Probe zeigt einen ähnlichen Verlauf zwischen pH 8 und pH 11. Die Eluatkonzentrationen der 500 °C-Probe nehmen ebenfalls, beginnend im stark sauren Milieu, ab und erreichen bei pH 8 den niedrigsten Wert. Im weiteren pH-Verlauf ist kein signifikanter Anstieg der Cu-Konzentrationen in den Eluaten zu verzeichnen. Die berechneten Eluatkonzentrationen ergeben starke Abweichungen zu den Messwerten. Kupfer liegt adsorbiert an Eisenhydroxiden vor.

Eisen (Abbildung 266)

Die maximalen Eluatkonzentrationen von Eisen treten bei pH 2 auf. In der 20°C- und der 105 °C-Probe durchläuft die Eisenkonzentration ein Minimum bei pH 6.5 und steigt im alkalischen Bereich wieder an. Die Eluate der 500 °C-Probe zeigen bis pH 5 ebenfalls eine deutliche Abnahme der Eisenkonzentrationen bis zur Nachweisgrenze. Die weitere Erhöhung des pH-Werts führt zu keinem Konzentrationsanstieg. Die Eluate der 300 °C-Probe weisen ebenfalls einen konstanten Konzentrationsverlauf im alkalischen Bereich auf. Die geringste Mobilität von Eisen ist in der 300 °C-Probe (pH 8 bis 12,5) und in der 500 °C-Probe (pH 5 bis pH 12,5) feststellbar. Im Vergleich der berechneten mit den gemessenen Eluatkonzentration zeigt sich eine gute Übereinstimmung für den sauren Bereich (< pH 5). Für den neutralen bis alkalischen Bereich (bis etwa pH 12) ist die Abweichung zwischen Modell und Messwerten zum Teil beträchtlich.

Magnesium (Abbildung 267)

Die höchsten Magnesiumkonzentrationen in den Eluaten treten im sauren Bereich auf (20 °C- und 105 °C-Probe). Bei der 500 °C-Probe ist eine starke Mobilisierung von Magnesium sogar bis pH 8 zu beobachten. Im schwach sauren bis alkalischen Bereich nehmen die Eluatkonzentrationen, unabhängig von der Behandlungstemperatur, ab. Der Vergleich zwischen modellierten und gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt nur bei der 500 °C-Probe eine gute Übereinstimmung über den gesamten pH-Bereich. Bei den 20 °C- und 105 °C-Eluaten weichen zumindest für den stark sauren Bereich die berechneten und

gemessenen Konzentrationswerte kaum voneinander ab. Die Eisenhydroxide in LeachXS™ weisen eine Konzentration von 40.000 mg/kg auf. Bei 500 °C beinhaltet das Modell zusätzlich Brucit im Phasendiagramm, welches eine Annäherung an die tatsächlichen Messwerte ermöglichen.

Blei (Abbildung 268)

Bei Blei treten die höchsten Eluatkonzentrationen, unabhängig von der Behandlungstemperatur, im sauren Milieu auf. Mit steigendem pH-Wert erreichen die Konzentrationen ein Minimum bei pH 7 bevor sie im alkalischen Bereich wieder ansteigen. Der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt große Abweichung. Allenfalls im stark sauren und stark alkalischen Bereich lassen sich Übereinstimmungen feststellen. In den Modellen für die 20 °C- und die 500 °C-Probe ist eine hohe Abhängigkeit der Adsorption von Blei an Eisenhydroxide ersichtlich. Die Eisenhydroxidkonzentration beträgt 5.000 mg/kg. Bei der 500 °C-Probe scheint die Adsorption an Eisenhydroxide in der Realität höher zu sein, da die Eluatkonzentrationen geringer sind als im Modell.

Silicium (Abbildung 269)

Die höchsten Siliciumkonzentrationen in den Eluaten werden bei pH 2 gefunden. Dabei steigen die Konzentrationswerte in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur des Probematerials. In der 20 °C- und der 300 °C-Probe nimmt die Mobilität von Silicium bis pH 8,5 bzw. pH 10 ab und steigt bei weiterer pH-Zunahme wieder an. Dagegen ist bei den Eluaten der 105 °C- und der 500 °C-Probe eine lineare Abnahme der Siliciumkonzentrationen über den gesamten pH-Bereich zu beobachten. Die berechneten Eluatkonzentrationen zeigen eine Übereinstimmung mit den Messwerten, wenn auch bei den 20 °C- und 300 °C-Eluaten bei pH > 10 stärkere Abweichungen auftreten. Die Simulation berechnet Modelle mit einer Vielzahl an Phasen. Die tatsächlichen Konzentrationsverläufe können mit der Modellierung angenähert werden. Es scheint so, als geht Silicium in der 20 °C- und der 105 °C-Probe als Wollastonit mit der Zunahme der Behandlungstemperatur in Diopsid über.

Zink (Abbildung 270)

Die maximalen Eluatkonzentrationen von Zink treten, unabhängig von der Behandlungstemperatur, bei einem pH-Wert von 1,8 mit ca. 2 mg/l auf. Die Zn-Konzentrationen der Eluate aus der 20 °C- und der 105 °C-Probe erreichen bei pH 7 bzw. pH 8 ein Minimum und steigen mit zunehmendem pH-Wert wieder an. Die Eluate der 300 °C- und der 500 °C-Probe zeigen eine deutliche Konzentrationsabnahme bei pH 8,2 bzw.

6,5. Auswirkungen der unterschiedlichen Behandlungstemperaturen auf die Mobilität von Zink sind nur bei der 300 °C- und der 500 °C-Probe für den alkalischen Bereich feststellbar, in dem mit Temperaturzunahme die Eluatkonzentrationen deutlich sinken. Die berechneten Eluatkurven für die 20 °C- und die 105 °C-Probe entsprechen annähernd den Verläufen der gemessenen Konzentrationen. Bei der 300 °C- und der 500 °C-Probe lassen sich keine Übereinstimmungen feststellen. Die angesetzte Eisenhydroxidkonzentration liegt bei 30.000 mg/kg. Vorwiegend ist Zink an Eisenhydroxide adsorbiert. Im alkalischen Bereich weist das Modell Zink in Form von Zincit und Ca-Zinkat auf.

Abbildung 261 Modellierung ST30 Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

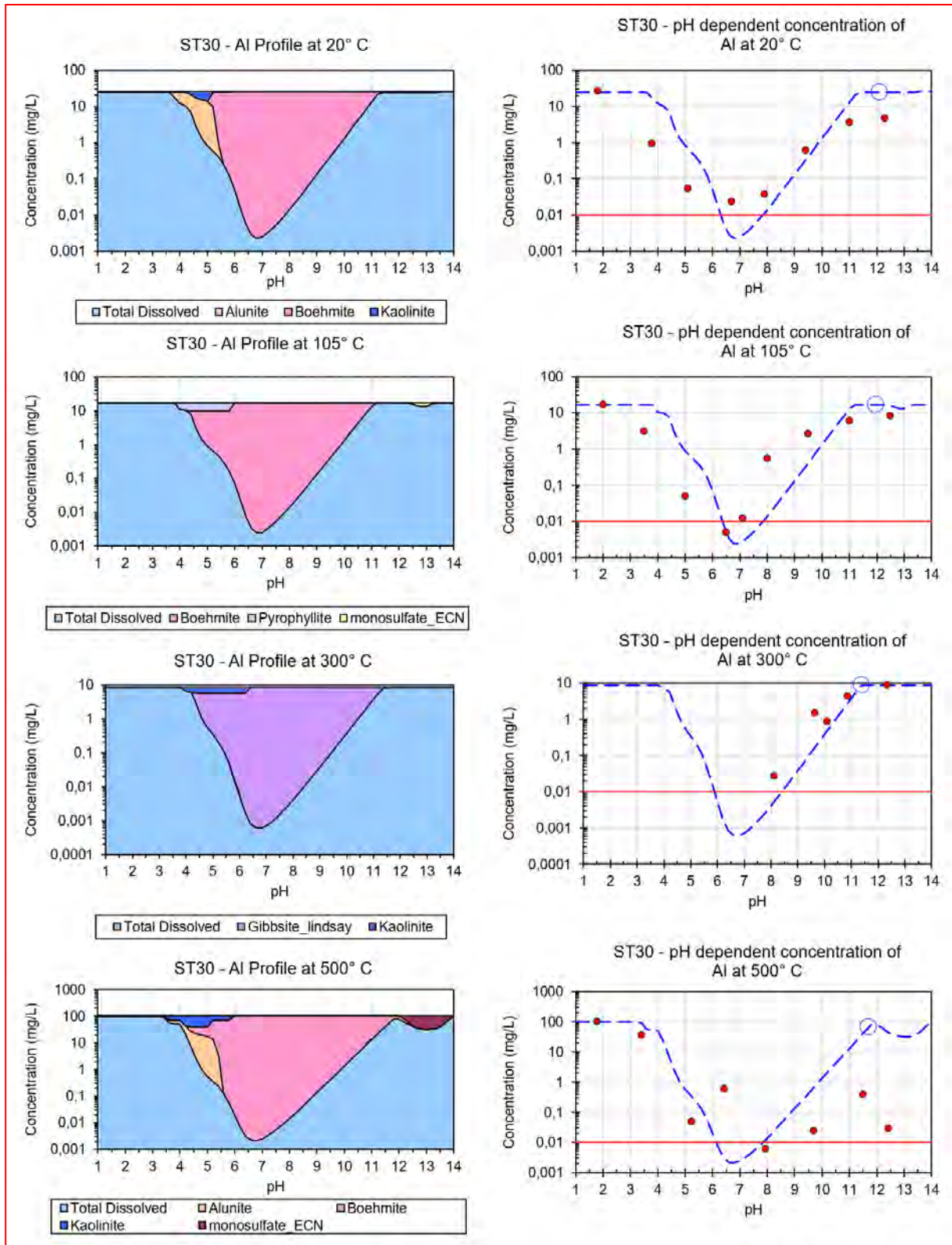


Abbildung 262 Modellierung ST30 Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

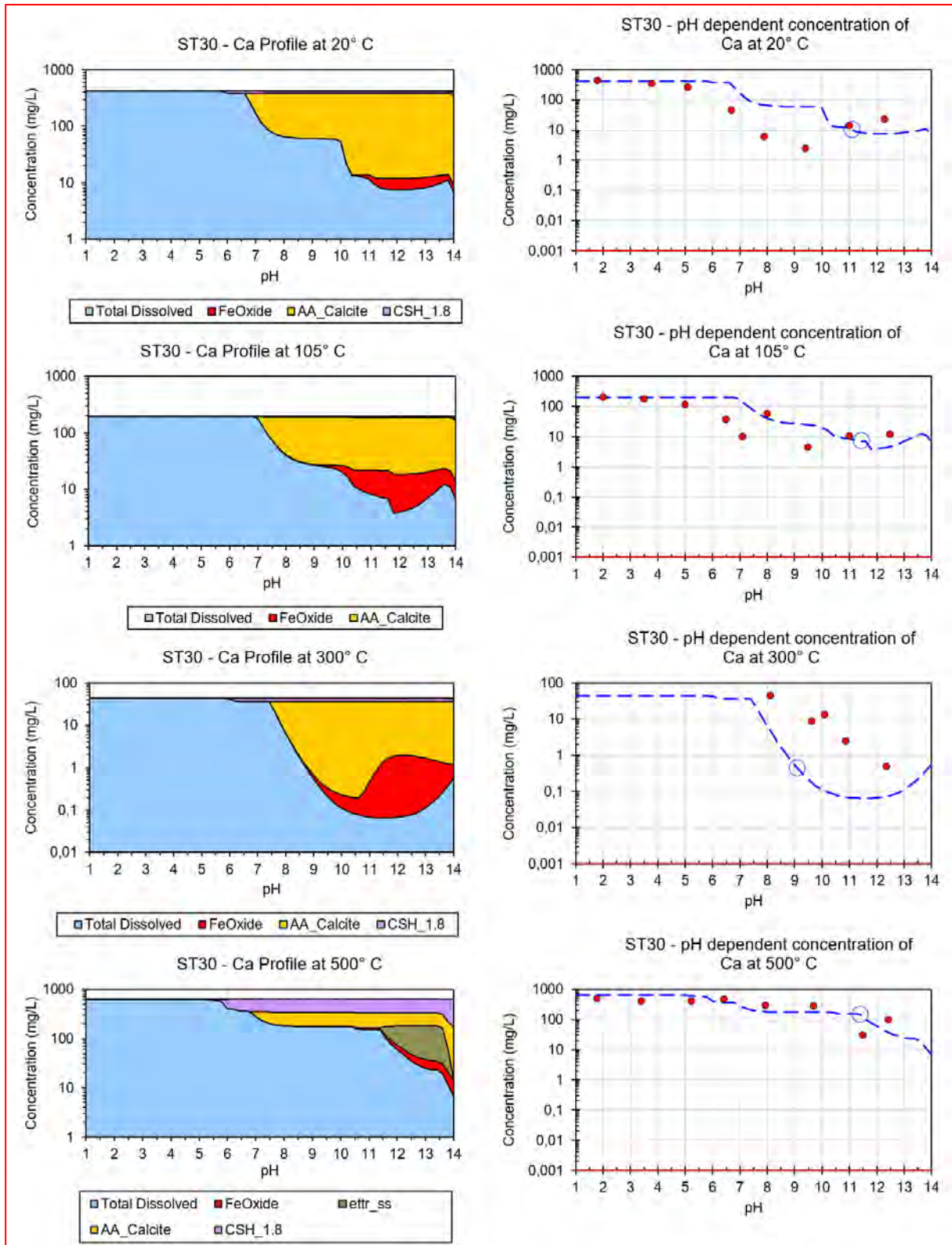


Abbildung 263 Modellierung ST30 Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

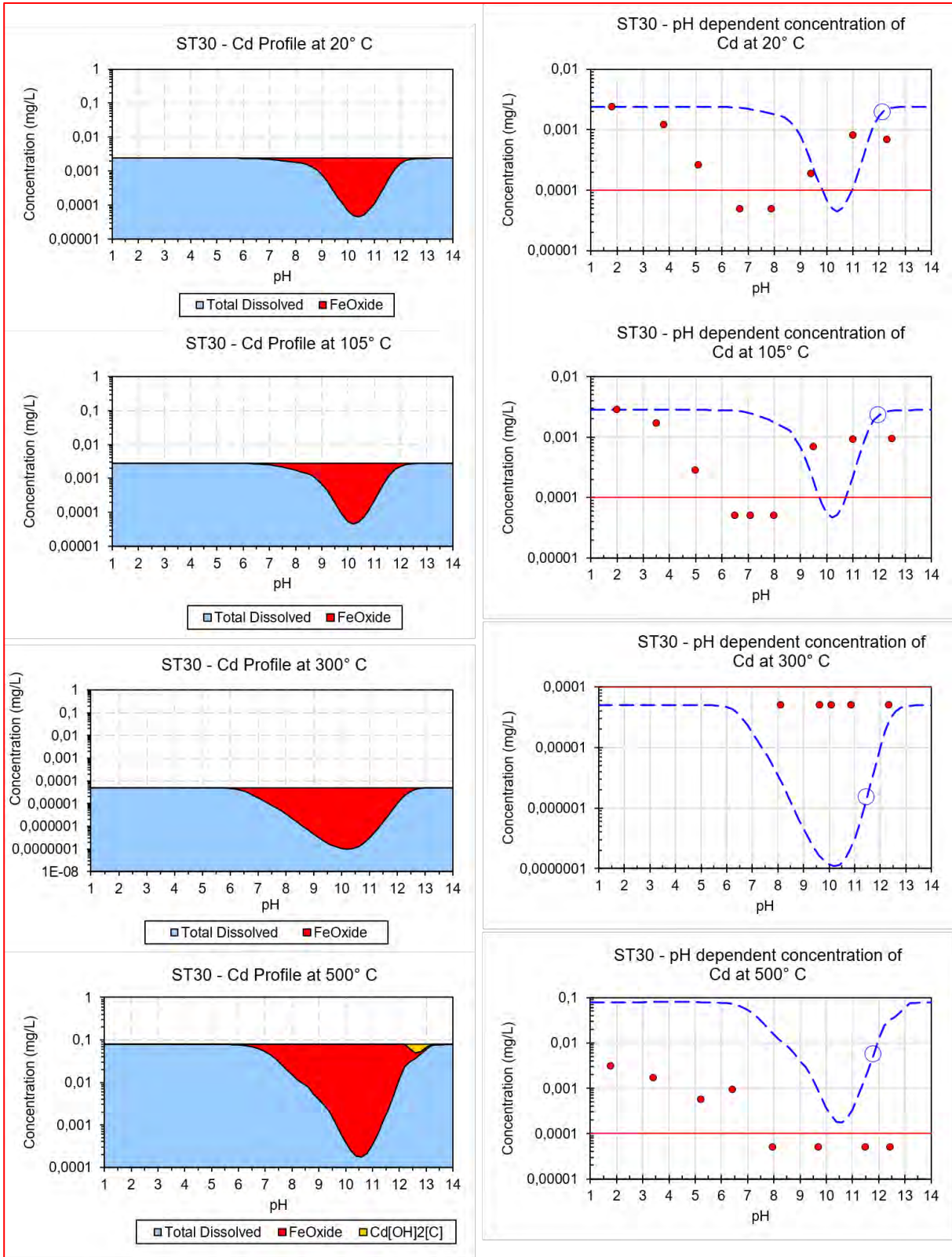


Abbildung 264 Modellierung ST30 Chrom (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

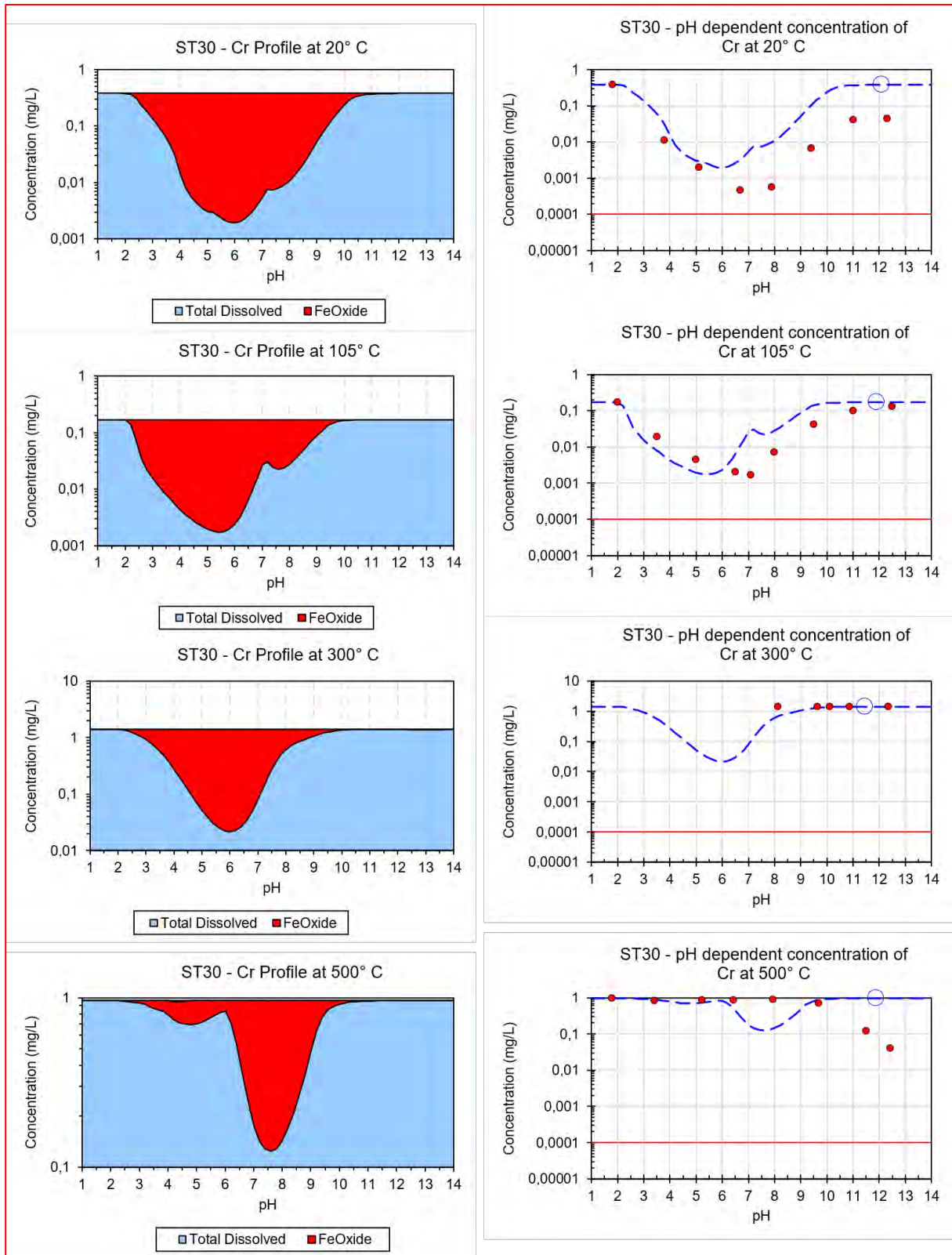


Abbildung 265 Modellierung ST30 Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

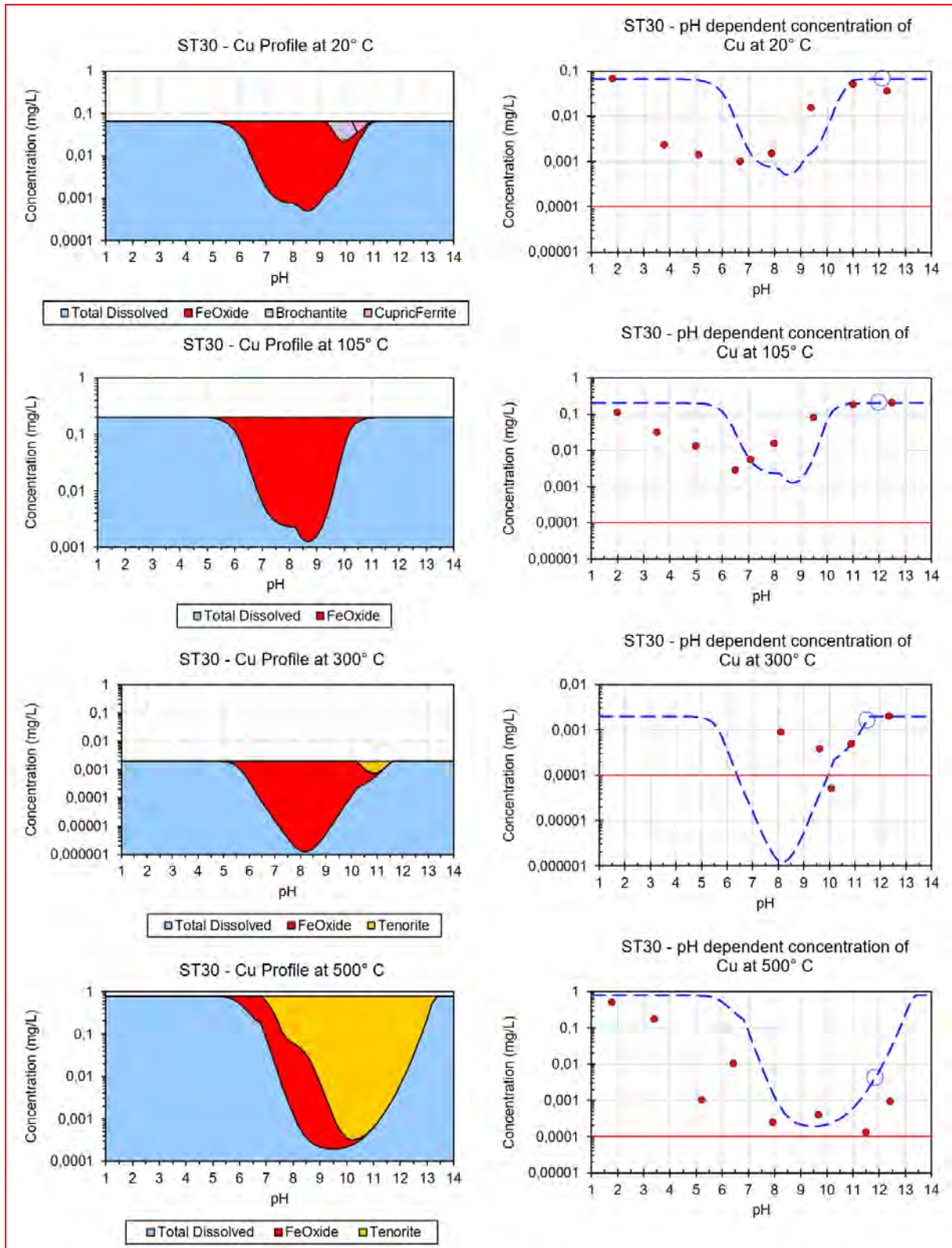


Abbildung 266 Modellierung ST30 Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

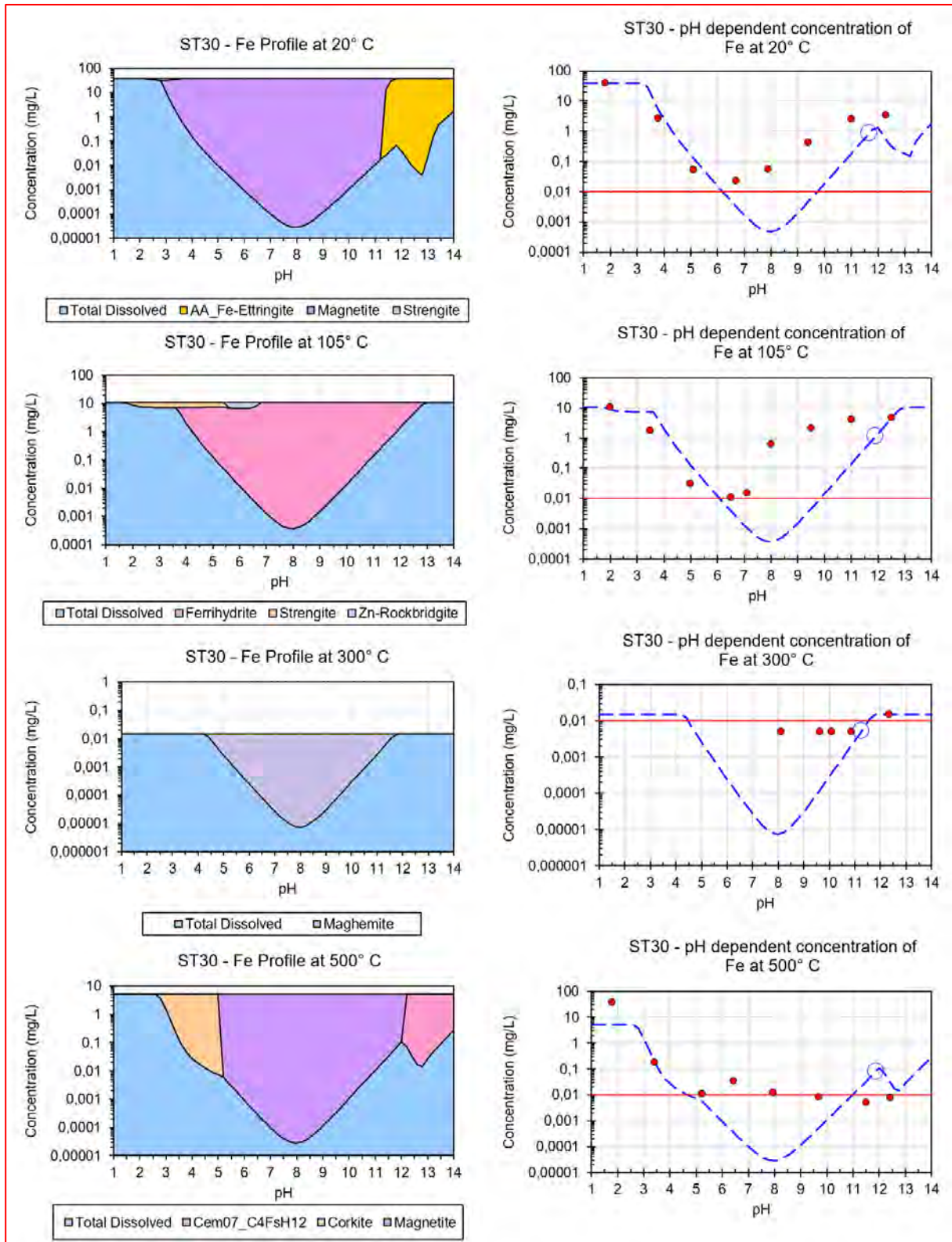


Abbildung 267 Modellierung ST30 Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

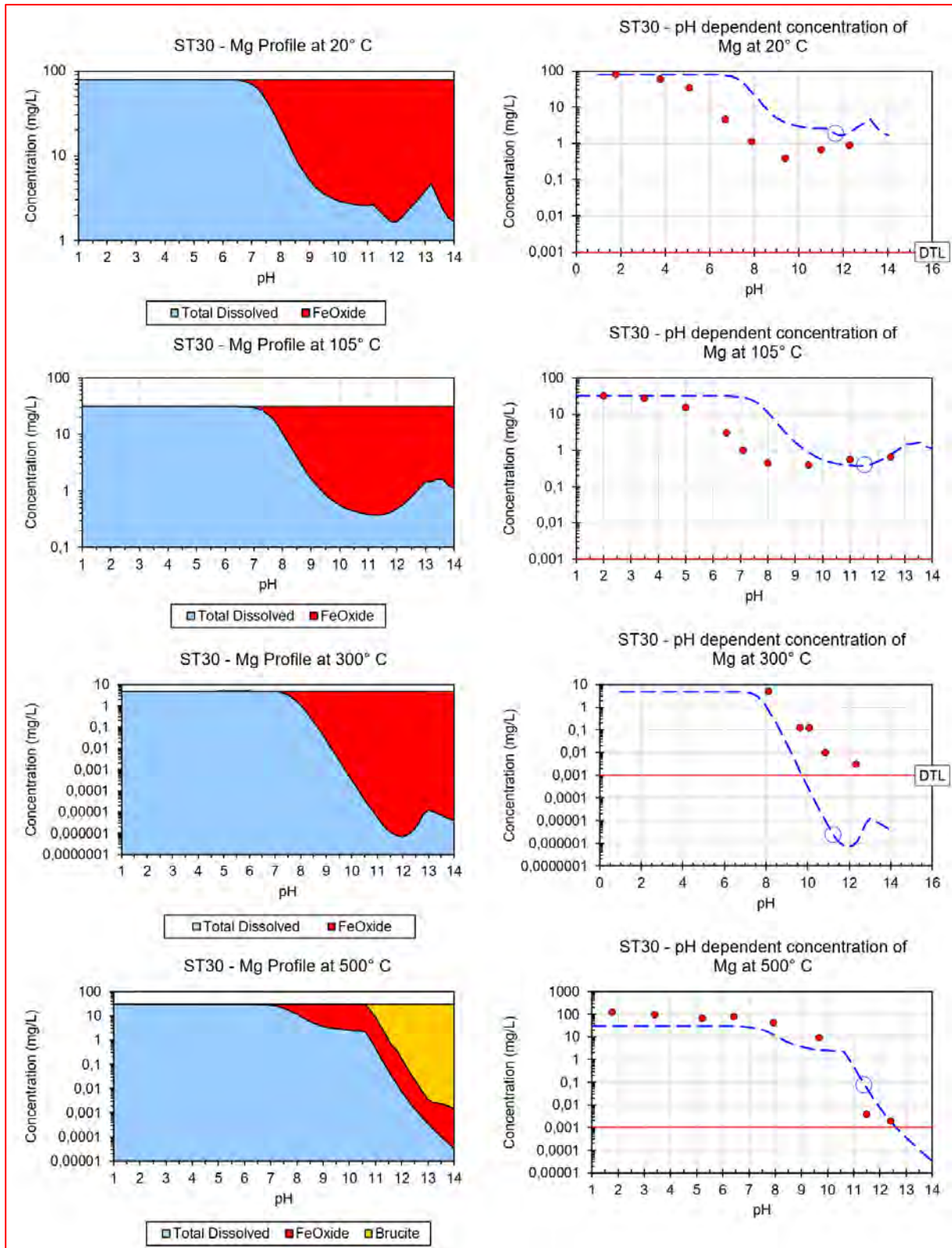


Abbildung 268 Modellierung ST30 Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

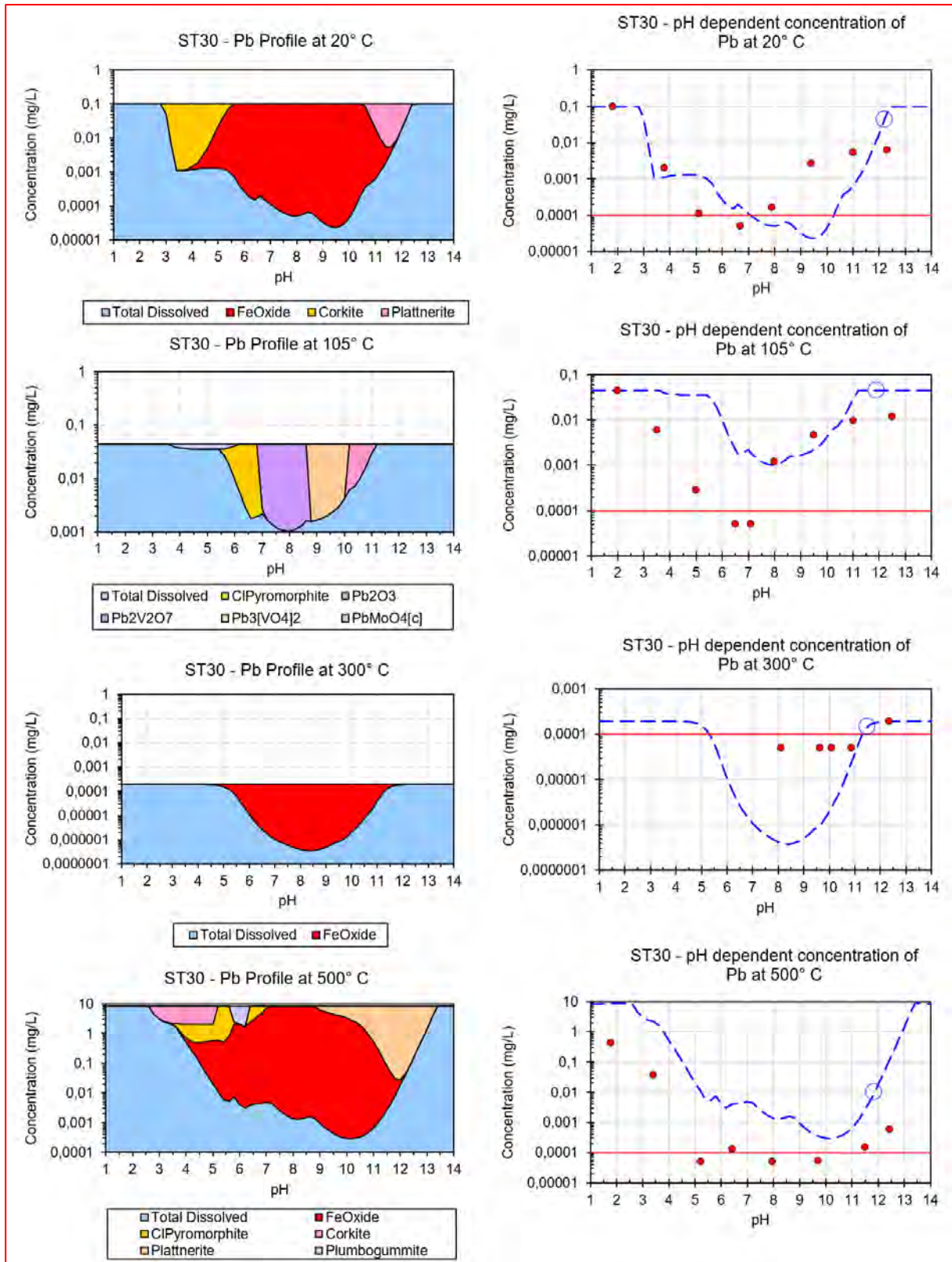


Abbildung 269 Modellierung ST30 Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

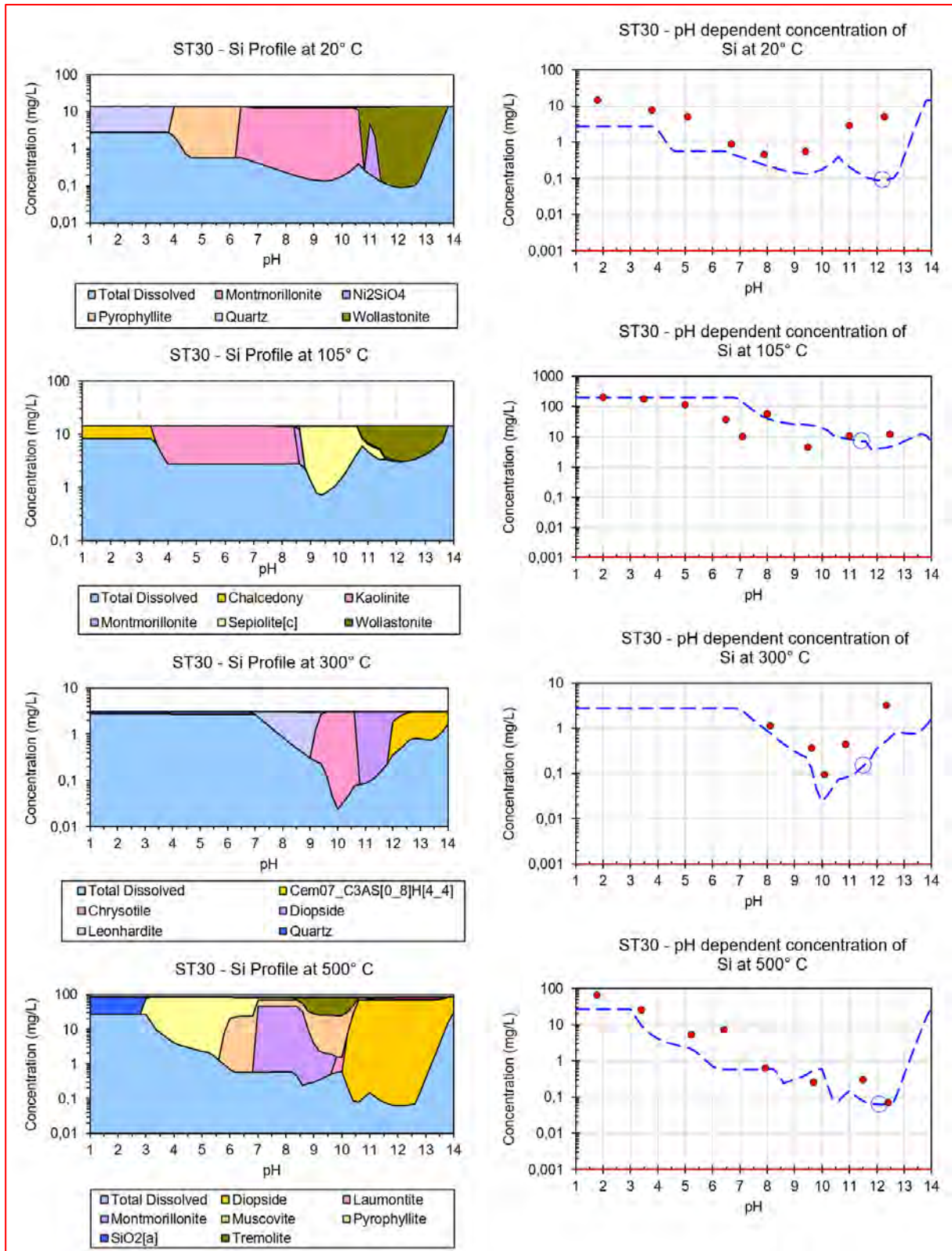
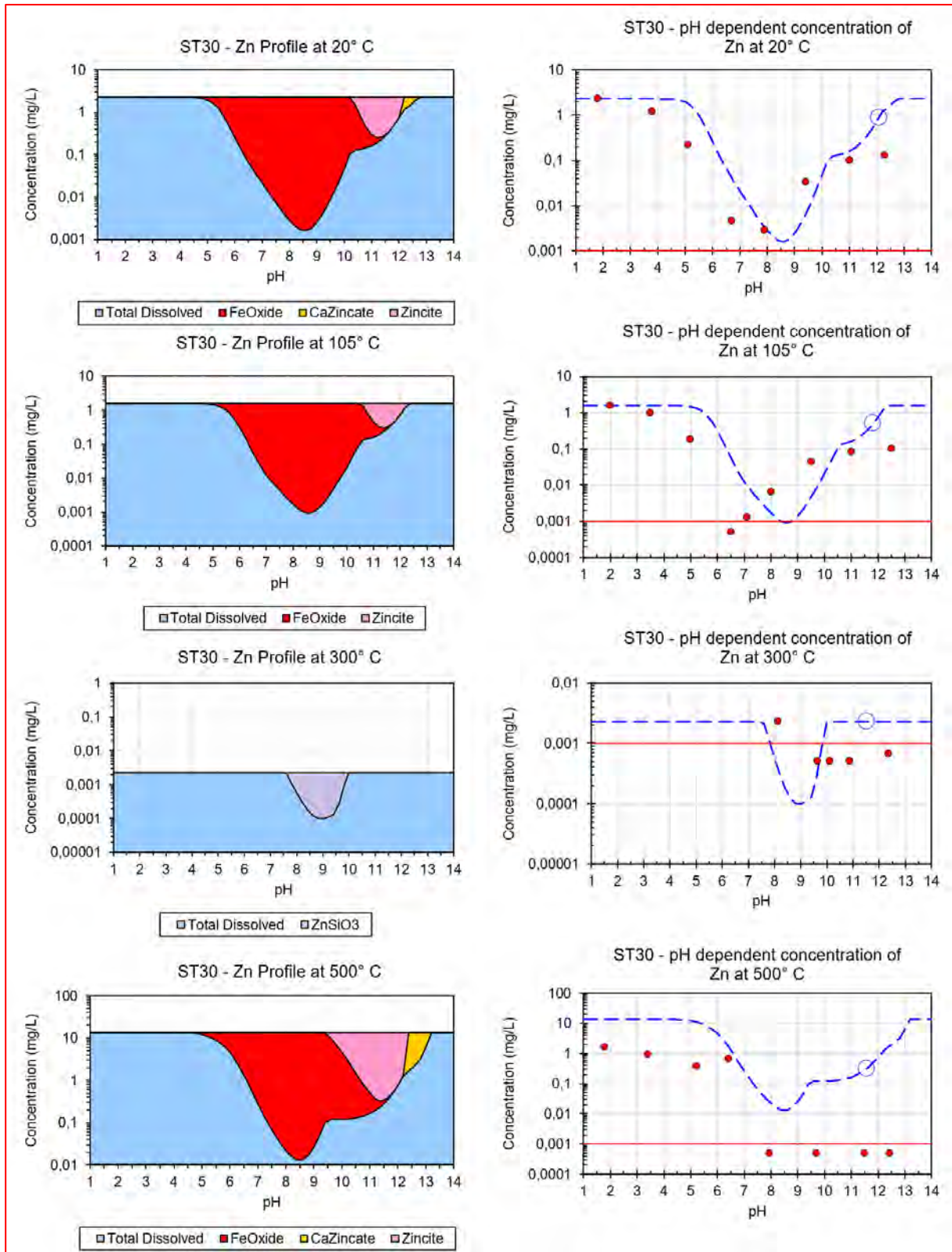


Abbildung 270 Modellierung ST30 Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)



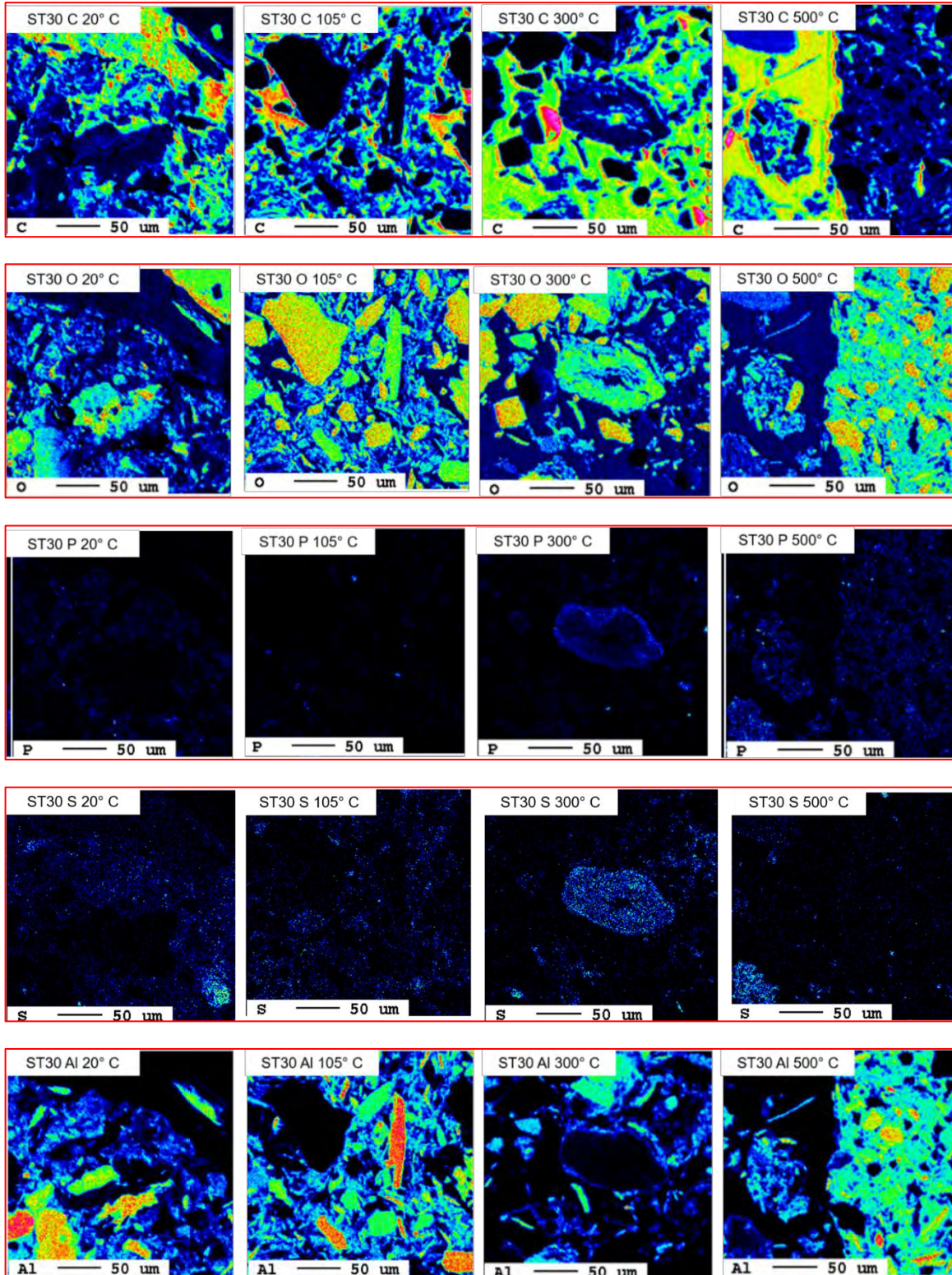
Mikrosondenergebnisse ST30

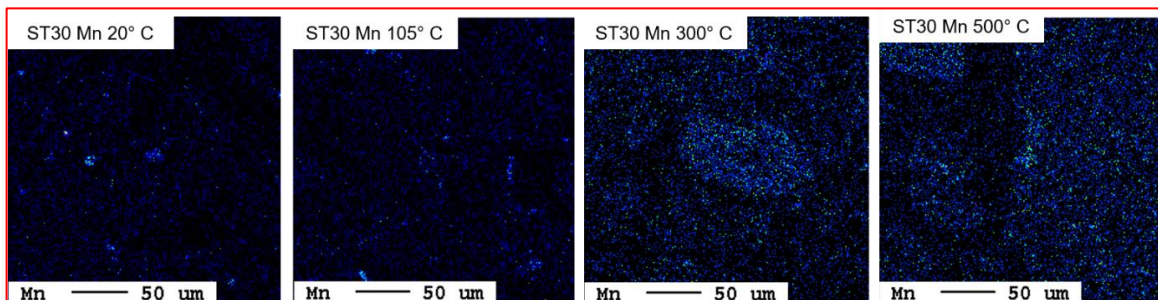
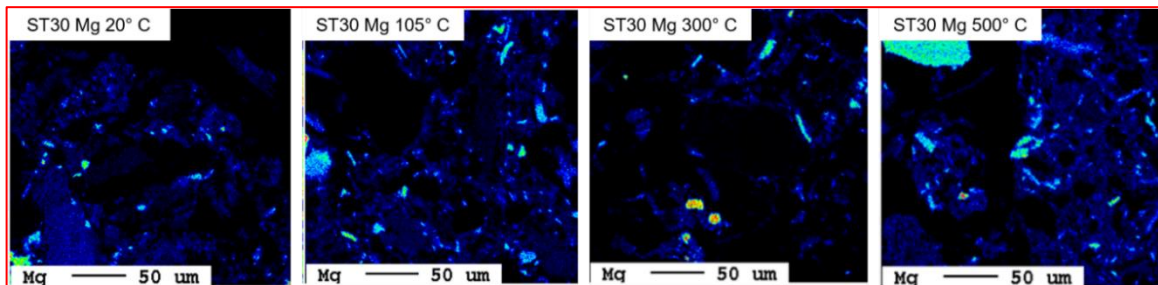
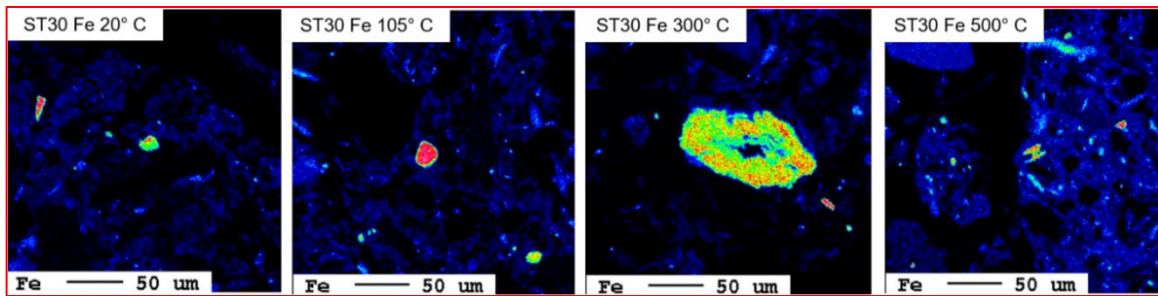
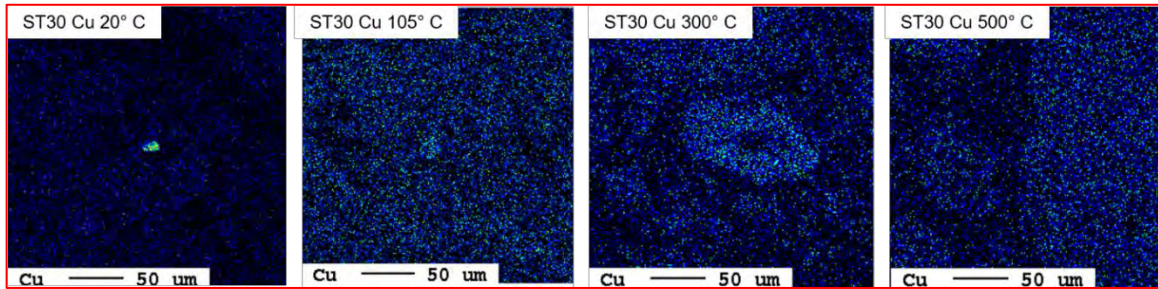
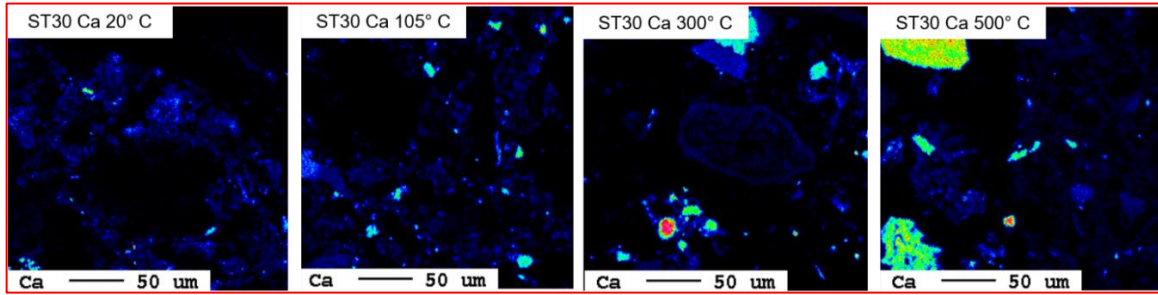
Die Mikrosondenergebnisse der ST30 können den Elementarverteilungskarten aus Abbildung 271 entnommen werden.

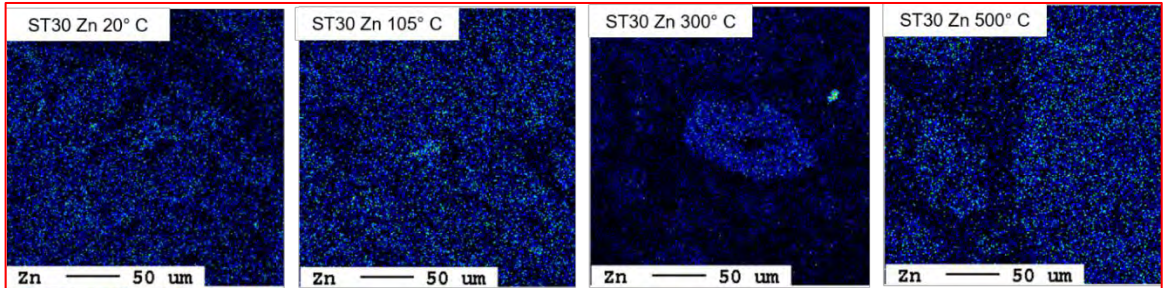
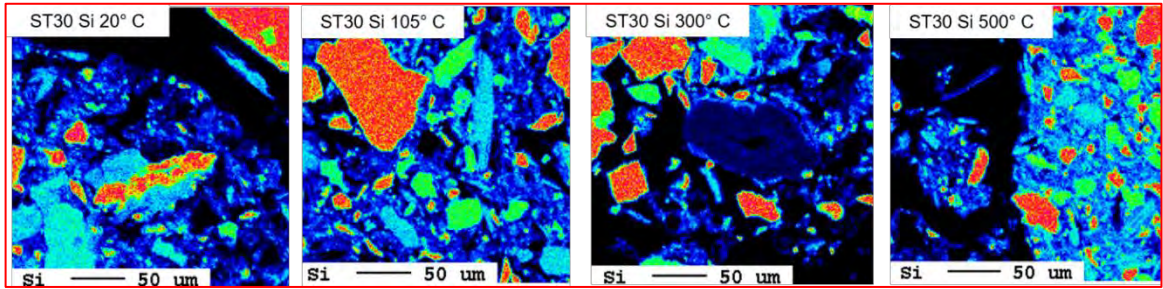
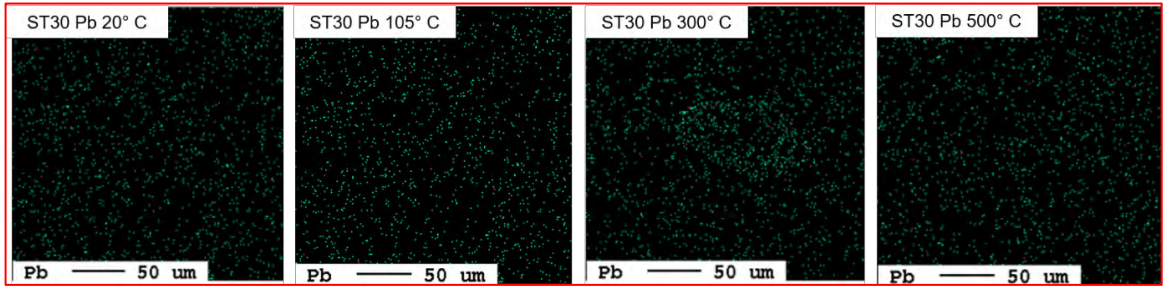
Bei der 20 °C-Probe ist ein relativ regelmäßig geformter, sich über 10 µm erstreckender Cr-reicher Partikel feststellbar. Die Elementarverteilungskarten zeigen zusätzlich in diesem Partikel eine erhöhte Konzentration an Fe, O und Cu. Zwei eingeschlossene Kristalle mit Fe und Cr an dieser Stelle könnten auf Chromit FeCr_2O_4 hindeuten. Im unteren Bereich des Cr-Korns sind Bereiche mit erhöhter Cu-Konzentration ersichtlich. Dabei kann es sich um eine Verwitterung von Chromat zu Fe-Cr-Hydroxid handeln und Cu wird adsorbiert. Al, K und Si befinden sich in Cr-freien Bereichen in unmittelbarer Umgebung (Kern 2021).

Im Vergleich mit den Proben, die höheren Behandlungstemperaturen unterzogen wurden, sind keine so stark ausgeprägten Cr-Partikel ersichtlich. Bei der 105 °C-Probe tritt in den Elementarverteilungskarten kein Cr auf. Die Probe, die mit 300 °C behandelt wurde, zeigt ein großes Fe-Partikel mit vereinzelt Cr-Verteilungen im Inneren und vermehrt an den Korngrenzen. Es sind zusätzlich weitere Zusammenhänge mit Zn, Ba, Cu, S, P und am Rand mit Al erkennbar. Die 500 °C-Probe enthält ein kleines Fe-Korn von etwa 15 µm mit einem Cr-Kern. Das Korn wird von Mg umschlossen. Es treten in den Proben bei allen Behandlungstemperaturen vermehrt Si, Al und K sowohl in C- als auch O-Phasen auf. Dabei bilden sich Silicium-, Aluminium- und Kaliumoxide. Diese Verbindungen befinden sich nicht in Fe- oder Cr-Partikeln. Bei der 105 °C-Probe ist ein Fe-Partikel auffallend, der Spuren von Cu und Zn enthält. Die Bindung der positiv geladenen Ionen im Eisenhydroxid ist in der 300 °C-Probe vermehrt zu beobachten. Die 300 °C-Probe weist ein großes Fe-Partikel mit den Abmaßen von ca. 100 x 75 µm auf. Der Eisengehalt ist vor allem im Inneren sehr hoch. An den Korngrenzen lagern sich vermehrt P, S und Cr an. Im Weiteren sind im Inneren des Partikels Cu, Zn, Mn und Pb auffindbar. Es kann von gebundenen Schwermetallkationen in einem Eisenhydroxid ausgegangen werden. Der zunehmende Konzentrationsverlauf von Mn über die steigenden Behandlungstemperaturen ist in Abbildung 271 ersichtlich. Manganhydroxid wird beim Erhitzen zersetzt, bleibt in anderer Form zurück und bildet auf Partikeln einen Mangan-Hydroxid-Film. Dieser Film ist an den Körnern bei der 300 °C- und der 500 °C-Proben erkennbar. Die Zn-Konzentrationen der Proben in Abbildung 271 zeigt ebenso Veränderungen aufgrund des thermischen Einflusses. Zn ist in allen Bereichen angelagert, nur bei der 300 °C-Probe ist die Konzentration im Fe-Partikel erhöht, aber in der Umgebung viel geringer als bei niedrigeren und höheren Temperaturen.

Abbildung 271 Elementarverteilungskarten ST30 von C, O, P, S, Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Pb, Si, Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis - grün – gelb – orange – rot – pink – weiß)







5.5.4 Altlast ST32 Halde Schrems

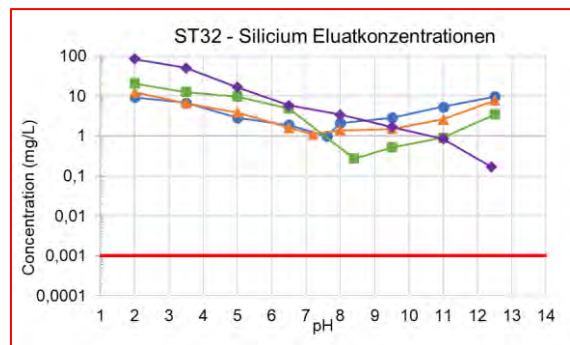
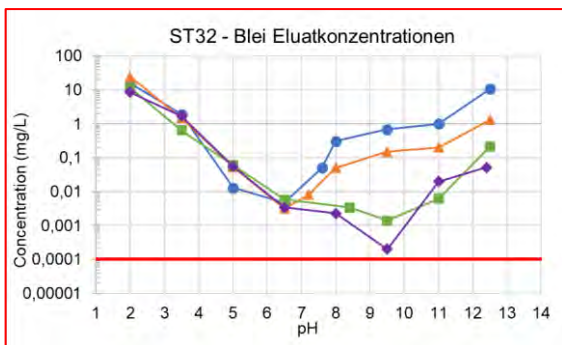
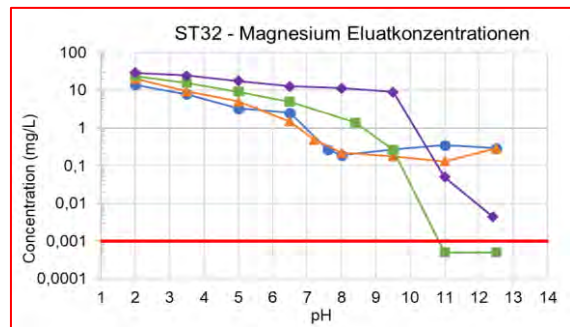
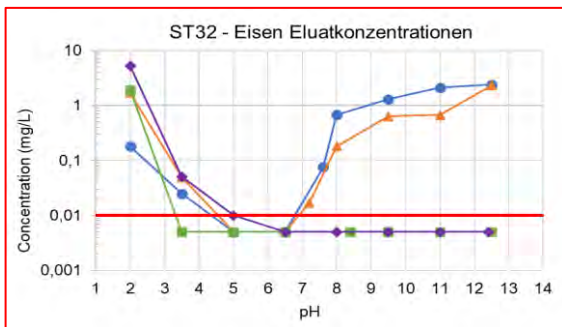
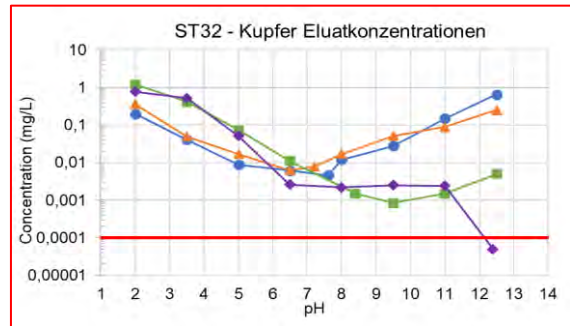
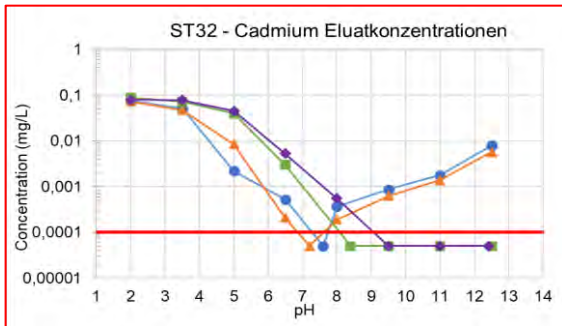
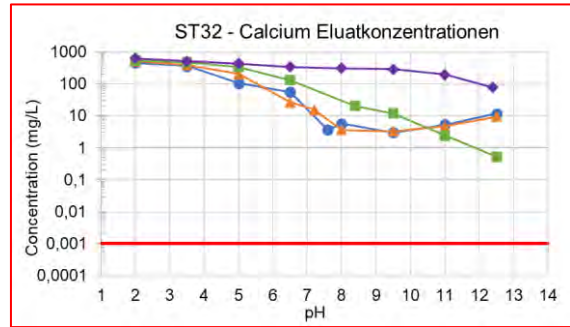
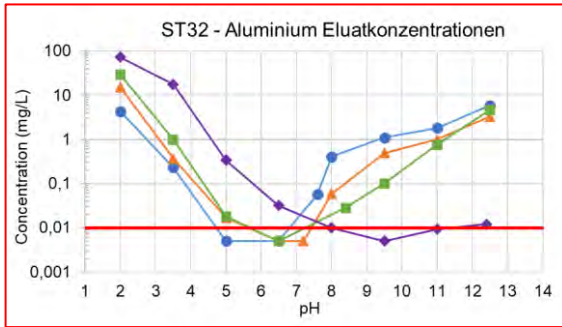
Aufgrund der erkannten Kontaminationen an Pb und Zn in der Altlast stehen diese Schwermetalle im Fokus der Ergebnisauswertung. Zusätzlich werden die Elemente Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg und Si genauer betrachtet.

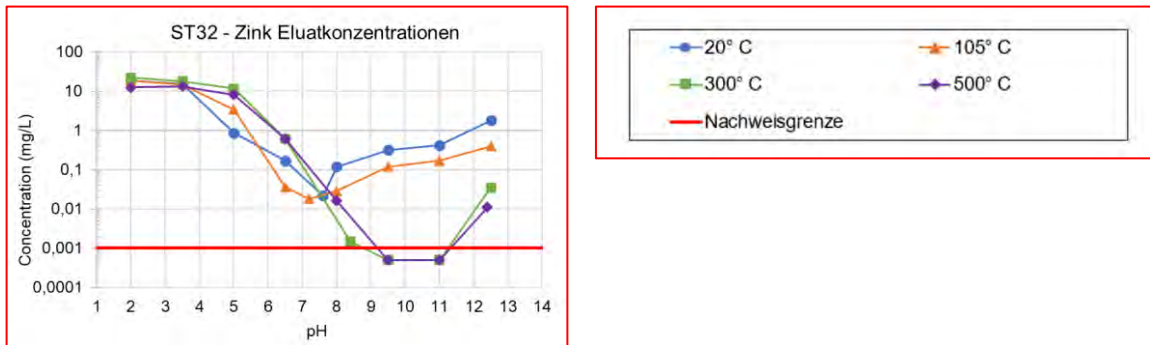
Eluatkonzentrationen ST32

Die Verläufe der Eluatkonzentrationen der Altlast ST32 können der Abbildung 272 entnommen werden. Ca liegt mit einer maximalen Auslaugbarkeit bis 800 mg/l vor. Die Elemente Al, Mg, Pb, Si und Zn weisen Höchstwerte zwischen 20 mg/l und 90 mg/l auf. Die maximale gelöste Menge an Cu beträgt 1 mg/l. Die höchsten Cd-Konzentrationen aller Proben liegen bei 0,06 mg/l bis 0,09 mg/l. Nachfolgend wird der Zusammenhang der Behandlungstemperatur des Probematerials auf die Eluatkonzentrationen zusammenfassend dargestellt:

- Die Eluatkonzentrationen der Elemente Al, Cd, Cu, Fe, Mg und Si nehmen mit steigender Behandlungstemperatur des Probematerials zu: Al bis pH 6,5; Cd bis pH 7,5; Cu bis pH 5; Fe bis pH 5; Mg bis pH 9; Si bis pH 6,5.
- Oberhalb der vorgenannten pH-Werte nimmt die Mobilität mit steigender Behandlungstemperatur ab.
- Die Eluatkonzentration von Eisen zwischen pH 5 und pH 6,5 liegen in allen Proben unter der Nachweisgrenze.
- Bei pH > 5 ist bei den Ca-Eluaten ein Einfluss der Behandlungstemperaturen auf die Mobilisierung erkennbar. Die höchsten Eluatkonzentrationen werden für die 500 °C-Probe gemessen.
- Die Eluatkonzentrationen der Elemente Pb und Zn zeigen keinen Einfluss auf die Mobilisierbarkeit (Pb bis pH 6,5; Zn bis pH 3,5).
- Bei pH > 6,5 (Pb) bzw. 7,5 (Zn) geht die Eluierbarkeit mit steigender Behandlungstemperatur des Probematerials zurück.

Abbildung 272 Eluatkonzentrationen ST32 Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, Si und Zn





Modellierungsergebnisse ST32

Bei der Modellierung wurden die variablen Werte für jedes Element einzeln angepasst. Tonmineralphasen und Huminsäuren traten vereinzelt in den Modellen auf, führten jedoch zu keiner Verbesserung. Für die Eisenhydroxide wurden Werte zwischen 30 mg/kg und 80.000 mg/kg verwendet. Bei Calcium wurde die Konzentration an CO_3^{2-} angepasst.

Aluminium (Abbildung 273)

Die maximalen Eluatkonzentrationen von Aluminium steigen mit zunehmender Behandlungstemperatur des Probematerials von 7 mg/l auf 80 mg/l. Diese werden im sauren Milieu gemessen. Mit steigendem pH-Wert sinkt die Auslaugbarkeit bei pH 6,5 auf ein Minimum und nimmt im weiteren Verlauf des pH-Werts zu. Eine Ausnahme hiervon zeigt die Eluatkurve der 500 °C-Probe, die bis pH 8 abnimmt und dann auf einem konstanten Konzentrationsniveau verbleibt. Die berechneten Eluatkonzentrationen weisen im Vergleich mit den Messwerten bei der 20 °C-, der 105 °C- und der 300 °C-Probe einen analogen Verlauf auf, wenn auch das Konzentrationsniveau geringer ist. Für die 500 °C-Probe bilden die modellierten Eluatkonzentrationen die Messwerte nicht ab. Die größten Phasen der Modelle stellen Boehmit, Gibbsite und Diaspor dar. Bei diesen Mineralien handelt es sich jeweils um ein Aluminiumhydroxid bzw. -oxid. Die Phase Ettringit (ettr_ss) in der 300 °C-Probe kann vernachlässigt werden. Einerseits tritt diese laut Modell im alkalischen Bereich auf und führt dabei zu keiner Berichtigung der Kurve, andererseits nimmt sie nur einen geringen Teil des Diagramms ein. Diese Reaktion konnte beim Modellierungsprozess nicht entfernt werden, da es ansonsten zu einer Fehlermeldung des Programms kam.

Calcium (Abbildung 274)

Die maximale Eluatkonzentration von Calcium liegt im sauren Bereich zwischen 400 mg/l (20 °C-Probe) und 600 mg/l (500 °C-Probe). Mit zunehmendem pH-Wert gehen die Ca-Konzentrationen in den Eluaten der 20 °C- und 105 °C- Probe auf ein Minimum (etwa bei pH 8,5) zurück, um im weiteren pH-Verlauf wieder anzusteigen. Die Ca-Konzentrationen der 300 °C- und der 500 °C-Probe nehmen zwischen pH 2 und pH 12,5 ab, wobei die 300 °C-Probe die stärkste Abnahme (etwa zwei Größenordnungen) zeigt. Die 500 °C-Probe weist im Vergleich zu den übrigen Proben über den gesamten pH-Bereich die höchsten Ca-Konzentrationen in den Eluaten auf. Die modellierten Eluatkonzentrationen zeigen für alle Proben eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Im alkalischen Milieu liegt Calcium an Eisenhydroxiden adsorbiert sowie in Form von Calcit vor. Der Eisenhydroxidgehalt ist mit 3.000 mg/kg angesetzt. Aufgrund der CO₂-Auflösung in Wasser und folglich der Übergang in die Luft, wurde der Wert an CO₃²⁻ auf 6.000 mg/kg angepasst. Die Konzentration an CO₃²⁻ beeinflusst die Menge der vorliegenden Calcit-Phase.

Cadmium (Abbildung 275)

Die größte eluierte Menge an Cadmium ist bei pH 2 zu verzeichnen und liegt zwischen 0,7 mg/l und 0,9 mg/l. Die niedrigsten freigesetzten Mengen treten bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe bei pH 7 bis 8 auf. Bei diesen Proben steigen die Eluatkonzentrationen im alkalischen Bereich an. Im Gegensatz dazu nehmen die Cd-Konzentrationen im Eluat der 300 °C- und der 500 °C-Probe ab und verbleiben ab pH 8,5 bzw. 9,5 dann auf einem konstanten niedrigen Konzentrationsniveau. Ein Zusammenhang zwischen der Mobilität von Cd mit der Behandlungstemperatur ist im alkalischen Milieu zu beobachten. Hier liegen die Eluatkonzentrationen der 300 °C- und der 500 °C-Probe durchgängig unter der Nachweisgrenze. Die berechneten Eluatkurven für die 20 °C- und 125 °C-Proben zeigen tendenziell einen analogen Verlauf zu den Messwerten, sind aber deutlich in den alkalischen Bereich verschoben. Die Modellierungsergebnisse für die 300 °C- und 500 °C-Proben stimmen mit den gemessenen Eluatkonzentration bis pH 10 in etwa überein. Bei höheren pH-Werten liefert die Modellierung keine nachvollziehbaren Werte. Im Allgemeinen liegt Cadmium adsorbiert an Eisenhydroxiden vor. Alle vier Modelle zeigen einen ähnlichen Verlauf. Der Wert an Eisenhydroxiden ist mit 20.000 mg/kg angesetzt worden.

Kupfer (Abbildung 276)

Die maximalen Kupferkonzentrationen in den Eluaten aus den 4 Proben finden sich im stark sauren Bereich. Mit Ausnahme bei der 500°C-Probe nehmen die Eluatkonzentrationen mit steigendem pH-Wert auf ein Minimum ab, um im weiteren pH-Verlauf wieder anzusteigen. Bei den Eluaten der 500 °C-Probe ist kein Anstieg zu verzeichnen. Generell nimmt die Mobilität von Kupfer mit steigendem pH-Wert am stärksten in der 300 °C- und der 500 °C-Probe ab. Im Hinblick auf den Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Mobilität von Cu ist festzustellen, dass die 300 °C- und die 500 °C-Probe im sauren Bereich die höchsten und im alkalischen Bereich die niedrigsten Eluatkonzentrationen gemessen werden. Der Vergleich von berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt zwar tendenziell analoge Verläufe, allerdings liegen die Messwerte zum Teil deutlich unter den Modellierungsergebnissen. Lediglich im stark sauren Bereich ist eine gute Überstimmung zu erkennen. Es kann von einer sehr langsamen Auflösung bei der Eluierung des Probematerials ausgegangen werden. Die Phasendiagramme aller vier Modelle enthalten Eisenhydroxide mit einem Gehalt von 300 mg/kg. Die modellierten Ergebnisse von 20 °C und 105 °C zeigen, dass Kupfer an Eisenhydroxide gebunden ist und in Form von Brochantit auftritt. Bei Brochantit handelt es sich um ein Kupfersulfat. Bei der Erhöhung der Behandlungstemperatur auf 300 °C bzw. 500 °C geht das Kupfer in ein Kupferhydroxid über.

Eisen (Abbildung 277)

Die Eluatkonzentrationen der 20 °C- und 105 °C-Probe nehmen bis etwa pH 6,5 ab und steigen im weiteren pH-Verlauf wieder an, wobei das Konzentrationsniveau erreicht wird, das im stark sauren Milieu zu beobachten ist. Bei der 300 °C- und 500 °C-Probe kann dieses Verhalten nicht beobachtet werden. Die Fe-Konzentrationen in den Eluaten sinken bei $\text{pH} > 2$ und liegen anschließend bei $\text{pH} > 3,5$ bzw. $\text{pH} > 5$ unter der Nachweisgrenze. Zudem weisen die 300 °C- und die 500 °C-Probe im stark sauren Bereich deutlich höhere Eluatkonzentrationen als die 20°C- und die 105 °C-Probe auf. Im Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen sind relativ gute Übereinstimmung bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe feststellbar. Das Modell sagt allerdings eine geringere Auslaugbarkeit von Eisen im pH-Bereich von 4 bis 6,5 vorher. Die berechneten Konzentrationsverläufe für die 300 °C- und die 500 °C-Probe weichen hingegen deutlich von den Messwerten ab. Darüber hinaus kann nicht bestätigt werden, dass Eisen in gebundener Form in Magnetit vorliegt.

Magnesium (Abbildung 278)

Die maximalen Eluatkonzentrationen von Magnesium treten bei allen Proben im stark sauren Bereich auf. Die Eluatkonzentrationen von Mg gehen bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe mit steigendem pH-Wert zurück und nehmen bei pH > 8 bzw. pH > 11 wieder leicht zu. Die Eluatkonzentrationen der 300 °C- und der 500 °C-Probe nehmen über den gesamten Bereich ab, wobei bei pH 9,5 ein signifikanter Konzentrationssprung über mehr als zwei Größenordnungen zu verzeichnen ist. In diesen beiden Proben werden auch im alkalischen Milieu die geringsten Mg-Konzentrationen gemessen. Die berechneten Eluatkonzentrationen liegen überwiegend über den Messwerten. Allenfalls im stark sauren Bereich (bis pH 3,5) tritt annähernd eine Übereinstimmung auf. Laut Modellierung soll Magnesium bis zu einem pH-Wert von 7 bei allen Temperaturen die höheren Eluatkonzentrationen aufweisen und erst im alkalischen Bereich abnehmen. Jedoch zeigen die Messwerte bereits im sauren Milieu eine Abnahme. Die Phasendiagramme zeigen die Adsorption ab dem pH-Wert 7 an Eisenhydroxide mit 80.000 mg/kg.

Blei (Abbildung 279)

In allen vier Proben liegen die maximalen Eluatkonzentrationen bei pH 2. Diese sinken mit zunehmenden pH-Wert auf ein Minimum, um im weiteren pH-Verlauf wieder anzusteigen. Bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe liegt dieses Minimum bei pH 6,5, bei der 300 °C- und der 500 °C-Probe bei pH 9,5. Ein deutlicher Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Mobilität von Pb ist bei den Eluaten der 300 °C- und 500 °C-Probe feststellbar, in denen im alkalischen Milieu deutlich geringere Konzentrationen als in den Eluaten der anderen Proben auftreten. Der Vergleich zwischen berechneten mit den gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt für die 300 °C- und die 500 °C-Probe eine gute Übereinstimmung, während bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe größere Abweichungen insbesondere im pH-Bereich 4 bis 8 bzw. 6 bis 12 auftreten. Für die Modellierung von Blei wurde ein Eisenhydroxidgehalt von 30 mg/kg verwendet. Bei den in der 300 °C- und der 500 °C-Probe auftretenden Phasen Plattnerit und Cl-Pyromorphit handelt es sich um Blei(IV)-Oxid bzw. -phosphat. Bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe hat das Modell eine Vielzahl von Phasen berechnet.

Silicium (Abbildung 280)

Die Eluatkonzentrationen von Silicium bewegen sich bei allen Proben zwischen 1 mg/l und 30 mg/l mit einem Maximum im sauren Bereich. Im Vergleich zu anderen Elementen verzeichnet Silicium eine hohe Auslaugbarkeit und unterschreitet nie einen Wert von 0,1 mg/l. Die Mobilität nimmt im neutralen Bereich bei der 20 °C-, der 105 °C- sowie der 300 °C-Probe leicht ab und steigt im alkalischen Bereich wieder an. Dagegen nehmen die Eluatkonzentrationen der 500 °C-Probe nahezu linear über den gesamten pH-Bereich ab. Die modellierten Eluatkonzentrationen der 20 °C-, der 105 °C- sowie der 300 °C-Probe zeigen bis pH 9,5, pH 11 bzw. pH 6,5 eine relative gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Bei der 500 °C-Probe weichen die berechneten Konzentrationen deutlich von den Messwerten ab.

Zink (Abbildung 281)

Bei allen vier Proben liegen die maximalen Eluatkonzentrationen von Zink im sauren Bereich bis pH 5 vor. Unabhängig von der Behandlungstemperatur des Probematerials nimmt die Mobilität von Zink bis pH 8 (20 °C- und 105 °C-Probe) bzw. pH 11 (300 °C- und 500 °C-Probe) ab und steigt bei höheren pH-Werten wieder an. Die Eluatkonzentrationen der beiden letztgenannten Proben liegen im alkalischen Bereich deutlich unterhalb der Konzentrationen, die hier für die 20 °C- und 105 °C-Probe gemessen werden. Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Eluatkonzentrationen zeigt für alle vier Proben bis etwa pH 8 eine gute Übereinstimmung. Bei der 20 °C- und der 105 °C-Kurve trifft dies auch für den alkalischen Bereich zu, während bei der 300 °C- und der 500 °C-Probe deutlich höhere Konzentrationen berechnet als gemessen wurden. In allen vier Proben liegt laut Modell Zink jeweils in denselben Phasen vor. Diese unterteilen sich in Eisenhydroxide, Calciumzinkat (CaZnO_2) und Zinkit (ZnO). Die Adsorption an Eisenhydroxide, die mit 30.000 mg/kg veranschlagt werden, tritt ab einem pH-Wert von 5 auf und erreicht ein Maximum bei einem pH-Wert von 8,5.

Abbildung 273 Modellierung ST32 Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

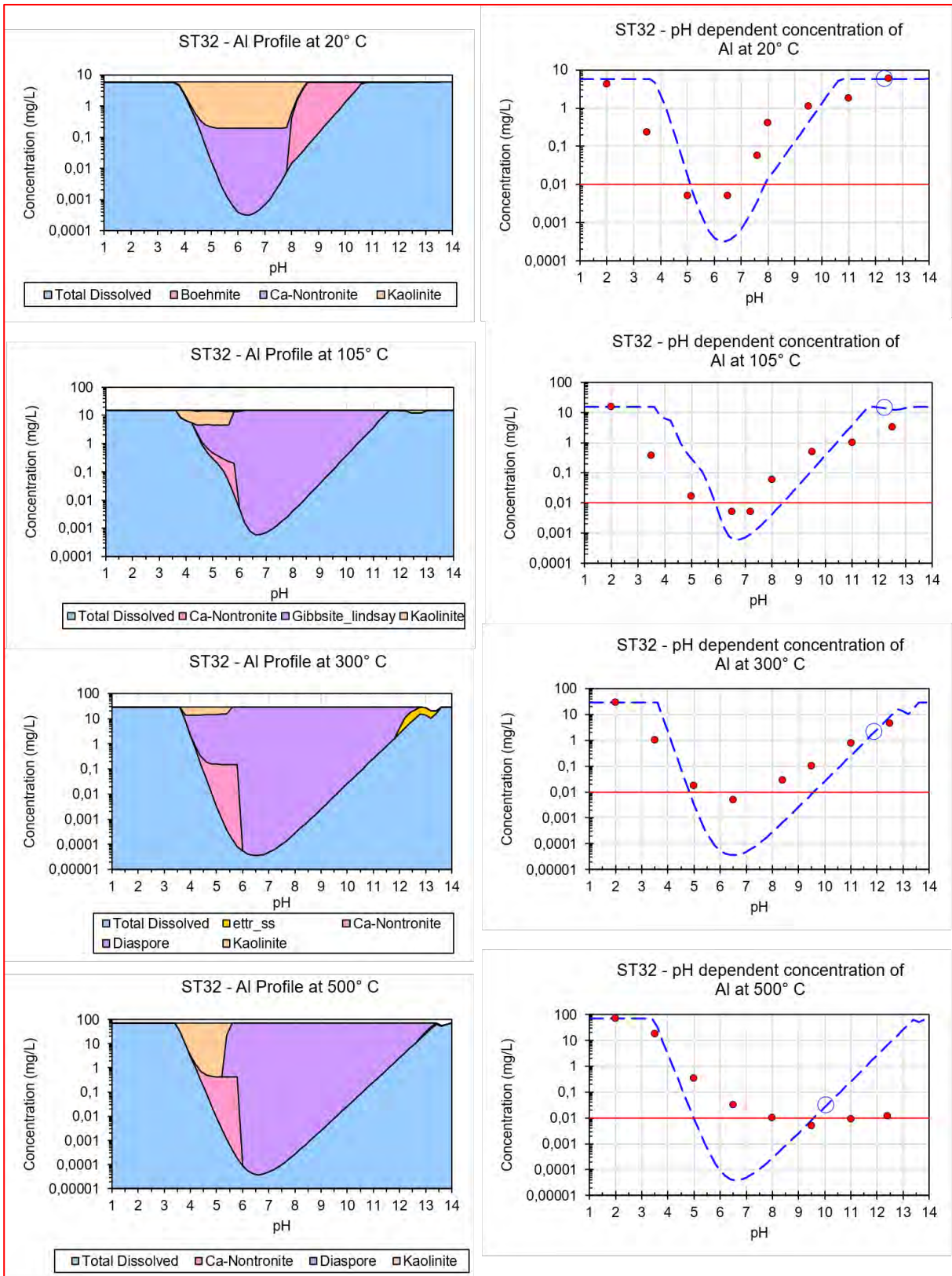


Abbildung 274 Modellierung ST32 Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

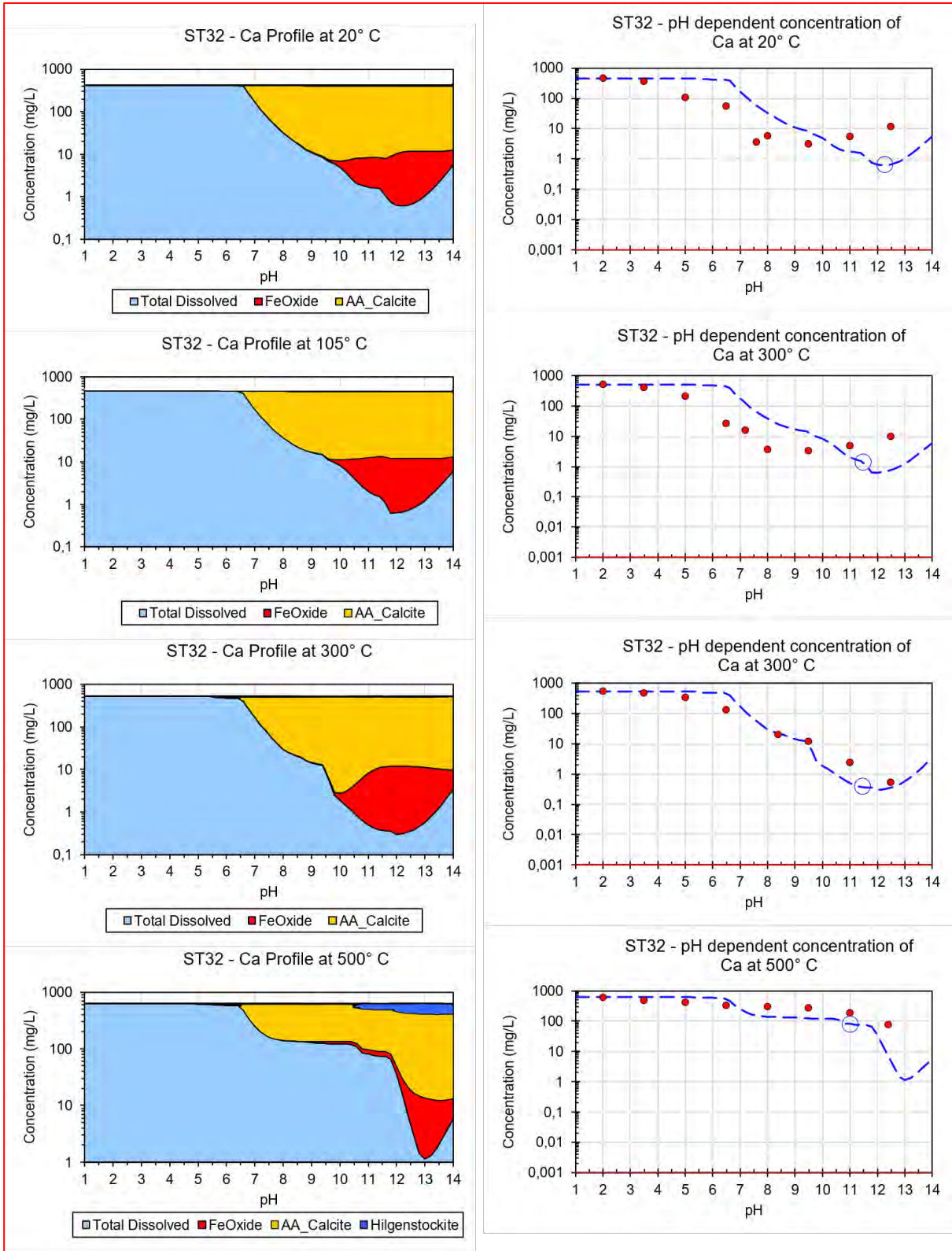


Abbildung 275 Modellierung ST32 Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

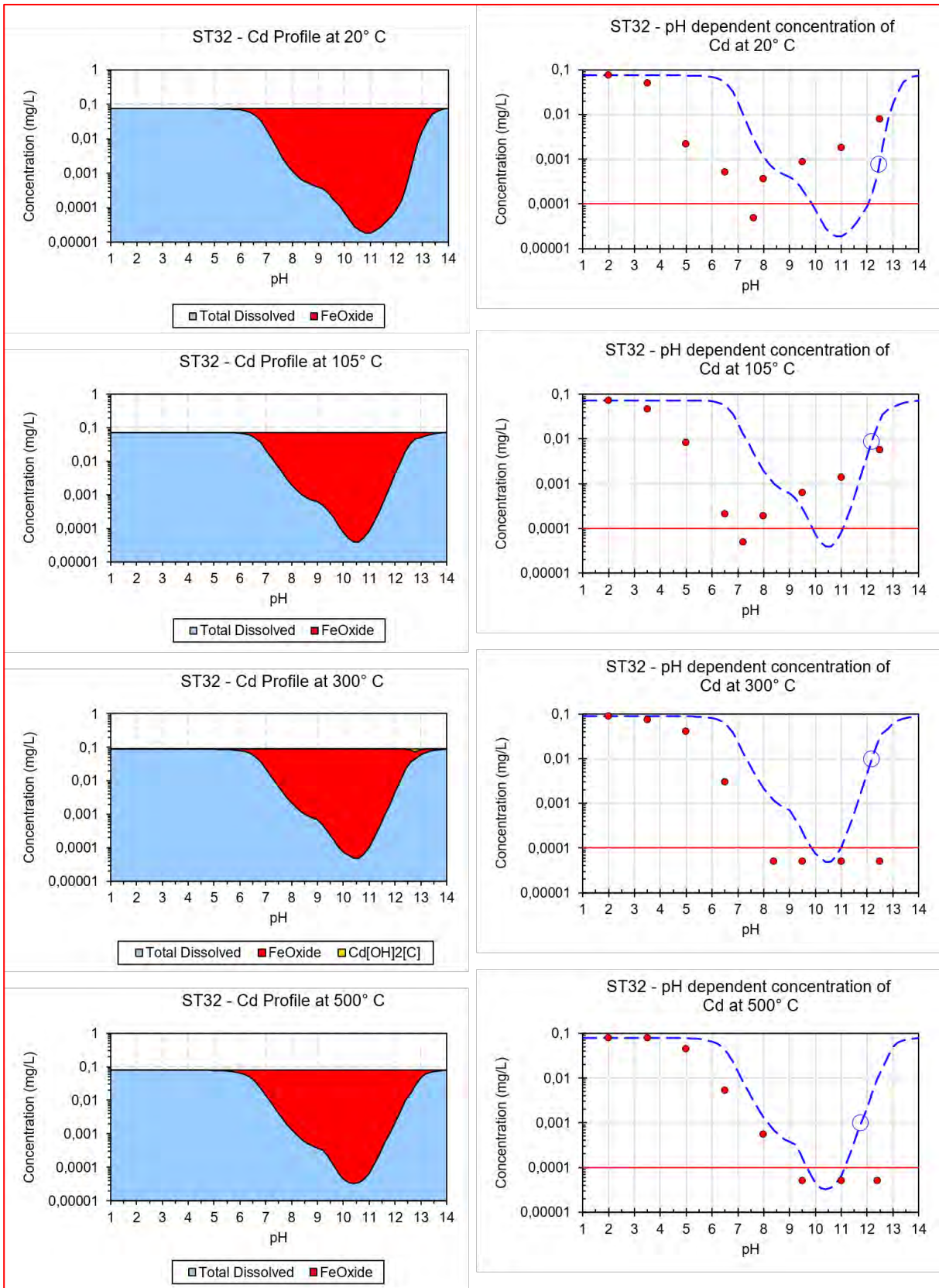


Abbildung 276 Modellierung ST32 Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

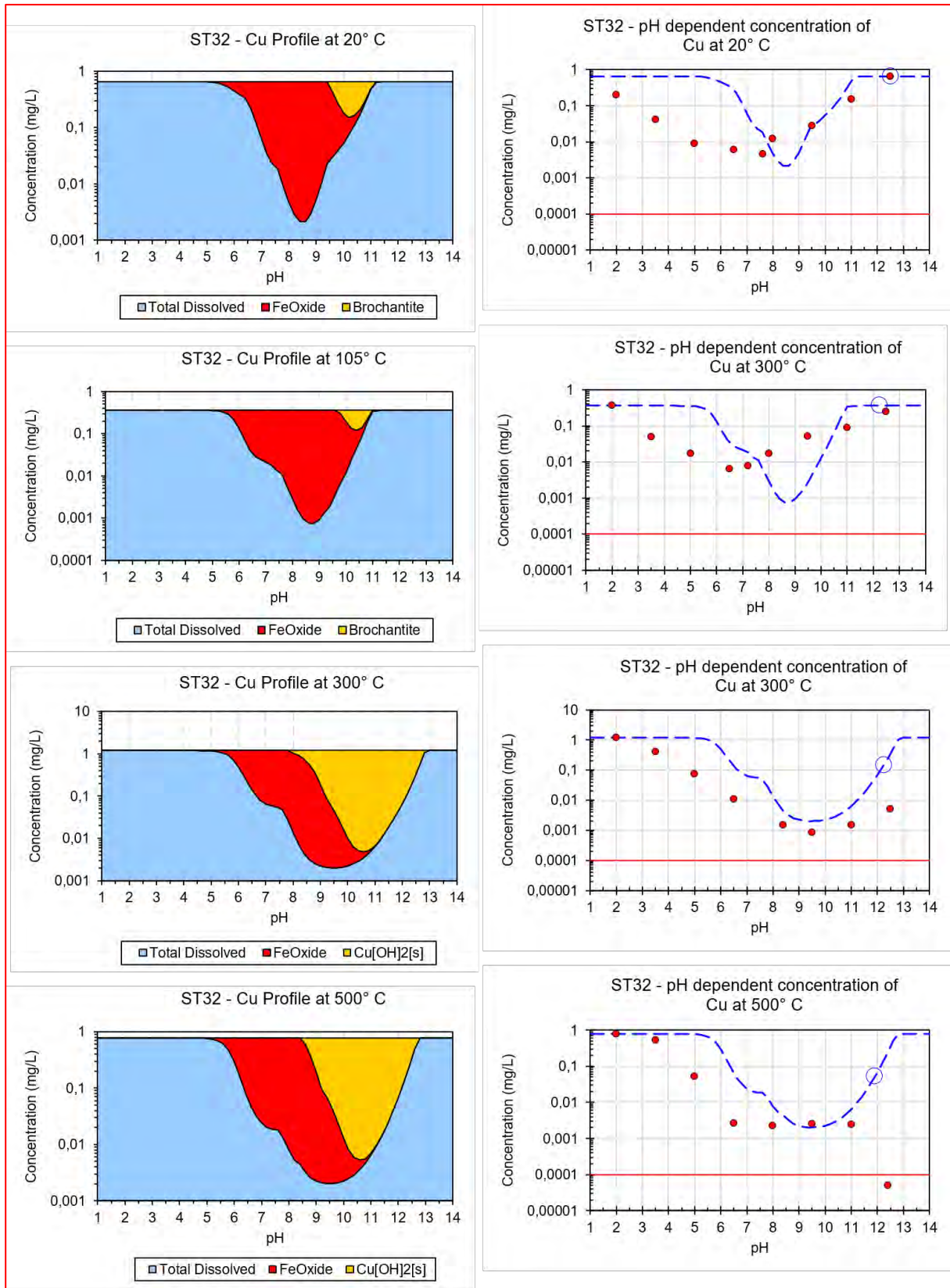


Abbildung 277 Modellierung ST32 Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

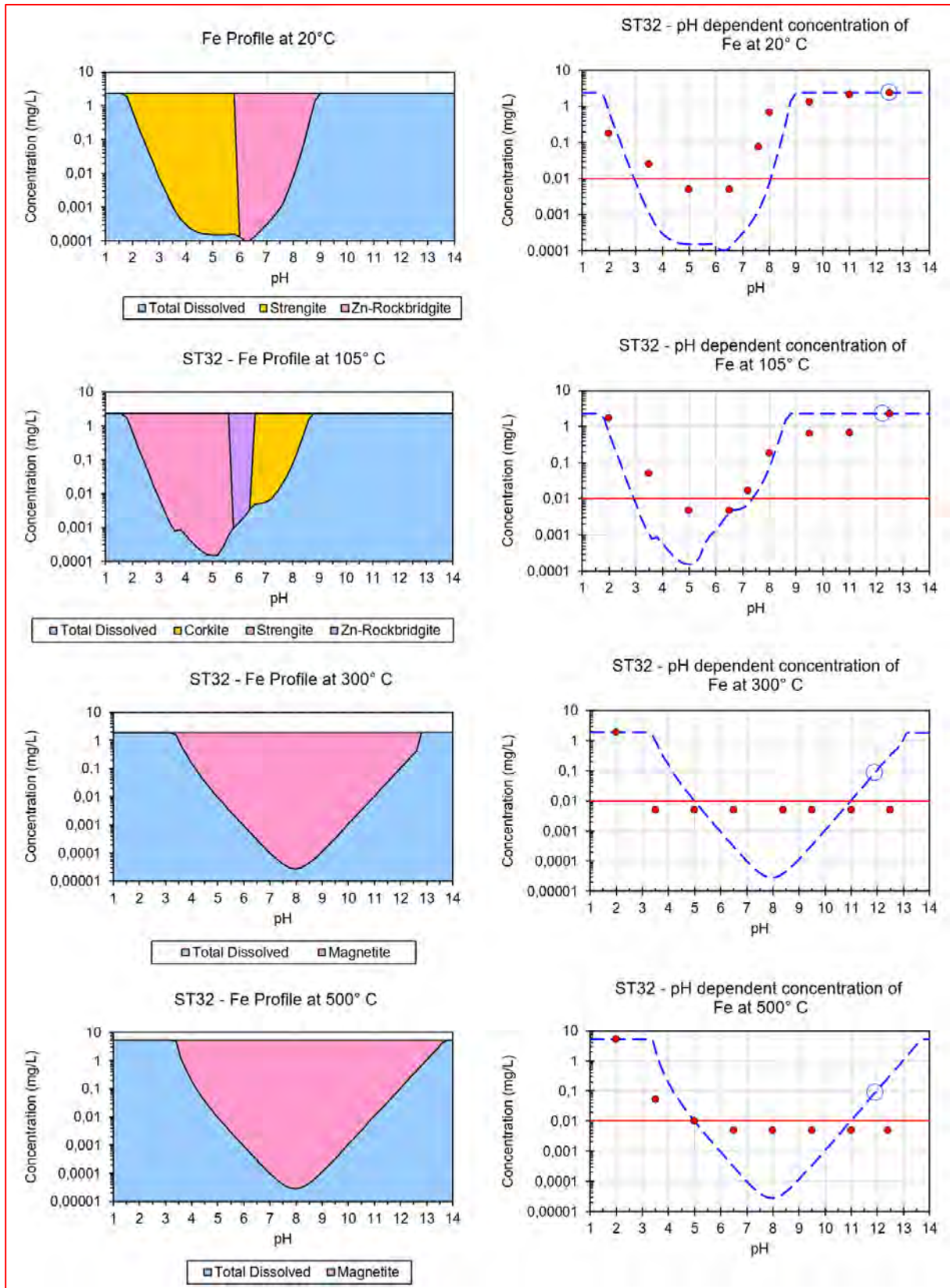


Abbildung 278 Modellierung ST32 Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

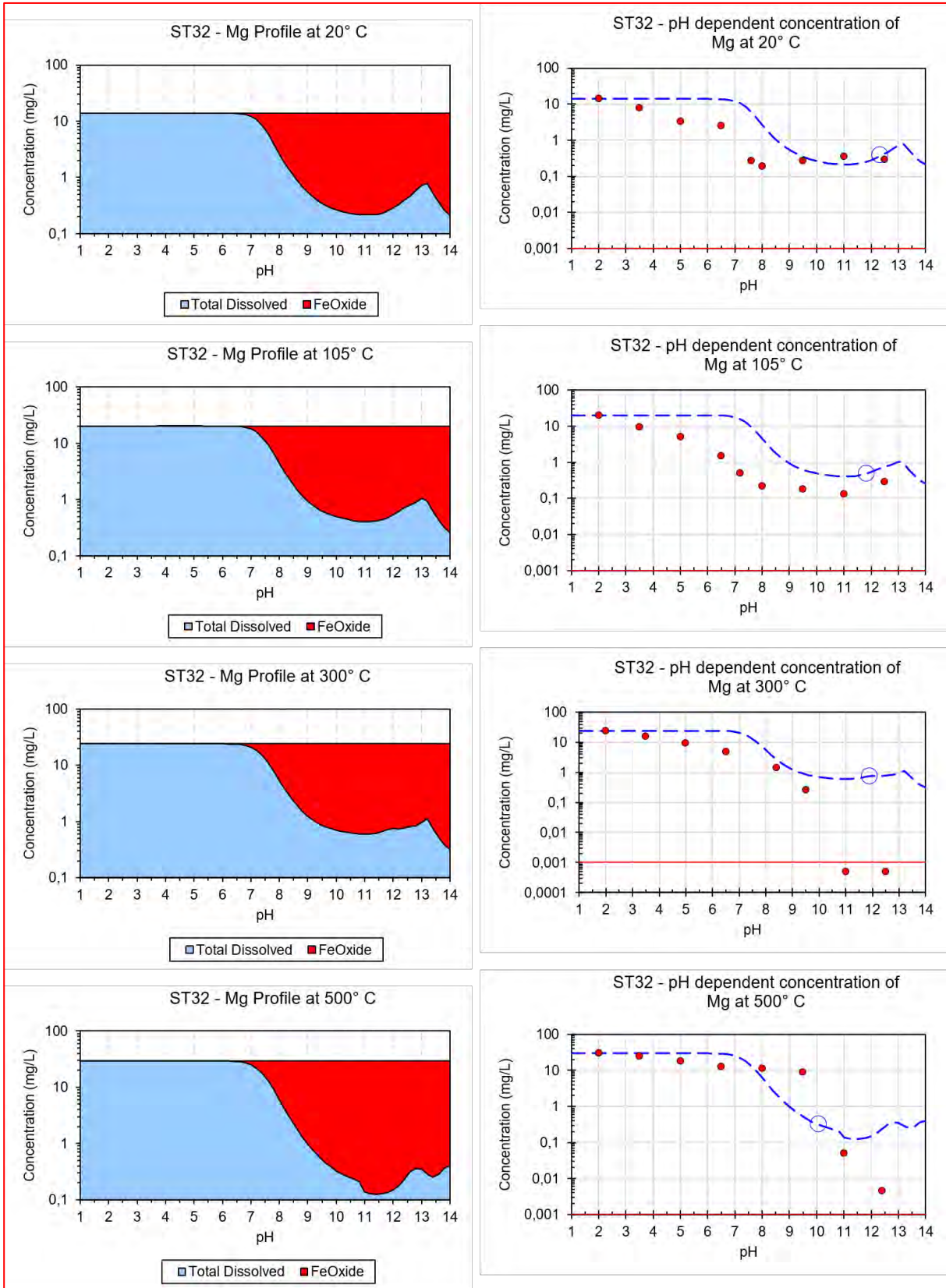


Abbildung 279 Modellierung ST32 Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

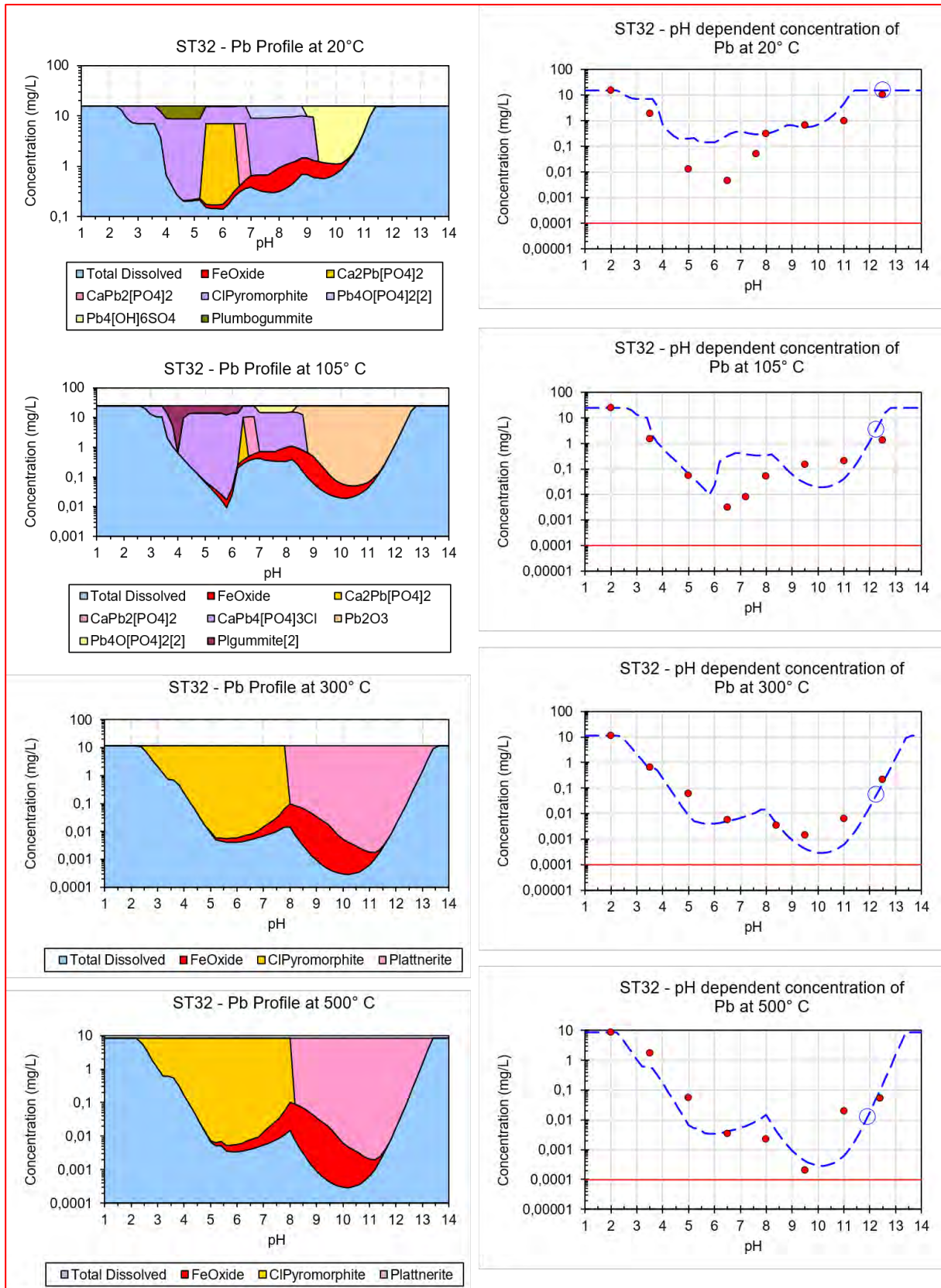


Abbildung 280 Modellierung ST32 Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

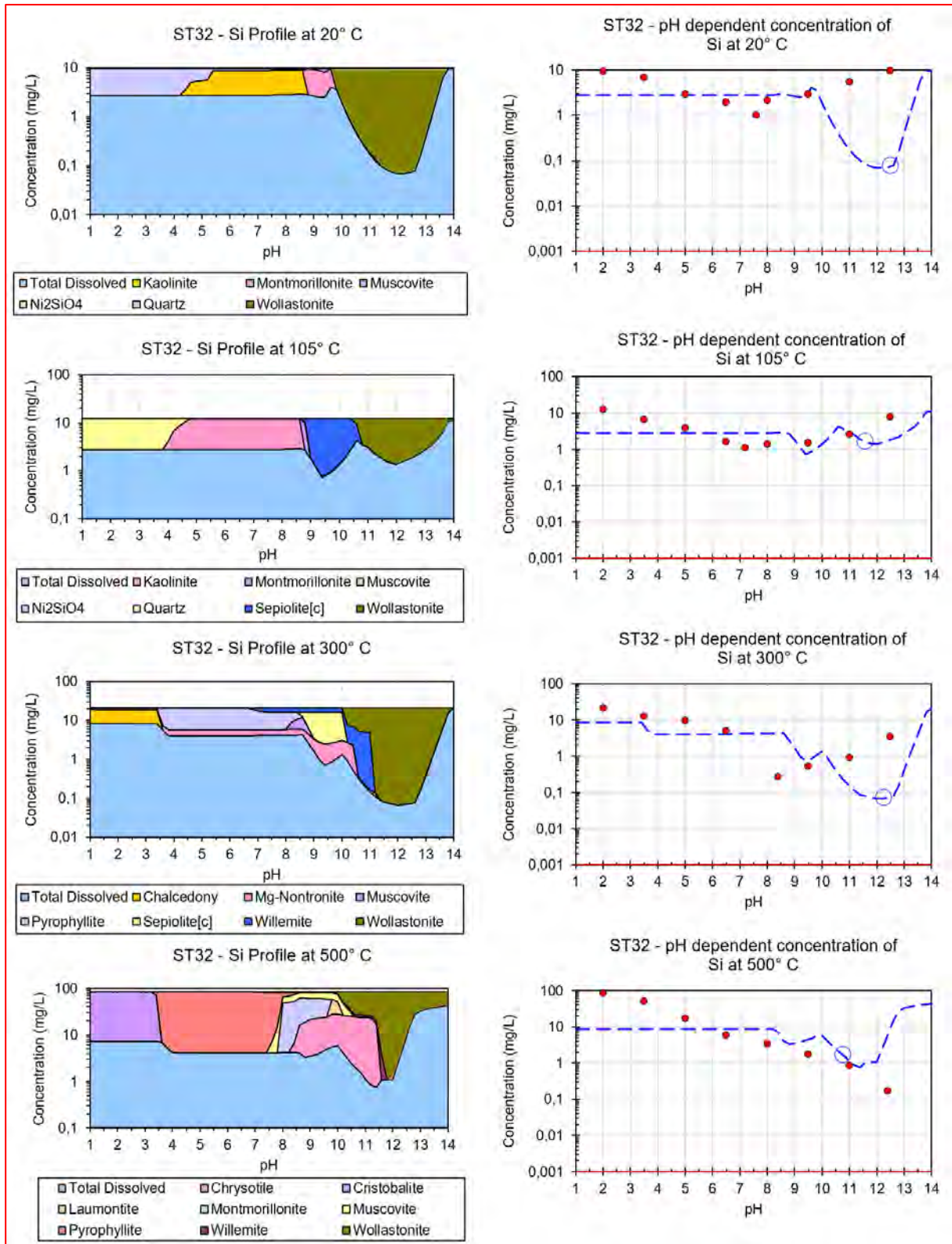
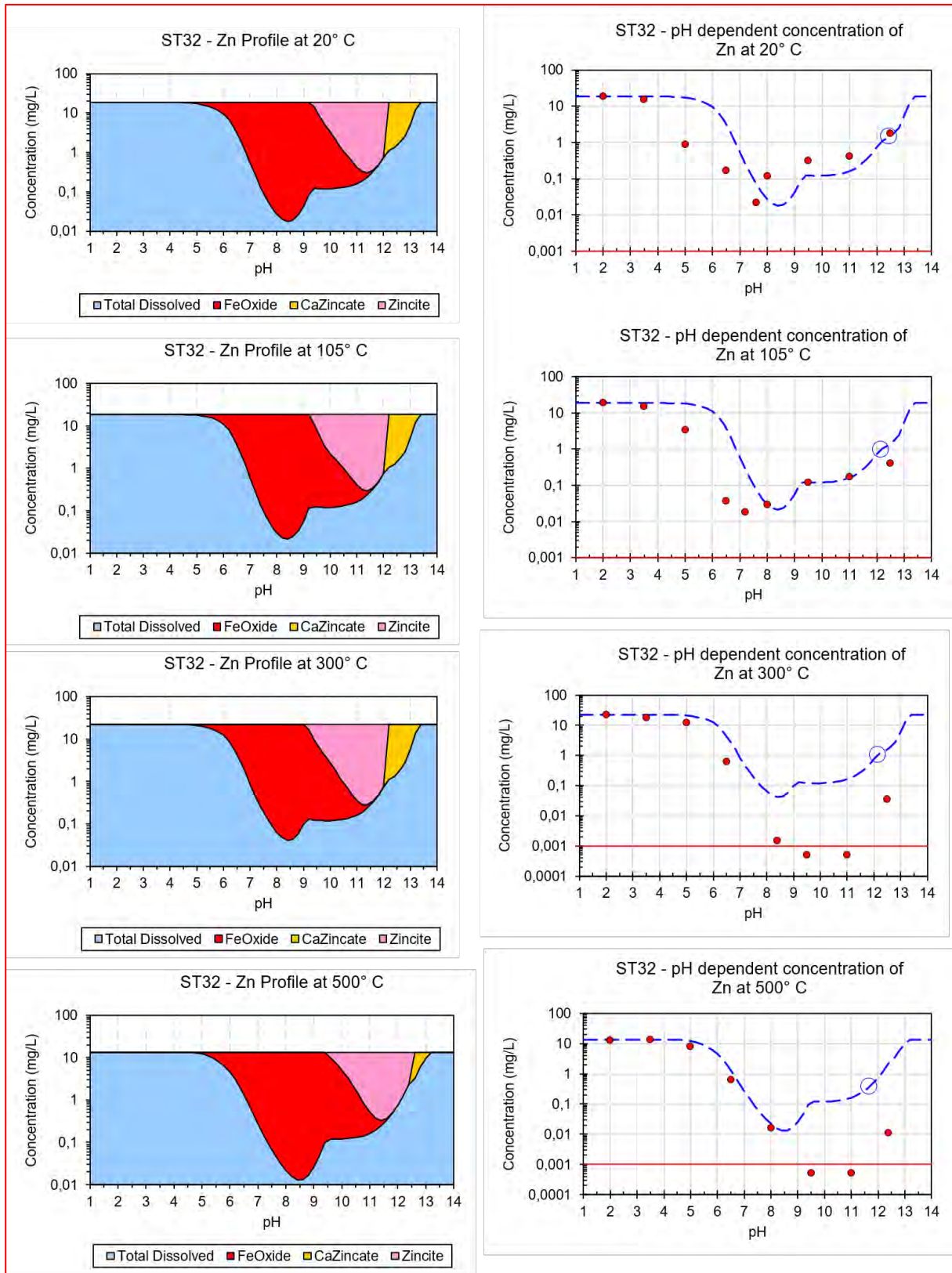


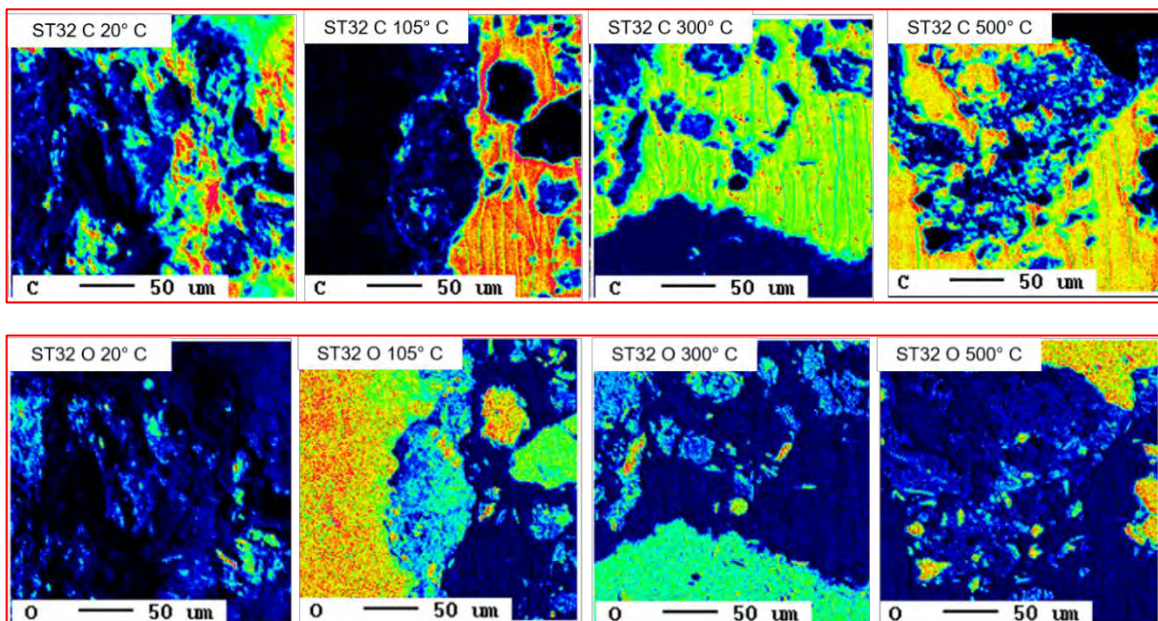
Abbildung 281 Modellierung ST32 Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

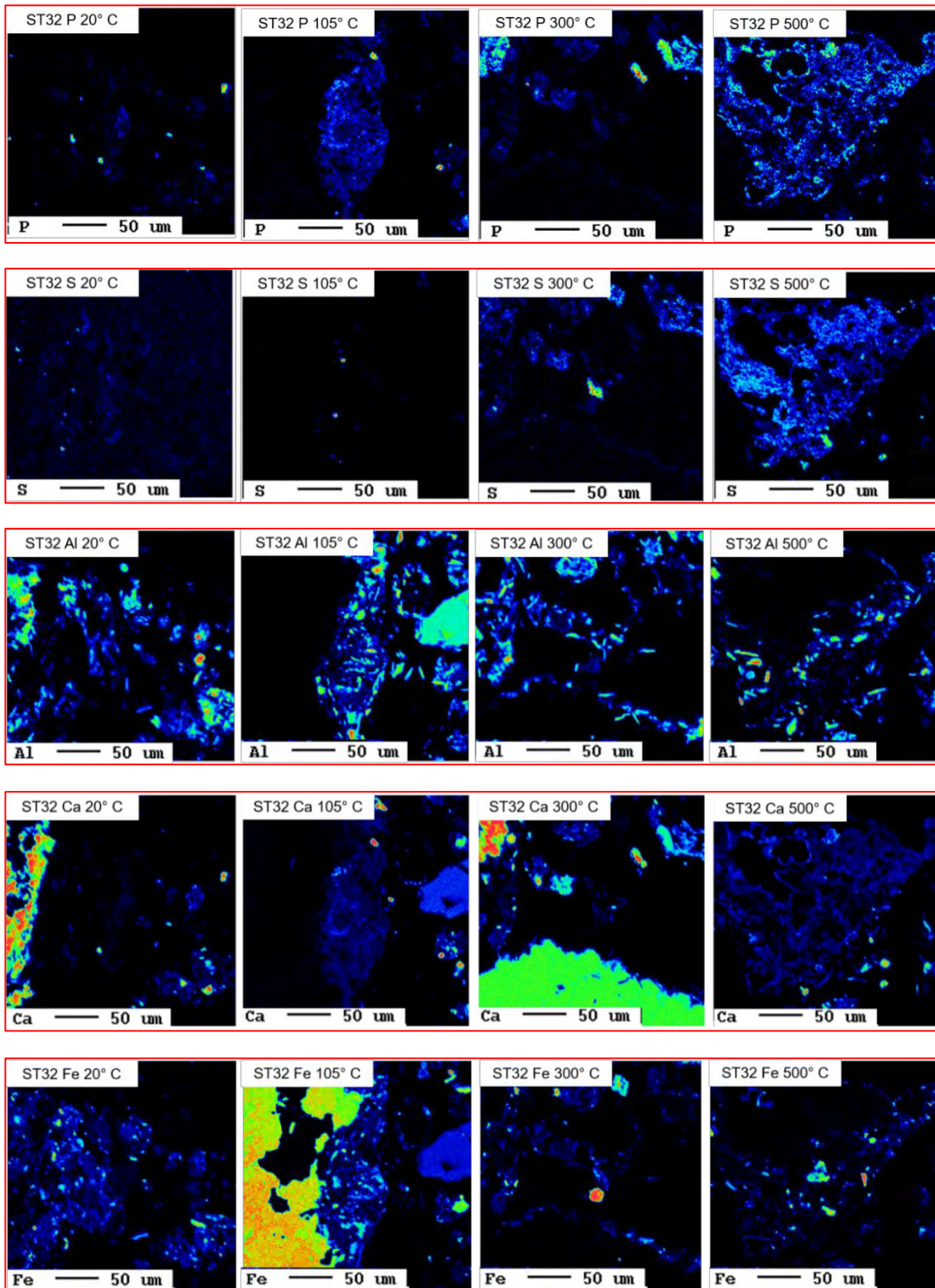


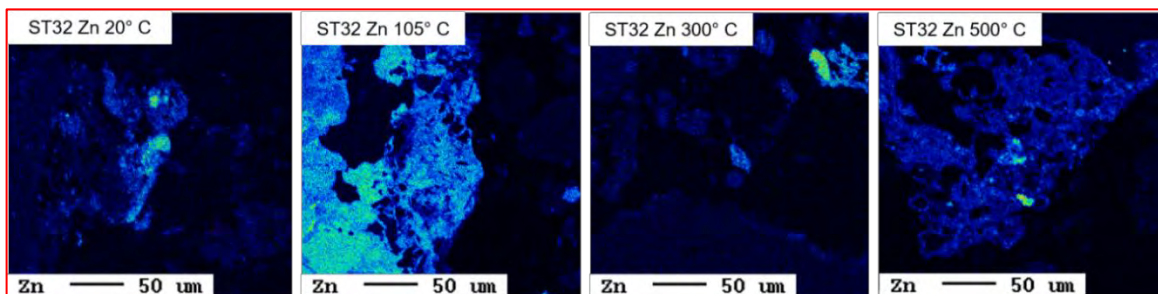
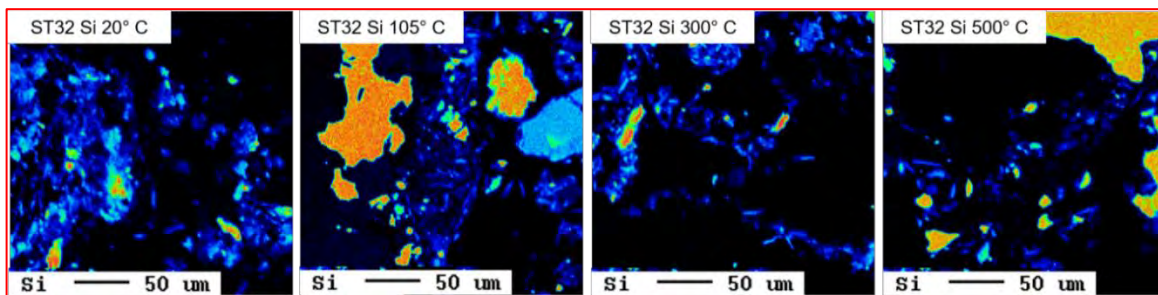
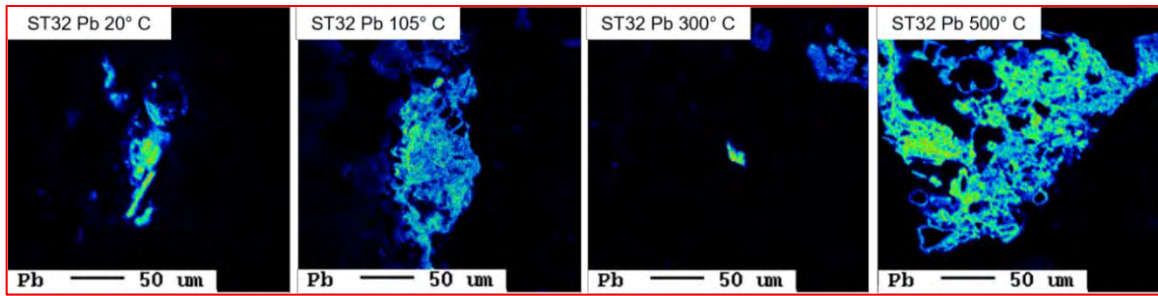
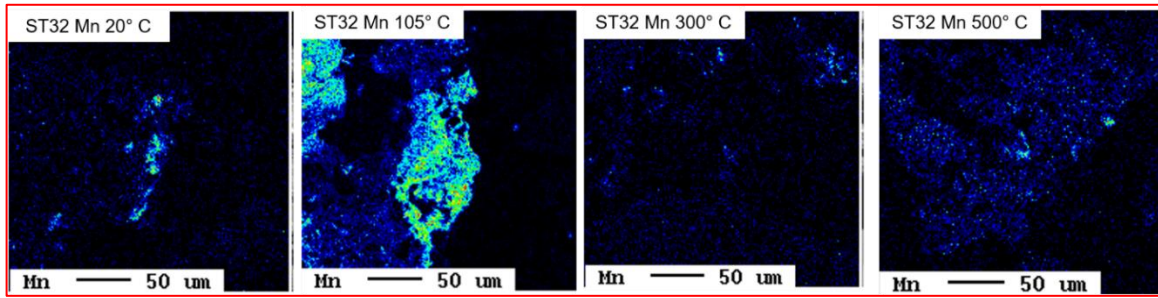
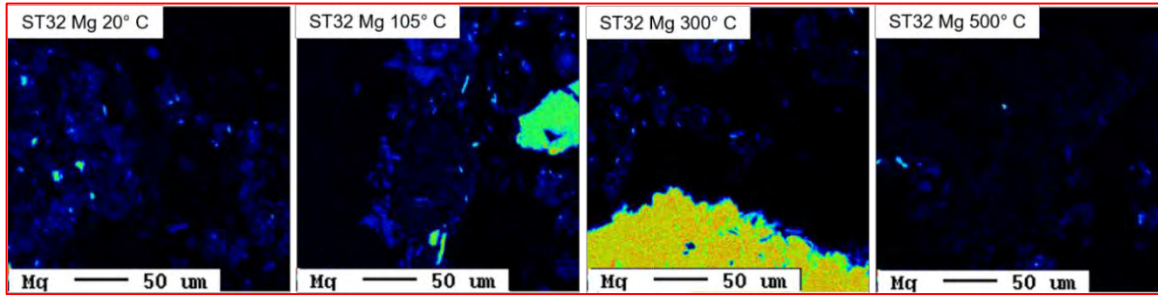
Mikrosondenergebnisse ST32

Die Mikrosondenergebnisse der ST32 (siehe Abbildung 282) weisen in allen vier Proben große Stellen an Pb-Kontaminationen auf. Bei der 20 °C-Probe korrelieren diese mit den Elementen Mn, Al, O und P. Ebenso ist dieser Trend für Zn erkennbar, jedoch liegen erhöhte Werte an jenen Stellen vor, wo Pb in geringen Konzentrationen auftritt. Bei der 105 °C-Probe lässt sich ein Zusammenhang der Elementarverteilung von Pb mit den Elementen Mn, Zn, Al, O und P erkennen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Pb als Calciumbleiphosphat mit Zn-Einlagerungen vorliegt. Die Erhöhung der Behandlungstemperatur des Probematerials auf 300 °C zeigt, dass sich dieses Calciumbleiphosphat zersetzt hat und nun Bleisulfid bildet. Es ist eine verstärkte Korrelation mit S, Fe und O zu erkennen. Die Ergebnisse der 500 °C-Probe weisen wieder Ähnlichkeiten mit der 20 °C- und der 105 °C-Probe auf (Kern 2021).

Abbildung 282 Elementarverteilungskarten ST32 von C, O, P, S, Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Pb, Si, Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis - grün – gelb – orange – rot – pink – weiß)







5.5.5 Probe Poschacher

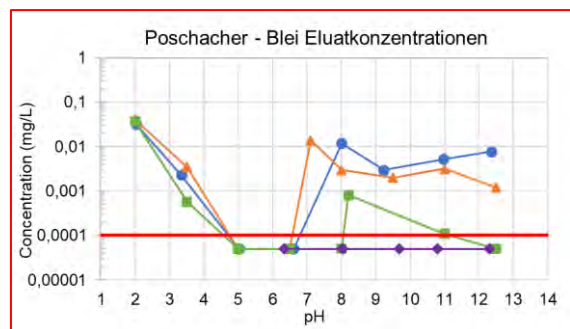
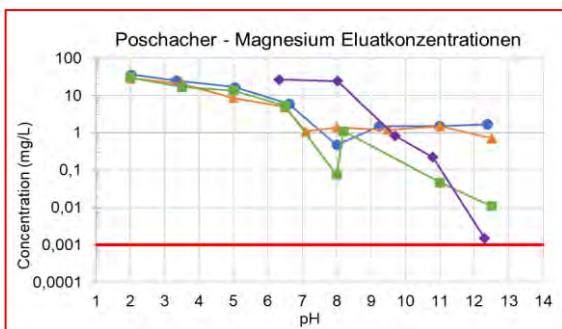
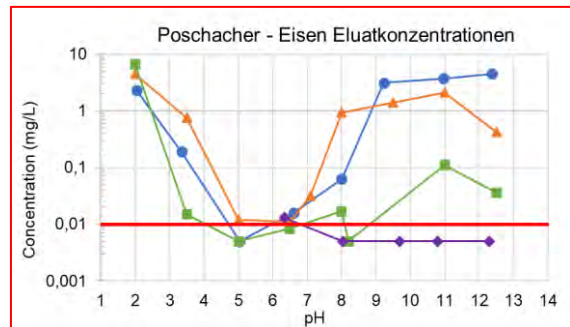
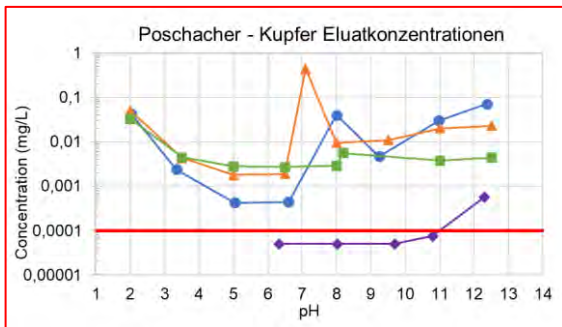
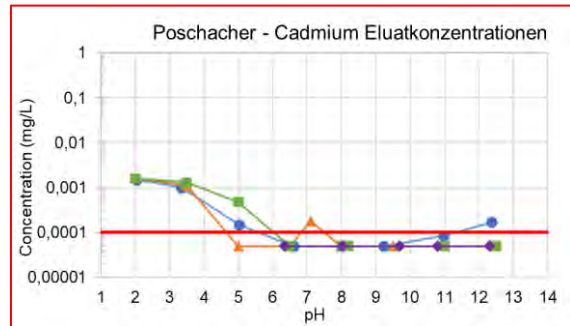
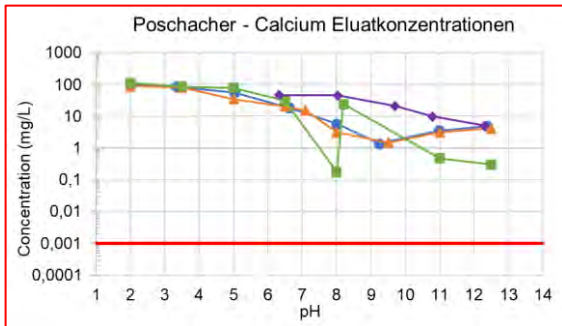
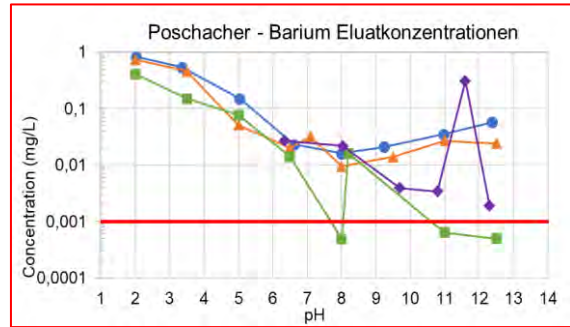
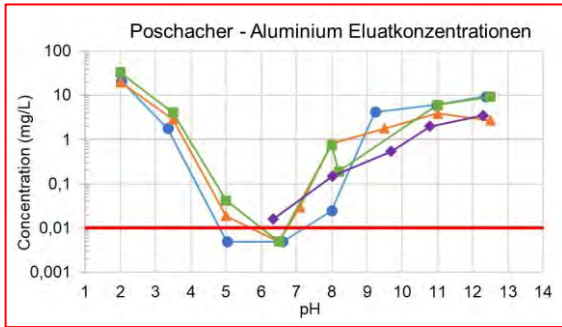
Die Zusammensetzung der Probe Poschacher war vor den Eluatuntersuchungen unbekannt. Die Mikrosondenergebnisse weisen auf Ba-Bereiche hin. Aufgrund dieser Erkenntnis wird zusätzlich zu den Elementen Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, Si und Zn auch Ba in LeachXS™ modelliert.

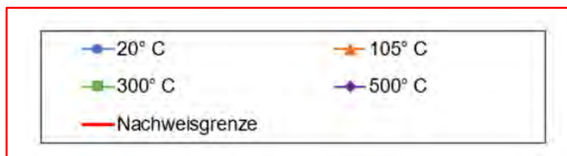
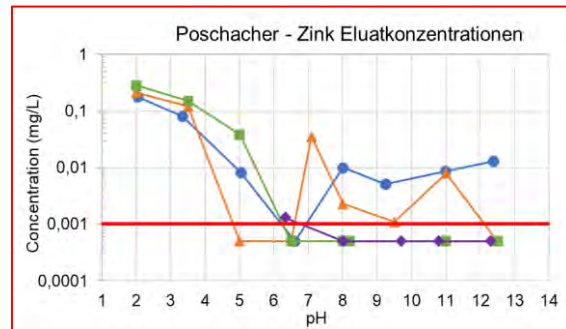
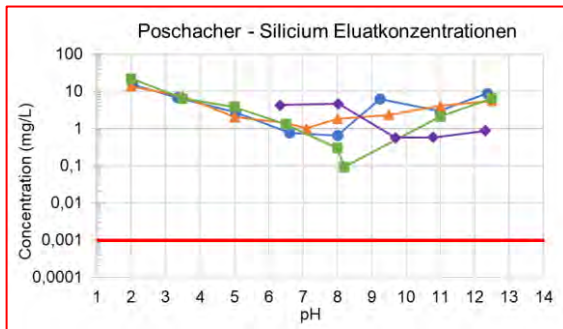
Eluatkonzentrationen Poschacher

In Abbildung 283 sind die Verläufe der Eluatkonzentrationen dargestellt. Die 500 °C-Probe von Poschacher konnte nur ab pH 6,2 ausgewertet werden. Die maximale gelöste Menge beträgt bei Ca 100 mg/l. Bei den Elementen Al, Mg und Si liegen die Höchstwerte zwischen 20 mg/l und 50 mg/l. Die maximale Auslaugbarkeit von Fe beträgt 8 mg/l, bei Ba, Cd, Cu, Pb und Zn liegt diese unter 1 mg/l. Der Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Eluatkonzentrationen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Mit steigender Behandlungstemperatur des Probematerials nehmen im sauren Bereich die Eluatkonzentrationen der Elemente Al (bis pH 5,5), Cu (bis pH 5,5), Fe (pH 2) und Zn (bis pH 3) zu.
- Abnehmende Eluatkonzentrationen bei steigender Behandlungstemperatur sind bei den Elementen Ba (pH > 8), Cu (pH > 11), Fe (pH > 9), Mg (pH > 10), Pb (pH > 8), Si (pH > 9) und Zn (pH > 8) feststellbar
- Einen eher geringen Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Eluatkonzentrationen zeigen die Elemente Ca (bis pH 6), Cd, Mg (bis pH 6), Pb (bis pH 6,5) und Si (bis pH 6).
- Bei Zink liegen die Eluatkonzentrationen der 300 °C- und der 500 °C-Probe unter der Nachweisgrenze (pH .6,5)
- Die die Eluatkonzentrationen der 500 °C-Probe weisen bei den Elementen Eisen und Zink Werte unter der Nachweisgrenze auf (pH > 7 bzw. pH > 6,5).

Abbildung 283 Eluatkonzentrationen Poschacher Al, Ba, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, Si, Zn





Modellierungsergebnisse Poschacher

Für die Probe der Firma Poschacher konnten die Elutionsversuche der mit 500 °C behandelten Probe nicht vollständig ausgewertet werden. Es liegen nur die Ergebnisse für den pH-Bereich > 6,5 vor. Auswertungen für den sauren Bereich konnten daher nicht vorgenommen werden. Für den Ergebnisvergleich wurde trotz der fehlenden Daten eine Modellierung in LeachXS™ durchgeführt. Es ist zu beachten, dass sich die vorgeschlagenen Phasen der Software nur auf diesen Teilbereich beziehen.

Aluminium (Abbildung 284)

Aluminium löst sich vermehrt im sauren sowie alkalischen Bereich. Die maximalen Eluatkonzentrationen liegen bei pH 2 vor und nehmen zum neutralen Bereich hin auf ein Minimum ab, das bei pH 6,5 liegt. Im weiteren pH-Verlauf ist wieder ein Anstieg der Mobilität zu verzeichnen. Die berechneten und gemessenen Eluatkonzentrationen zeigen eine gute Übereinstimmung. Für alle vier Proben hat das Modell ähnliche Phasen ermittelt. Als Hauptphase wird Boehmit von LeachXS™ vorgeschlagen.

Barium (Abbildung 285)

Die Eluatkonzentrationen der 20 °C- und der 105 °C-Probe nehmen bis pH 8 ab und steigen im weiteren pH-Verlauf wieder leicht an. In den Eluaten der 300 °C- und der 500 °C-Probe ist eine kontinuierliche Konzentrationsabnahme von Barium zu verzeichnen. Die berechneten Eluatkonzentrationen ergeben keine Übereinstimmung mit den tatsächlichen Konzentrationsverläufen. Als dominierende Phase wird Eisenhydroxid ausgewiesen. Die Eisenhydroxidkonzentration für die Modellierungen ist mit 30.000 mg/kg angesetzt.

Calcium (Abbildung 286)

Die höchsten Calciumkonzentrationen in den Eluaten von allen vier Proben liegen im sauren Bereich. Bei der 20 °C- und der 105 °C-Proben sinken die Eluatgehalte bis pH 9 auf ein Minimum und steigen mit weiterer Erhöhung des pH-Wertes wieder leicht an. Dagegen nehmen die Ca-Konzentrationen in den Eluaten der 300 °C- und der 500 °C-Probe mit steigendem pH-Wert kontinuierlich ab. Der Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Ca-Mobilität ist im alkalischen Milieu zu erkennen. Hier liegen die niedrigsten Ca-Konzentrationen in 300 °C-Probe vor. Die 500 °C-Probe zeigt im Vergleich zur 300 °C-Probe im alkalischen Bereich erhöhte Konzentrationen im Eluat. Die modellierten Eluatkonzentration für die 300 °C- die 500 °C-Probe stimmen mit den Messwerten gut überein. Bei der 20 °C- und der 105 °C- weicht der berechnete Konzentrationsverlauf von den Messwerten stark ab. Für die Modellierung wurde ein Eisenhydroxidgehalt von 3.000 mg/kg sowie eine CO_3^{2-} -Konzentration von 1.000 mg/kg angenommen. Calcium liegt bei allen Temperaturen adsorbiert an Eisenhydroxiden oder in gebundener Form als Calcit vor, das zur Gruppe der Carbonate und Nitrate zählt.

Cadmium (Abbildung 287)

Die Eluatkonzentrationen von Cadmium zeigen bei allen Proben ein Maximum im sauren Bereich (bis pH 3,5), nehmen mit steigendem pH-Wert schnell bis unter die Nachweisgrenze ab und verbleiben auf einem konstanten Konzentrationsniveau. Die 20 °C-Probe zeigt ein leicht abweichendes Verhalten. Hier ist bei pH > 9 ein Wiederanstieg der Cd-Konzentrationen in den Eluaten feststellbar. Die berechneten Eluatkonzentrationen zeigen ab pH 3,5 keine Übereinstimmung mit den Messwerten. Die erstellten Modelle basieren auf Eisenhydroxidwerten von 500 mg/kg.

Kupfer (Abbildung 288)

Die maximalen Cu-Konzentrationen in allen vier Proben treten bei pH 2 auf. Mit zunehmenden pH-Wert sinkt die Kupfermobilität auf ein Minimum, das etwa bei pH 7 liegt. Mit steigendem pH-Wert nehmen die Cu-Gehalte in den Eluaten der 20 °C-, der 105 °C- und der 500 °C-Probe wieder zu. Bei der 300 °C-Probe ist dagegen keine Konzentrationsänderung in den Eluaten feststellbar. Die berechneten Eluatkonzentrationen weichen stark von den Messwerten ab.

Eisen (Abbildung 289)

Die maximale Auslaugbarkeit von Eisen liegt bei allen Proben im sauren Bereich und beträgt rund 8 mg/l. Mit Zunahme des pH-Wertes sinken die Eluatkonzentrationen bei der 20 °C-, der 105 °C- und der 300 °C-Probe auf ein Minimum bei pH 5 und steigen im

weiteren pH-Verlauf wieder an. In der 500 °C-Probe bleiben die Eisenkonzentrationen mit pH-Zunahme konstant. Ein Temperatureinfluss auf die Mobilität von Eisen ist nur insoweit zu erkennen, dass die 500 °C-Probe im alkalischen Bereich die geringsten Eluatkonzentrationen an Eisen aufweist. Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Eluatkonzentrationen bei der 20 °C-, der 105 °C- und der 300 °C-Probe ergibt nur bis pH 5 eine relativ gute Übereinstimmung. Nach den Modellberechnungen sollte Eisen überwiegend in Form von Magnetit und Maghemit vorliegen.

Magnesium (Abbildung 290)

Die maximalen Eluatkonzentrationen von Magnesium treten in allen Proben im sauren Bereich bei pH 2 auf. Mit zunehmenden pH-Wert sinken die Konzentrationen bei der 20 °C- und der 105 °C-Probe bis etwa pH 8 und verbleiben im höheren pH-Bereich auf konstantem Konzentrationsniveau. Bei der 300 °C- und der 500 °C-Probe gehen die Eluatkonzentrationen mit steigenden pH-Wert zurück, sinken aber bei im weiteren pH-Verlauf bis auf die Nachweisgrenze (500 °C-Probe). Offensichtlich reduzieren die höheren Behandlungstemperaturen die Auslaugbarkeit von Magnesium. Die modellierten Eluatkonzentrationen zeigen im Vergleich mit den Messwerten nur im sauren Bereich (bis pH 3,5) sowie bei der 20 °C- und der 500 °C-Probe im alkalischen Bereich eine gute Übereinstimmung. Ansonsten werden mit dem Modell durchweg höhere Konzentrationen von Magnesium im Eluat berechnet. Mit der auftretenden Phase der Eisenhydroxide kann die tatsächliche Menge an freigesetztem Magnesium nur beschränkt dargestellt werden. Für Eisenhydroxid wurde eine Konzentration von 20.000 mg/kg angesetzt.

Blei (Abbildung 291)

Die maximale Mobilität für Blei wurde in allen Proben bei pH 2 ermittelt. Mit steigendem pH-Wert nehmen die Eluatkonzentrationen schnell ab und liegen bereits bei pH 5 unter der Nachweisgrenze. Bei der 20 °C-, der 105 °C- und der 300 °C-Probe tritt ein starker Konzentrationsprung auf (etwa bei pH 7) und die Mobilität steigt um mehr als eine Größenordnung. Im weiteren pH-Verlauf sinken die Eluatkonzentrationen bei diesen Proben wieder leicht ab. Im alkalischen Bereich sinkt die Mobilität mit dem steigenden thermischen Einfluss. Die Eluate der 500 °C-Probe zeigen bei pH > 6,5 Bleikonzentrationen unter der Nachweisgrenze auf. Die höheren Behandlungstemperaturen führen offensichtlich zu einer verstärkten Immobilisierung von Blei. Der eingestellte Eisenhydroxidgehalt in LeachXS™ beträgt für alle Temperaturen 30 mg/kg. Die berechneten Eluatkonzentrationen zeigen mit Ausnahme von pH 2 keine Übereinstimmung mit den Messwerten.

Silicium (Abbildung 292)

Die Si-Konzentrationen in den Eluaten der 20 °C-, der 105 °C- und der 300 °C-Probe nehmen von einer Maximalkonzentration bei pH 2 bis etwa pH 8 ab und steigen im weiteren pH-Verlauf wieder an, wobei sich die Konzentrationsniveaus an den einzelnen Messpunkten für diese drei Proben in der gleichen Größenordnung bewegen. In den Eluaten der 500 °C-Probe nimmt die Si-Konzentration von pH 8 nach pH 9,5 deutlich ab und bleibt dann konstant. Die Behandlung der Probe mit 500 °C führt, verglichen mit den anderen Behandlungstemperaturen, zur geringsten Auslaugbarkeit im alkalischen Bereich. Die berechneten Eluatkonzentrationen weichen von den Messwerten zum Teil deutlich ab. Allenfalls bei 105 °C-Probe ist bei pH > 5 eine Übereinstimmung festzustellen. Mit dem Modell werden im Vergleich zu anderen Elementen eine Vielzahl von Phasen berechnet.

Zink (Abbildung 293)

Die maximalen Zinkkonzentrationen liegen in allen vier Proben bei pH 2 vor. Bis pH 6,5 nimmt die Auslaugbarkeit von Zink ab. Es treten Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze auf. Während sich bei der 300 °C- und der 500 °C-Probe die Eluatkonzentrationen mit Erhöhung des pH-Werts sich nicht ändern und unterhalb der Nachweisgrenze bleiben, ist in der 20 °C- und der 105 °C-Probe ein Konzentrationsanstieg zu verzeichnen (etwa bei pH 6,5). Im weiteren pH-Verlauf (> pH 8) ändern sich die Eluatkonzentrationen der 20 °C-Probe dann nicht. Bei der 105 °C-Probe ist der weitere Konzentrationsverlauf bei pH > 8 uneinheitlich. Die berechneten Eluatkonzentrationen stimmen mit den Messwerten nur bei pH 2 gut überein. Das Modell hat für alle Behandlungstemperaturen Eisenhydroxid als Phase berechnet. Die Eisenhydroxidkonzentration wurde mit 5.000 mg/kg angesetzt.

Abbildung 284 Modellierung Poschacher Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

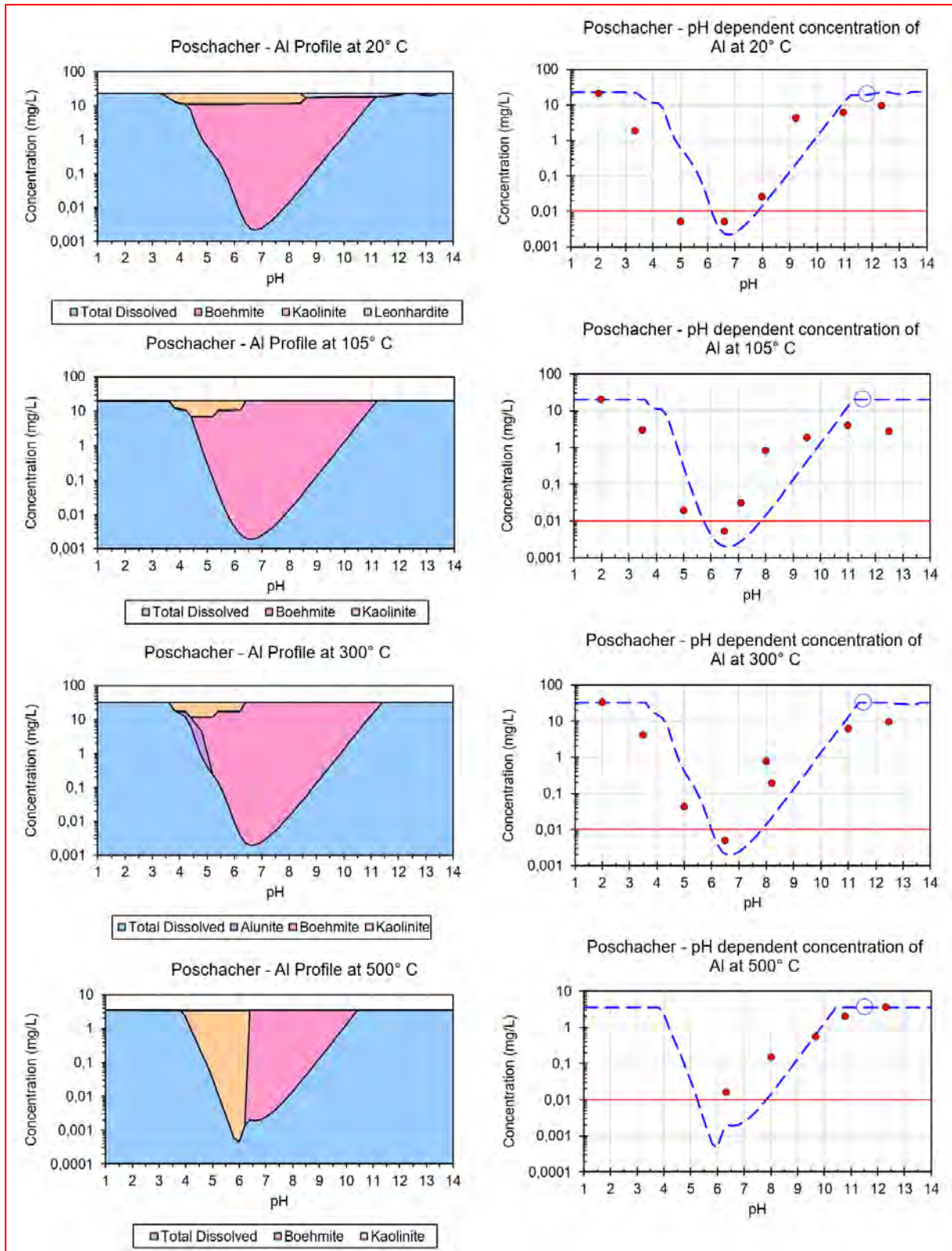


Abbildung 285 Modellierung Poschacher Barium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

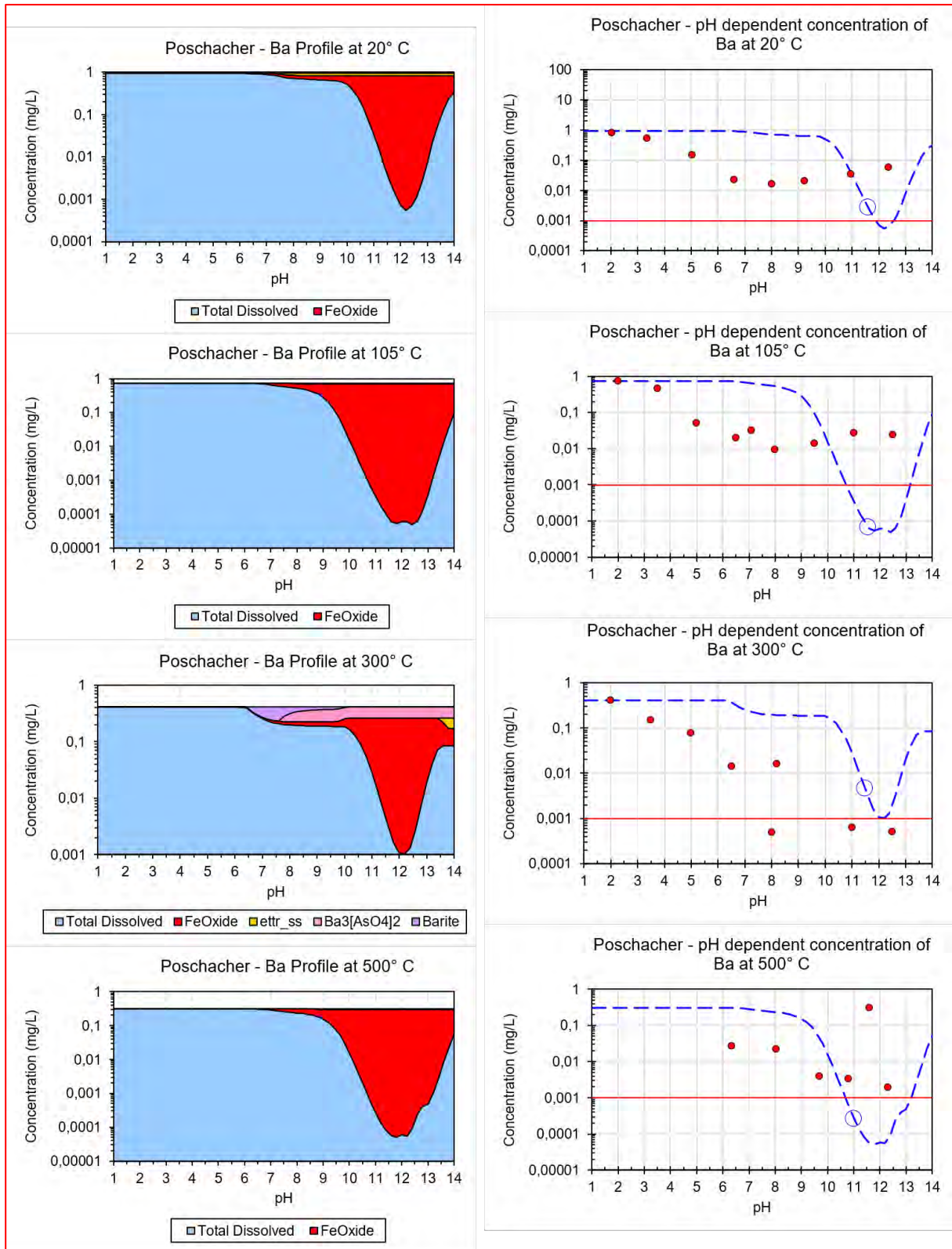


Abbildung 286 Modellierung Poschacher Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

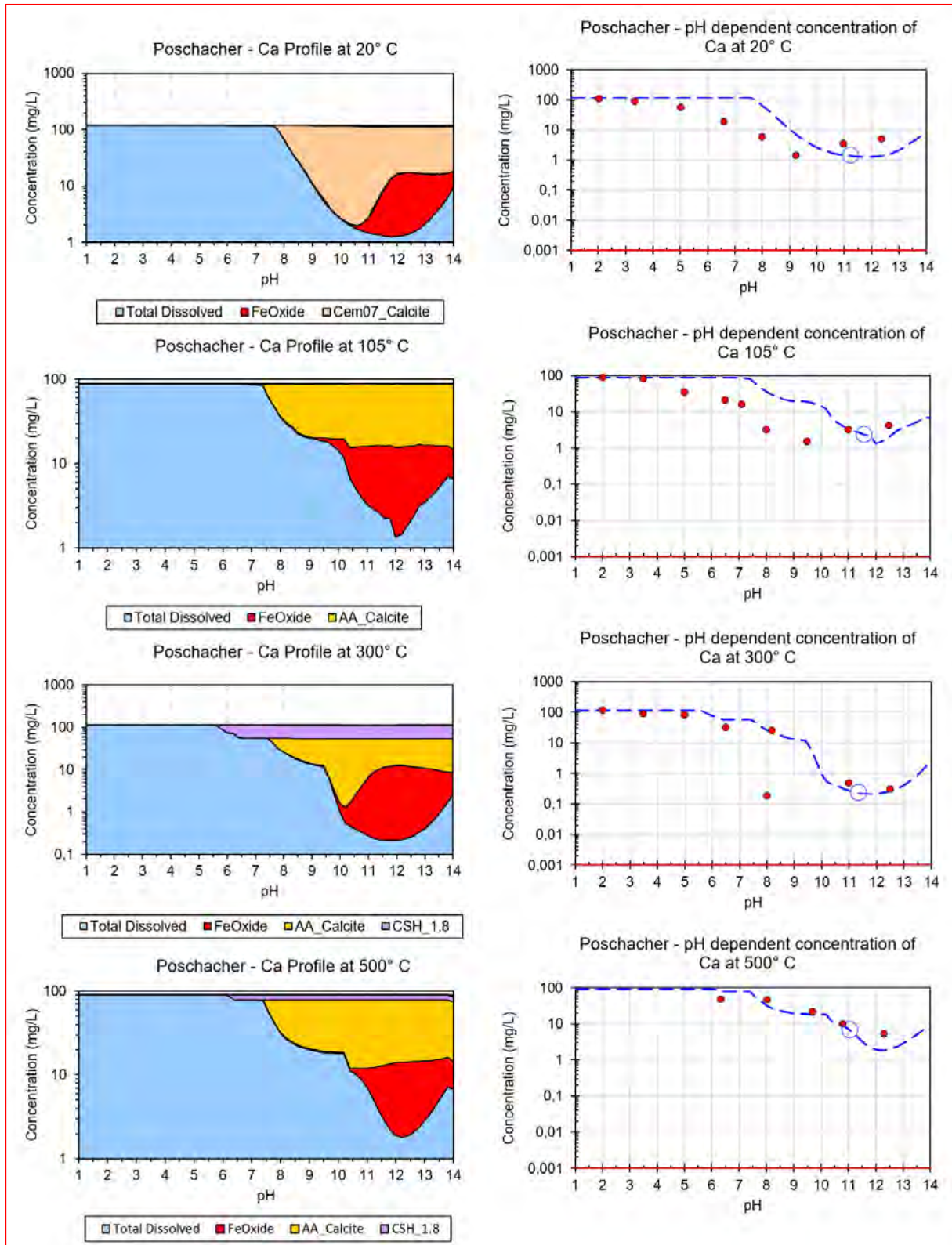


Abbildung 287 Modellierung Poschacher Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

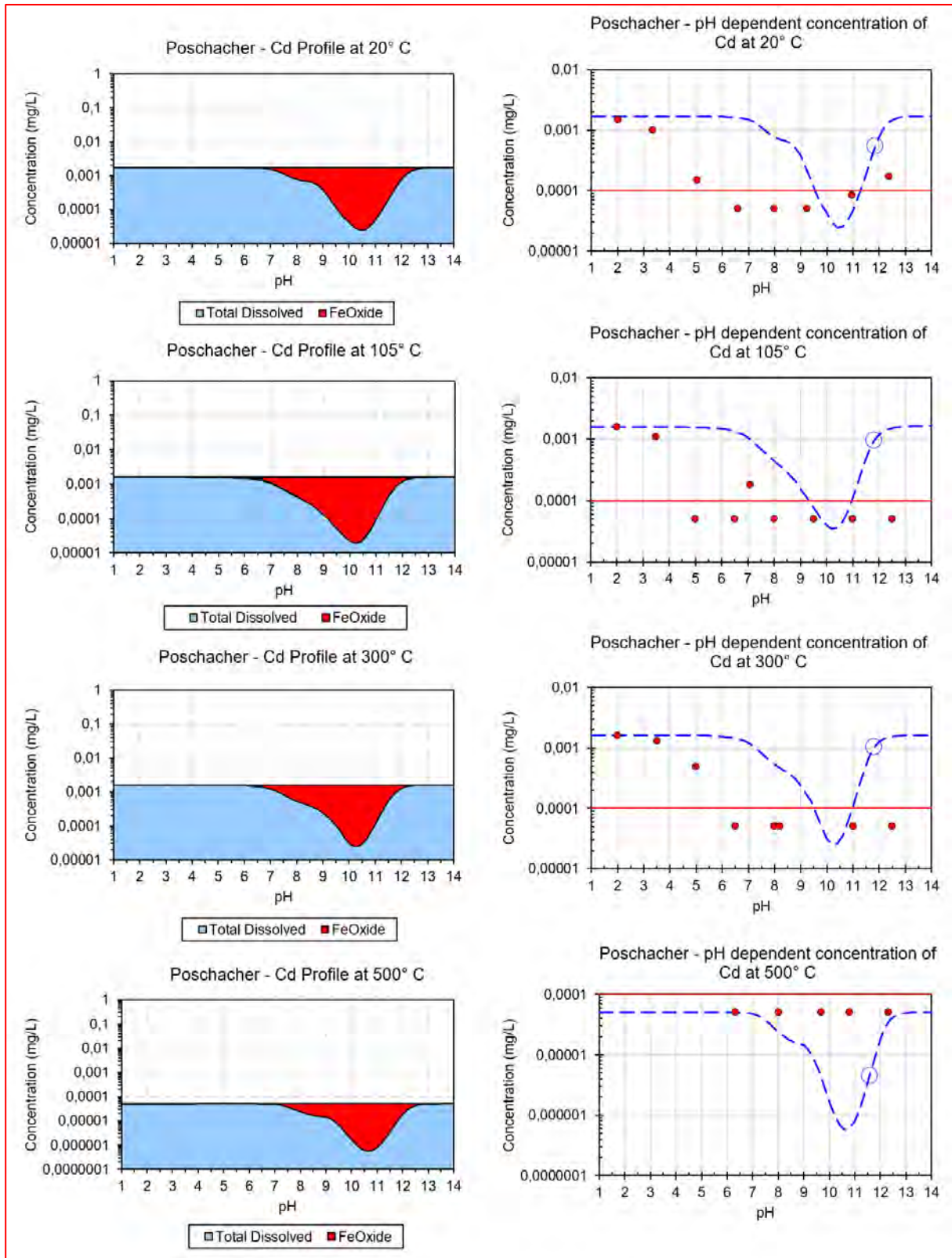


Abbildung 288 Modellierung Poschacher Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

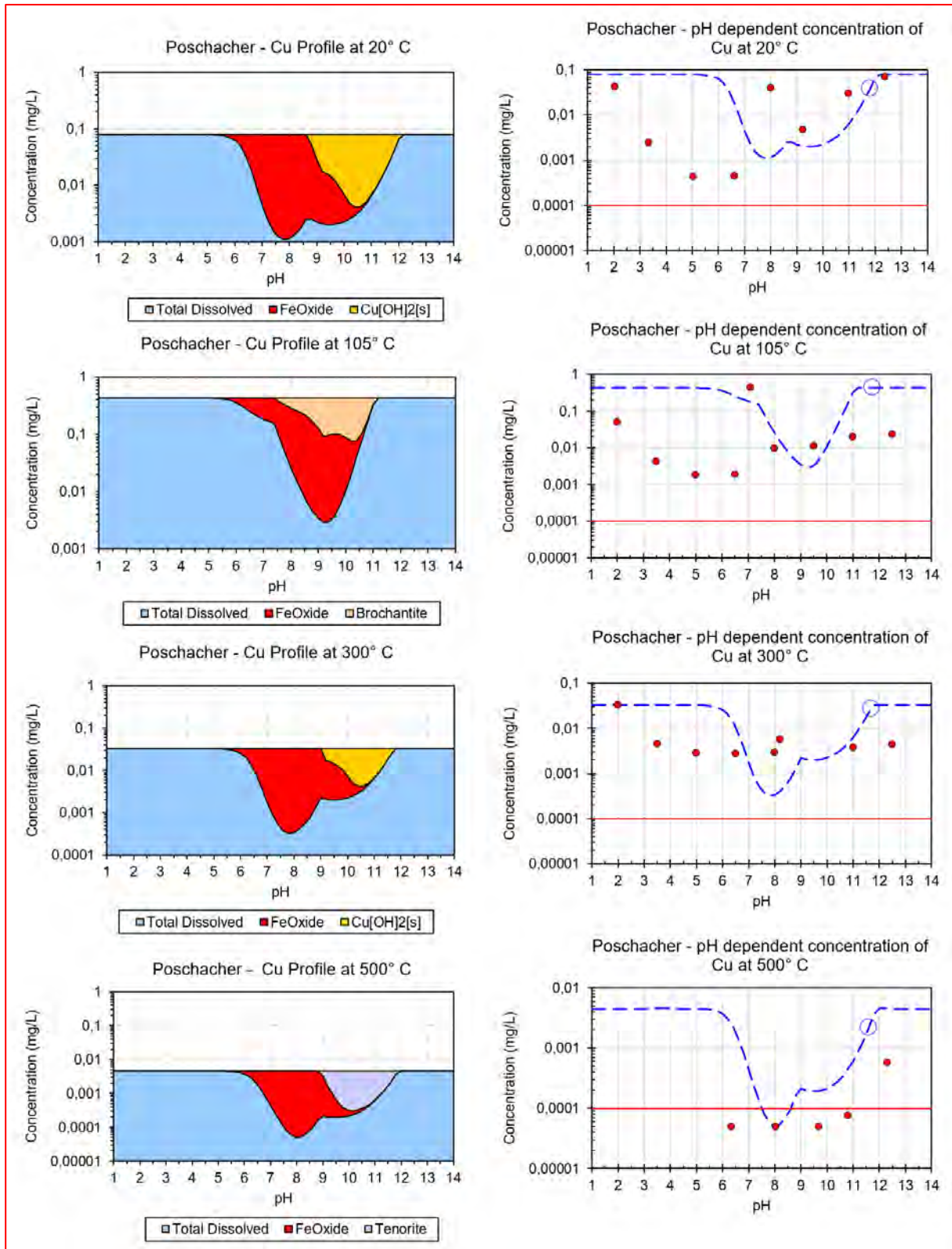


Abbildung 289 Modellierung Poschacher Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

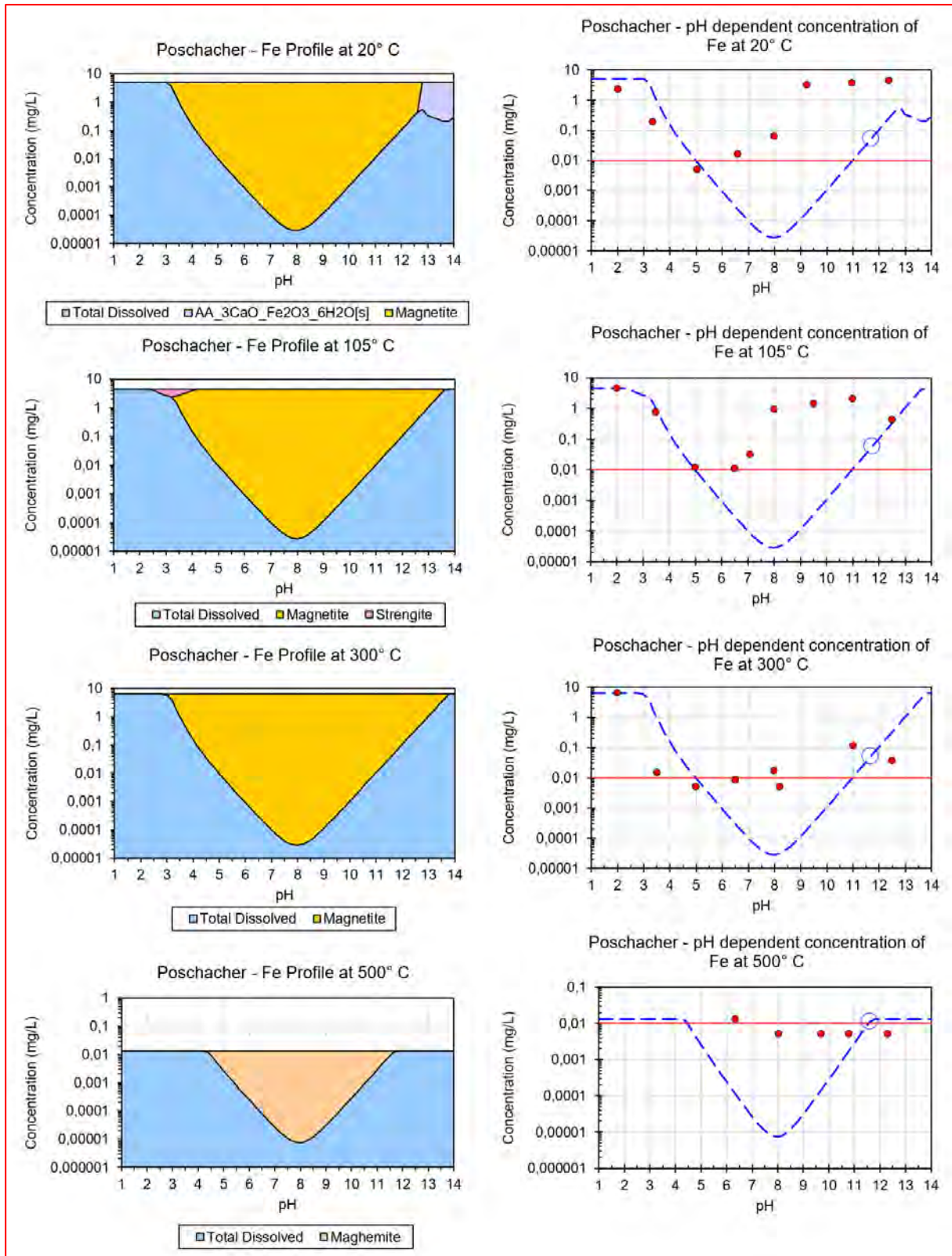


Abbildung 290 Modellierung Poschacher Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

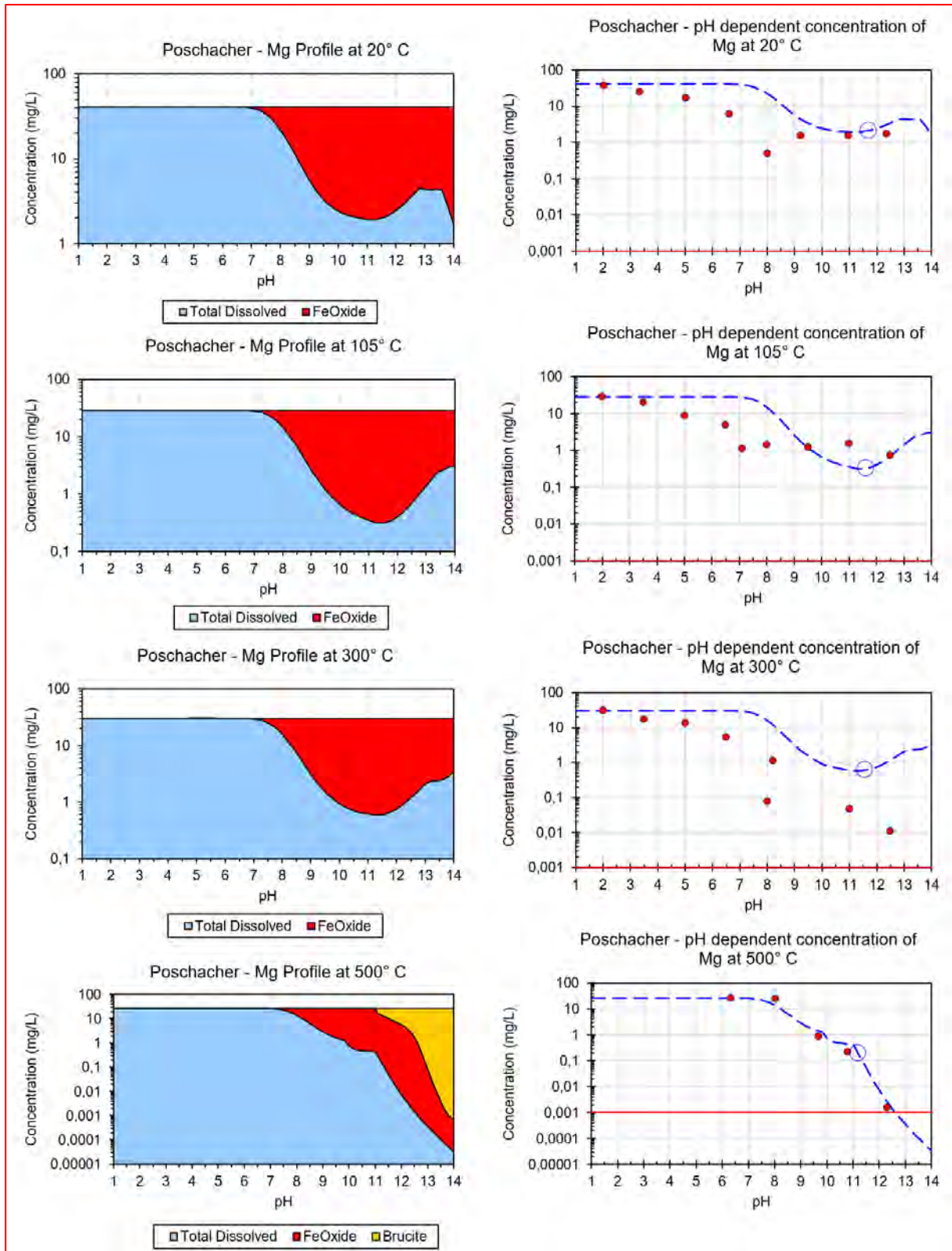


Abbildung 291 Modellierung Poschacher Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

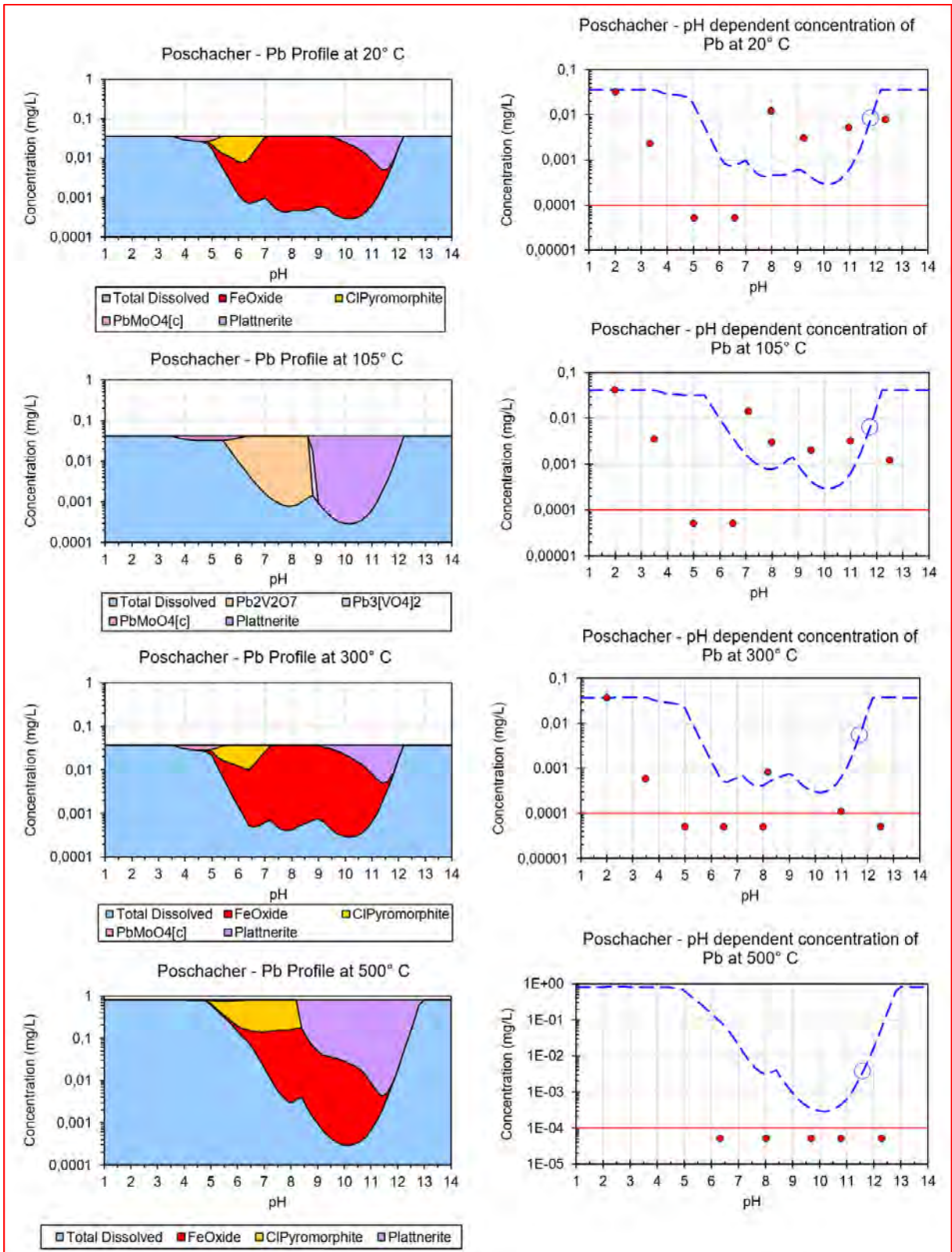


Abbildung 292 Modellierung Poschacher Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

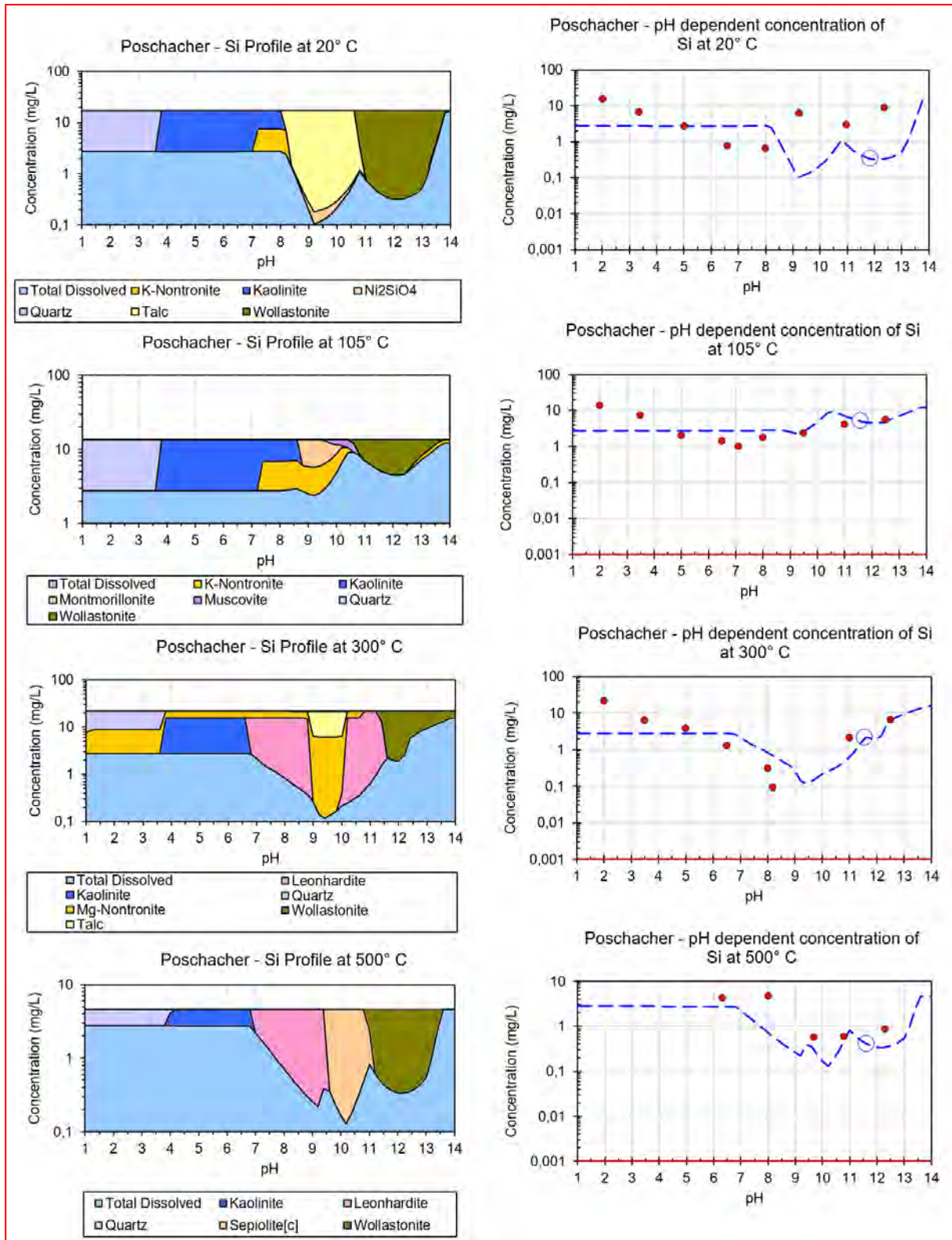
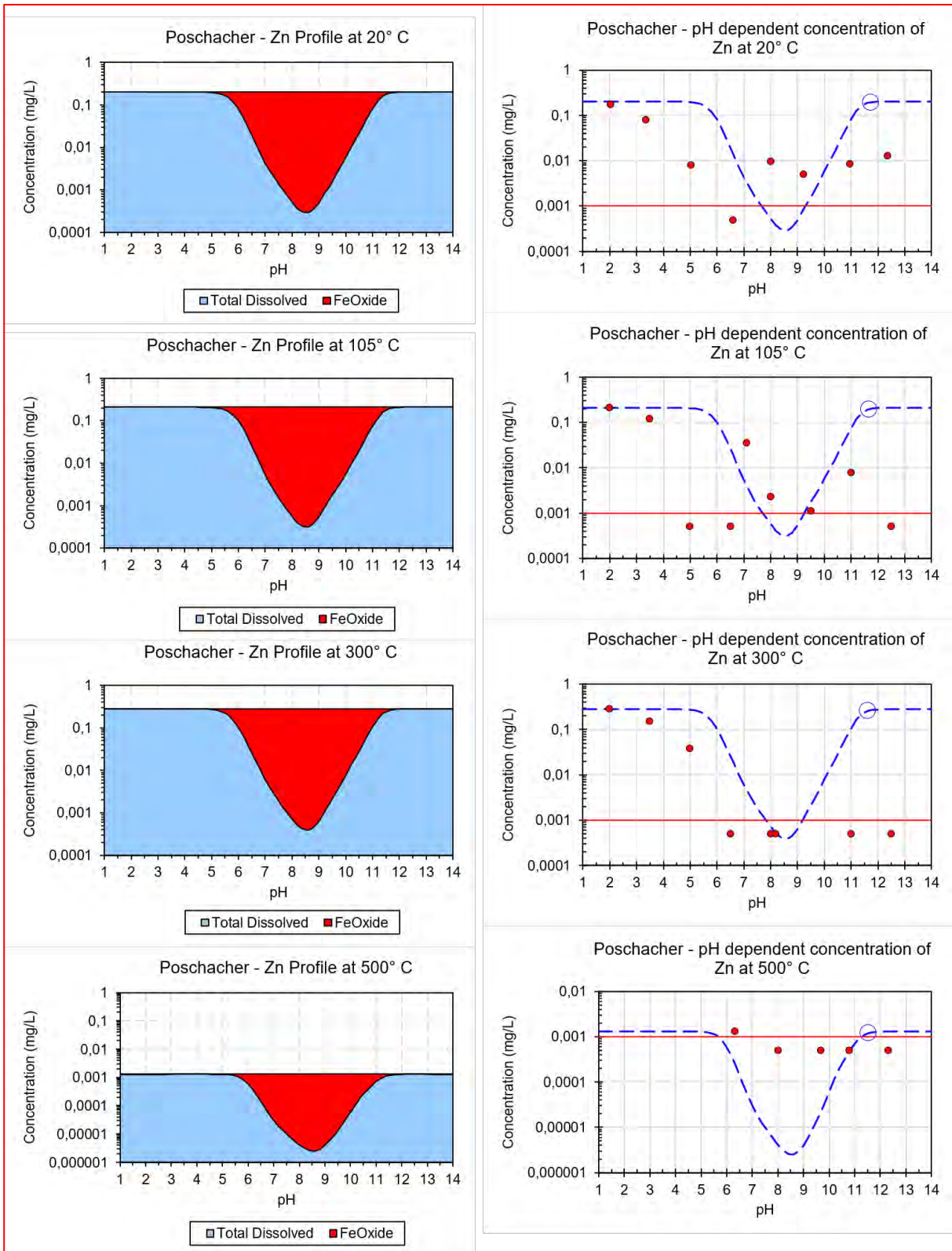


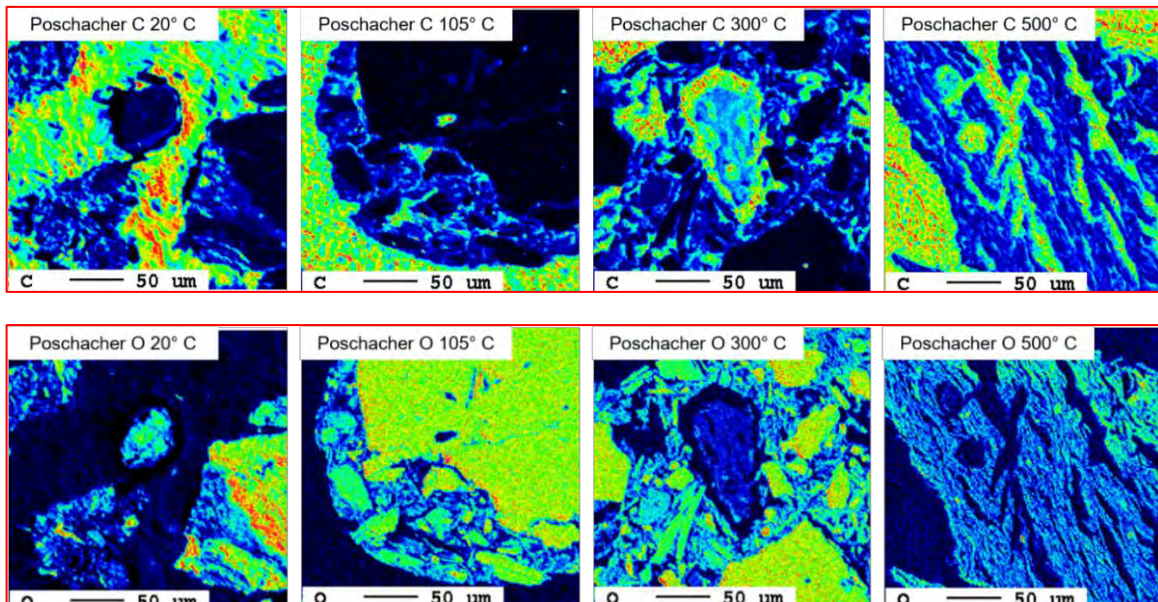
Abbildung 293 Modellierung Poschacher Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)

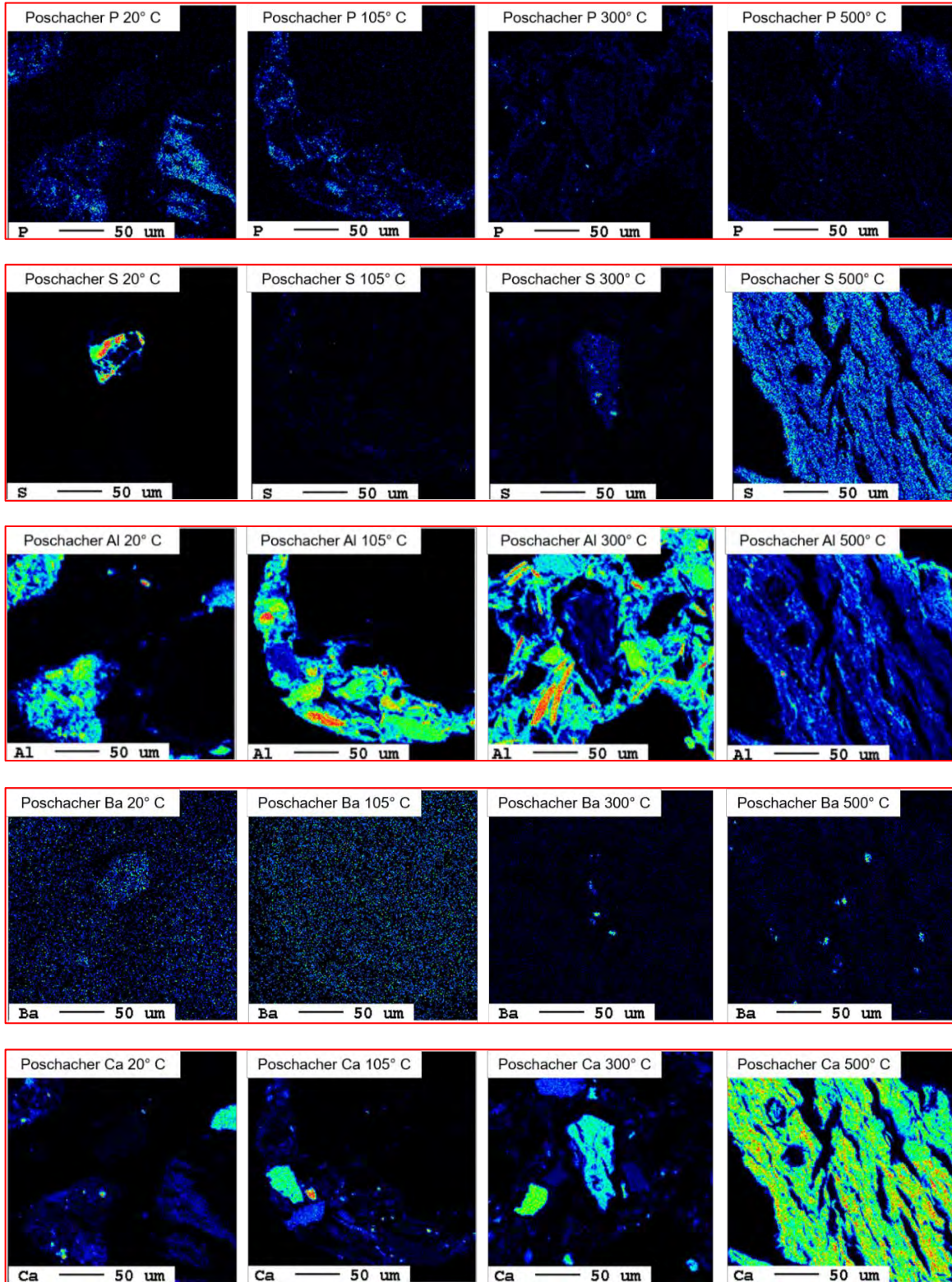


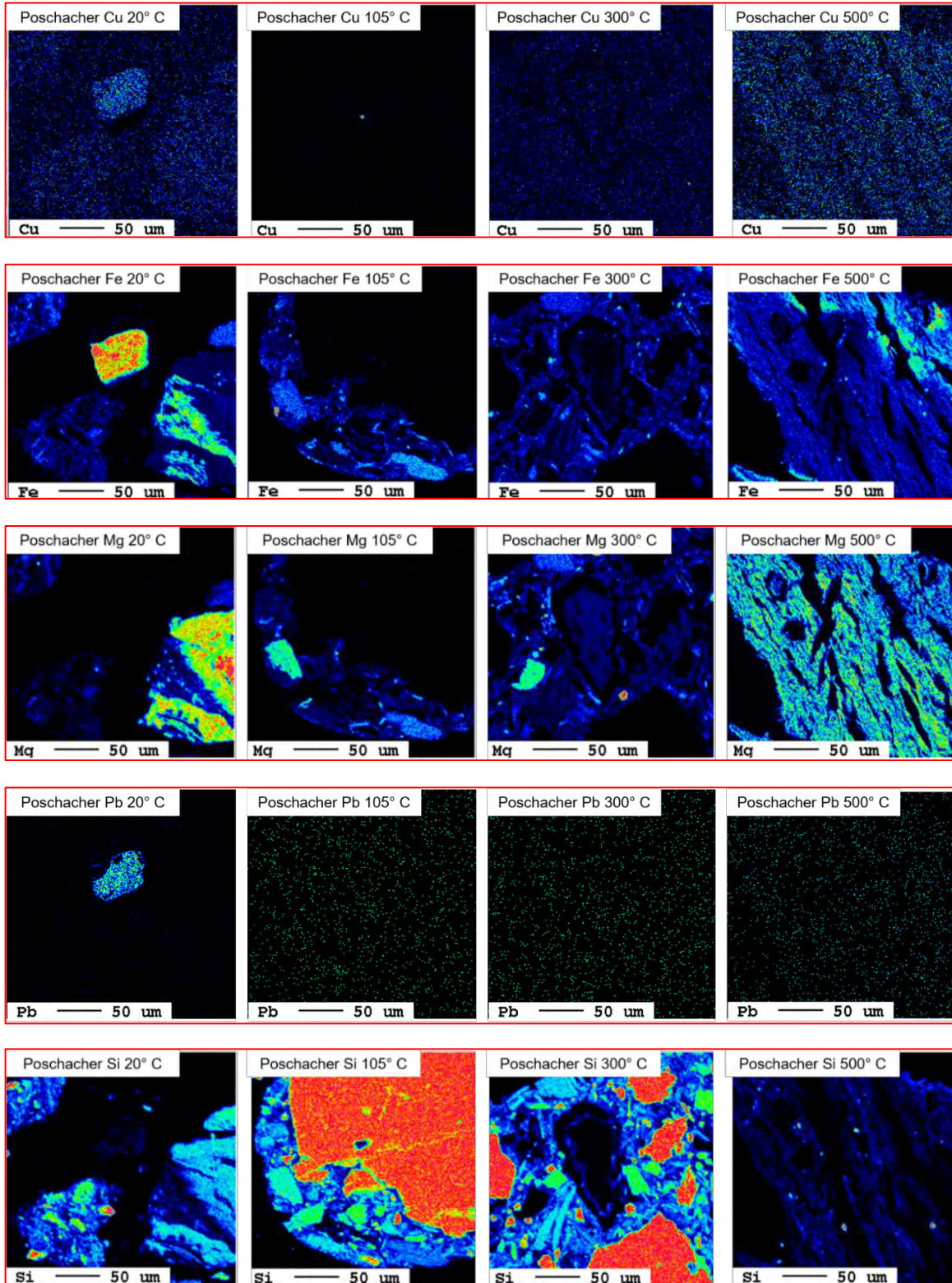
Mikrosondenergebnisse Poschacher

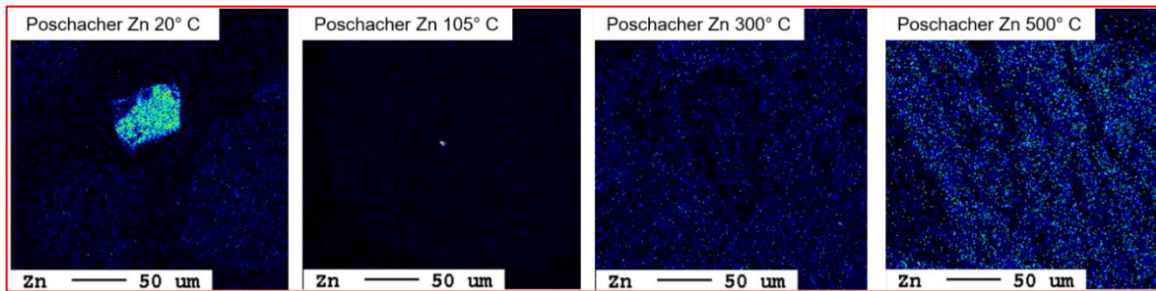
Die Mikrosondenuntersuchung der Probe Poschacher, in Abbildung 294 dargestellt, weist kaum Schwermetallkonzentration auf. Die Aufnahmen wurden teilweise wiederholt, um Bereiche mit erhöhten Konzentrationen zu finden. Aufgrund der nur exemplarischen Untersuchung können diese Ergebnisse nicht verallgemeinert werden. In der 20 °C-Probe tritt ein unregelmäßiger Pb-Bereich auf. Im Gegensatz zum Probematerial von den anderen Standorten kann bei der Probe Poschacher eine Korrelation mit den Elementen Zn, O, Cu, As, S und Fe festgestellt werden. Die großen Fe- und O-Bereiche lassen vermuten, dass die Schwermetalle adsorbiert an Eisenhydroxiden vorliegen. Die Elementarverteilungskarte von Ba weist erhöhte Bereiche auf. Die thermische Behandlung des Probematerials mit 105 °C führt zu einem Si- und O-Bereich, welcher als Quarz identifiziert wird. In diesem Quarzkorn sind Zn und Cu eingelagert. Bei der 300 °C-Probe liegt ein kleines Ba-Korn mit Korrelation mit S vor, welches von Al und Si umgeben wird. Der Zusammenhang von Ba mit S konnte ebenso bei der 500 °C-Probe festgestellt werden. Dabei kann es sich um Bariumsulfat handeln (Kern 2021).

Abbildung 294 Elementarverteilungskarten Poschacher C, O, P, S, Al, Ba, Ca, Fe, Mg, Mn, Pb, Si, Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis - grün – gelb – orange – rot – pink – weiß)









5.5.6 Diskussion der Ergebnisse der pH-abhängigen Eluatkonzentrationen, der Modellierungen in LeachXS™ und der Mikrosondenuntersuchungen

Die Diskussion der Ergebnisse zur Mobilität von Schwermetallen (einschließlich Barium) in den von den 5 Standorten entnommenen Proben konzentriert sich auf die als Hauptkontaminanten anzusehenden Elemente As, Ba, Cd, Cr, Cu, Pb und Zn.

Arsen

Die Altlast K29 weist erhöhte Arsenwerte auf. Die Eluatkonzentrationen (Abbildung 236) zeigen keinen pH-abhängigen Trend. Die schwankenden Konzentrationen werden auf eine Inhomogenität der Proben zurückgeführt. Auch das Modell in Abbildung 238 liefert kein plausibles Ergebnis. Es kann dennoch von Adsorptions- sowie Lösungsprozessen ausgegangen werden, die einen Einfluss auf die Bindung des Elementes haben. In den Elementarverteilungskarten der Mikrosondenuntersuchung (Abbildung 248) ist Arsen ungleich und diffus verteilt. Dieses Ergebnis wird vermutlich durch die Zufälligkeit der Stichproben verursacht. Der Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Mobilität von Arsen ist am deutlichsten bei den Eluaten der 500 °C-Probe zu erkennen. Hier liegen die Eluatkonzentrationen bei pH > 8 unterhalb der Nachweisgrenze und sind damit um bis zu zwei Größenordnungen geringer als die Eluatkonzentrationen der übrigen Proben.

Barium

Die Bariumkonzentrationen der Probe Poschacher aus Abbildung 283 zeigen keinen eindeutigen Trend als Funktion des pH-Wertes. In den Modellen aus Abbildung 285 werden vom Programm ausschließlich Adsorptionsprozesse für das Lösungsverhalten von Barium vorgeschlagen. Im alkalischen Milieu (pH > 9) nimmt die Mobilisierbarkeit von Barium mit steigender Behandlungstemperatur des Probematerials ab.

Cadmium

Die Untersuchungen zur Mobilisierbarkeit von Cadmium wurden am Probematerial der Altlast ST30 durchgeführt. Die Verläufe der Eluatkonzentrationen (Abbildung 260) deuten auf eine Gemeinsamkeit mit den Elementen Cu, Pb und Zn hin. Eine hohe Mobilität ist im sauren Bereich gegeben. Im neutralen Bereich hingegen dominiert die Immobilisierung. Anschließend wird im alkalischen Milieu ein Anstieg der Auslaugbarkeit verzeichnet. Der Abgleich mit den Modellen aus Abbildung 263 weist bei 500 °C auf einen Hydroxidteil hin, welche für eine geringe Mobilität verantwortlich ist. Wie auch bei den Elementen Cu, Pb und Zn spielt die Adsorption eine wichtige Rolle in Bezug auf die Auslaugbarkeit von Cadmium. Unklar bleiben jedoch noch die genauen ausschlaggebenden Mechanismen. Ein signifikanter Einfluss der Behandlungstemperatur des Probematerials auf die Auslaugbarkeit von Cadmium ist bei der 300 °C- und der 500 °C-Probe erkennbar. Bei pH > 7.5 liegen die Eluatkonzentrationen unter der Nachweisgrenze und sind damit deutlich geringer als die Eluatkonzentrationen der übrigen Proben.

Chrom

Bei der Analyse der Chromkonzentrationen der ST30 (Abbildung 260) zeigt sich ein gegensätzlicher Verlauf im Vergleich zu den Elementen Cu, Pb und Zn. Der Unterschied wird dabei auf die vorliegende Form des Cr-Ions zurückgeführt. Chrom tritt als Anion in wässriger Lösung auf, wohingegen andere Hauptkontaminationen der Altlasten als Kationen festgestellt werden.

Bei Behandlungstemperaturen von 300 °C und von 500 °C ist die Auslaugbarkeit von Chrom, unabhängig vom pH-Wert, deutlich erhöht. In Böden liegt Chrom als ubiquitäres Element vor. Abhängig vom pH-Wert und den Redoxbedingungen tritt es als Cr^{3+} , $\text{Cr}(\text{OH})_3$ oder auch als $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ auf. Chrom(III) ist in wässrigen Lösungen relativ reaktionsträge und wird stark an Eisenhydroxide adsorbiert (Hippler aus Kamen 2001). Chrom(VI)-Komplexe werden als hoch toxische Verbindungen eingestuft. Burton et al. (2019) untersuchten in ihrer Studie das Verhalten von Chrom(III) bei der Erwärmung von Böden. Bereits ein mäßiger Temperaturanstieg auf 200 °C bis 400 °C führte zu einer Oxidation von 40 % des ursprünglichen Chrom(III) zu einer Chrom(VI)-Bildung. Ein großer Teil von Chrom(VI) lag demnach in einer leicht mobilen Form vor (Burton et al. 2019).

Die Modelle aus Abbildung 264 bestätigen die in der Studie von Hippler aus Kamen (2001) erwähnte Adsorption von Chrom an Eisenhydroxide. Durch die Erhöhung der Temperatur wird eine größere Menge an Chrom mobilisiert. Dabei ist zusätzlich von der Bildung des toxischen Chrom(VI) auszugehen. Eine thermische Behandlung wirkt sich also negativ auf die Mobilität von Chrom in Böden aus.

Kupfer

Die Kupferkonzentrationen der 20 °C-, der 300 °C- und der 500°C-Probe in den Eluaten aus dem Probematerial der Altlast N82 (Abbildung 249) liegen bis pH 7 in etwa auf dem gleichen Niveau, wo sie ein Minimum erreichen. Im alkalischen Milieu steigen die Eluatkonzentrationen von Kupfer wieder an.

Die Modelle aus der Abbildung 253 bestätigen das amphotere Verhalten von Kupfer in Lösungen. Im alkalischen Bereich zeigt sich, dass die Oxidbildung von z.B. Tenorit der Grund für die geringeren Eluatkonzentrationen bei steigender Temperatur ist.

In den Elementarverteilungskarten in Abbildung 259 ist zu erkennen, dass ein Zusammenhang von Kupfer und Sauerstoff besteht. Bei der 105 °C-Probe ist ein CuO-Korn erkennbar, welches an den Korngrenzen Eisenkonzentrationen aufweist. Durch diese Korrelation kann die Adsorption an Eisenhydroxid nachvollzogen werden. Durch die Mikrosondenergebnisse lassen sich die im Modell vorgeschlagenen Kupferoxidphasen bestätigen. Mögliche Kupferoxidbildung aufgrund steigender Behandlungstemperatur lässt sich jedoch anhand der Elementarverteilungskarten nicht nachweisen. Bei pH > 9 ist der Einfluss der thermischen Behandlung auf die Auslaugbarkeit von Kupfer gut zu erkennen, die von der 20 °C-Probe zur 500 °C-Probe um bis zu drei Größenordnungen abnimmt.

Blei

Der Verlauf der pH-abhängigen Eluatkonzentration von Blei der Probe K29 aus Abbildung 236 liefert den allgemeinen Trend für dieses Element. Die erhöhte Löslichkeit von Blei im sauren Bereich wird durch Oberflächenkomplexbildungsmodelle beschrieben. Im Wasser suspendierte Metalloxide adsorbieren Ionen aus der umgebenden Wasserphase. Die Oberfläche der Metalloxide reagiert dabei amphoter mit H^+ und OH^- . Blei liegt in Lösung als zweiwertiges Kation (Pb^{2+}) vor. Im sauren pH-Bereich ist die Oberfläche des Eisenhydroxids aufgrund der H^+ Ionen positiv geladen und führt somit zu keiner weiteren Kationenbindung. Blei bleibt somit in Lösung (Müller 1989). Durch die Modelle in LeachXS™ wird das amphotere Verhalten bestätigt. Die Modellierung der Probe K29 aus Abbildung 245 zeigt ebenso die erhöhte Löslichkeit im sauren Bereich sowie die zunehmende Immobilisierung mit steigendem pH-Wert. Die Phasen der Modelle ergeben, dass sowohl Adsorptions- als auch Löslichkeitsprozesse die Bindungsform von Blei steuern. In den Bleimodellen der Altlast ST32 (Abbildung 279) und der Altlast N82 (Abbildung 256) bilden sich durch die thermische Behandlung ab 300 °C im sauren Bereich Cl-Pyromorphit und im alkalischen Bereich Plattnerit. Daraus kann gefolgert werden, dass bei niedrigen pH-Werten die Bindung von Blei durch Phosphate bestimmt ist. Im alkalischen Milieu ist die Bildung von Oxiden für die Immobilisierung verantwortlich. Der Einfluss der

Behandlungstemperatur des Probematerials auf die Eluatkonzentrationen ist in zwei Bereichen gut zu erkennen. Bei pH 4 bis pH 6,5 geht die Auslaugbarkeit von Blei mit abnehmender Behandlungstemperatur zurück. Im pH-Bereich > 8 ist dagegen eine Zunahme der Eluatkonzentrationen mit abnehmender Behandlungstemperatur festzustellen.

Zink

Die Altlasten N82 und ST32 weisen Zinkkontaminationen auf. Die pH-abhängigen Eluatkonzentrationen aus den Abbildungen 249 und 272 zeigen ähnlich wie bei Blei und Kupfer eine erhöhte Mobilität im sauren Bereich und anschließender Immobilisierung im neutralen Milieu. Im alkalischen Bereich ergibt sich eine Abnahme der Mobilität mit zunehmender Behandlungstemperatur. Bei der 20 °C-Probe ist die Freisetzung von Zink im alkalischen Milieu am höchsten. Die pH-abhängigen Eluatkonzentrationen aus den Proben, die mit 300 °C und 500 °C behandelt wurden, lassen sich mit den Phasen Zincit und Ca-Zincat nicht ausreichend beschreiben. Für die Modellierung im alkalischen Bereich fehlen in der Datenbank zusätzliche Mineralien der Gruppe der geschichteten Doppelhydroxide, welche eine geringere Löslichkeit als Zincit und Zincat aufweisen. Der Einfluss der thermischen Behandlung auf die Auslaugbarkeit von Zink zeigt sich deutlich bei pH > 8. Hier liegen die Eluatkonzentrationen der 300 °C- und der 500 °C-Proben um bis zu drei Größenordnungen unter denen der 20 °C- und 105 °C-Proben.

6 Dissemination

6.1 Dissemination

Im Rahmen dieser Arbeitspakets wurden Fachtagungen im Hinblick auf ihre Ausrichtung und ihre Zielgruppe durchleuchtet, um potenzielle Plattformen für die Dissemination der Projektergebnisse zu eruieren. Dabei wurde der DCONex-Kongress 2022, der vom 19. bis 20.01.2022 in Essen/Deutschland stattgefunden hat, als geeignete Tagung identifiziert. Nach Kontaktaufnahme mit den Veranstaltern konnte ein Vortrag mit dem Titel „Auswirkungen der thermischen Bodenbehandlung auf die Mobilität von Schwermetallen“ platziert werden. Damit wurde der erste Teil des Meilensteins 6.1.1 („Tagungsbeitrag eingereicht“) erfüllt.

Endveranstaltung

Die Endveranstaltung des Projekts wurde im Rahmen der 16. Recy & DepoTech Konferenz von 9. bis 11.11.2022 in Leoben an der MUL abgehalten. Dabei wurde ein Fachvortrag mit dem Titel „InnoBLA I: Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit“ gehalten. Zudem wurden in der Posterausstellung zwei weitere Inhalte („InnoBLA II: New design of a planning tool for heating soils using electrically heated heat sources“ und „InnoBLA III: Auswirkungen der thermischen Bodenbehandlung auf die Mobilität von Schwermetallen und die Korrosion von Heizanlagen“) präsentiert.

7 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt "Innovationen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung – InnoBLA" adressierte die folgenden technisch-wissenschaftliche Fragestellungen:

Technische Ebene:

- Untersuchungen zum Wärmeübergang zwischen Heizlanze und Bodenkörper;
- Optimierung des Heizlanzenmaterials;
- Entwicklung von Algorithmen für ein Planungstool zum Wärme- und Stofftransport für die Optimierung des Layouts (Anzahl der Heizlanzen) bei der thermischen Sanierung von gesättigter und ungesättigter Bodenzone;
- Entwicklung und Test von drei neuartige Heizlanzentypen:
 - segmentierte Aufheizung des Bodenkörpers mit unterschiedlichen Temperaturen,
 - Lanzenkombination Wärme/Luftinjektion,
 - Lanze für den Schrägeinbau;
- Untersuchung der Mobilität von Schwermetallen vor und nach einer thermischen Behandlung von Böden.

Planerische Ebene:

- Neukonzeption eines Planungstools für TCH-Sanierungen

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden die folgenden Ergebnisse erhalten:

Materialstudien – Modellierung des Umfelds der Heizlanzen

Zur Modellierung der Prozesse bei der Erwärmung des Bodenkörpers im direkten Umfeld der Heizlanzen wurden zwei unterschiedliche numerische Modelle verwendet.

Modell 1

Das erste Modell, ein Mehrphasenmodell, bildet alle relevanten physikalischen und chemischen Vorgänge ab, um ein detailliertes Prozessverständnis zu erhalten und basiert auf der Open-Source-Software OpenFOAM 2.4. Die für die Modellierung erforderlichen Materialdaten (Bodenzusammensetzung, Dichte, Durchströmbarkeit, Wärmeleitfähigkeit, Pyrolysekinetik) wurden aus Laboruntersuchen an einem nicht kontaminierten Erdreich erhalten. Zur Validierung der Modellierungsergebnisse wurde in einer Laborversuchsanlage eine Heizlanze in einen Bodenkörper eingebaut. Die Überwachung des Aufheizprozesses erfolgte durch Temperatursensoren, die in unterschiedlichem Abstand zu Heizlanze im Bodenkörper installiert waren.

Es konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse der Modellierung zur Temperaturverteilung, Pyrolyse und thermischen Reichweite in guter Übereinstimmung mit den Versuchsdaten sind.

Modell 2

Basierend auf den im Modell 1 verwendeten Berechnungsansätzen wurde für das neu konzipierte Planungstool ein vereinfachtes Modell, das Modell 2, entwickelt, das von wesentlichen Vereinfachungen ausgeht und zur Auslegung und zur besseren Abschätzung der Betriebsdauer von Sanierungsvorhaben verwendet werden soll. Die Überprüfung der vereinfachten Ansätze erfolgte anhand der im Laborversuch ermittelten Temperaturverteilungen bei Aufheizen des Bodenkörpers auf 900 °C. Die Größenordnung der errechneten Verläufe und das qualitative Verhalten der Trocknung zeigten eine gute Übereinstimmung im Verhältnis zu dem getroffenen vereinfachten Ansatz.

Materialstudien – Optimierung des Lanzenmaterials

Die Untersuchungen an einem Hüllrohr, das bei einer thermischen Sanierung einer Altlast eingesetzt wurde, zeigten, dass die Anwendungstemperatur von 650 °C zur Sensibilisierung (Ausscheidung von chromreichen Karbiden an den Korngrenzen) des Werkstoffes über die gesamte Wandstärke führt. Als Ursache wurde ein elektrolytischer Angriff (interkristalline Korrosion) identifiziert und nicht, wie zu Beginn des Projektes vermutet, eine Korrosion aufgrund der Verzunderung (Hochtemperaturkorrosion). Die durch Einwirkung eines Elektrolyten hervorgerufene interkristalline Korrosion erreicht eine Tiefe von bis über 500 µm.

Durch Auslagerungsversuche wurde für 15 Werkstoffe, die zur Fertigung von Hüllrohren verwendet werden können, der Massenabtrag in Gramm je Quadratzentimeter und Stunde bestimmt. Im Ergebnis wurde ein Ranking für die untersuchten Werkstoffe erhalten, von denen sich drei als besonders geeignet für die Verwendung als Hüllrohr bei der thermischen Sanierung zeigten.

Materialstudien – Verbesserung des Wärmeübergangs

Aus den Laborversuchen wurde ersichtlich, dass die grundlegende Limitation des konduktiven Wärmetransportes im Boden dessen Austrocknung in Nahbereich der Lanze ist. Das bedeutet, dass die Erwärmung umso langsamer wird, je grösser der Anteil luftgefüllter Poren wird, d.h., je mehr Wasser aus dem Porenraum verdunstet. Der Bodenkörper lässt sich also konduktiv nicht schneller erwärmen, da der ausgetrocknete Nahbereich um die Lanze den Wärmetransport begrenzt. Die Einbringung einer Schicht mit hoher Wärmeleitfähigkeit zur Verbesserung der Konduktion würde das Problem nur örtlich verlagern. Die Laborversuche haben gezeigt, dass die gezielte Luftzuführung (erzwungene Konvektion) daher der vielversprechendste Weg zur Lösung dieses Problems ist. Dies wurde auch durch die Simulation der Luftinjektion bei gleichzeitiger Aufheizung des Bodenkörpers mit Heizlanzen bestätigt.

Neukonzeption eines Planungstools

Für die Dimensionierung der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung wurde ein Planungstool konzeptioniert, das aus dem in InnoBLA entwickelten vereinfachten Wärmetransportmodell zur Berechnung der optimalen Heizlanzenabstände und der Positionierung der Bodenluftabsaugbrunnen sowie aus einem Schadstofftransportmodell zur Beschreibung des temperaturabhängigen Austrags von Schadstoffen besteht. Die Validierung des vereinfachten Wärmetransportmodells erfolgte mit den Daten aus den Laborversuchen.

Das Planungstool ermittelt unter Berücksichtigung eines vorzugebenen Sanierungsziels und einer maximalen Sanierungsdauer das erforderliche Layout für die Installation der BLA-Komponenten. Alle benötigten Boden- und Schadstoffparameter sind in Datenbanken abgelegt bzw. werden durch in das Planungstool implementierte Algorithmen berechnet.

Die Dateneingabe erfolgt über eine benutzerfreundliche grafische Oberfläche. Das Planungstool wird als Online-Anwendung ausgeführt und wurde über eine ASP.NET (Active Server Pages .NET) Oberfläche programmiert. Die Ergebnisdarstellung umfasst Grafiken und Tabellen, mit denen der simulierte Verlauf einer thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung dokumentiert werden kann.

Lanzenentwicklung

Versuchslanze zur segmentierten Bodenaufheizung

Zur Schadstoffentfernung durch Aufheizung eines Bodenkörpers können, in Abhängigkeit des Boden- und Schadstofftyps, unterschiedliche Zieltemperaturen erforderlich sein. Herkömmliche Heizlanzen werden nur mit einer Temperatur betrieben, die sich dann an der höchsten zu erreichenden Zieltemperatur orientiert. Ein wirtschaftlicheres Heizregime wird möglich, wenn eine installierte Heizlanze mit voneinander unabhängig zu steuernden Heizsegmenten ausgestattet ist. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden drei Heizlanzen in Standardausführung, allerdings mit einer Heizflächenlänge von je 2.50 m, miteinander verbunden, aber getrennt verkabelt, so dass jedes der drei Segmente getrennt voneinander durch das Panel zur Energieversorgung angesteuert werden konnte.

Versuchslanze zur Kombination von TCH mit gleichzeitiger Luftinjektion

In den Laborversuchen wurde ermittelt, dass der limitierende Faktor beim Wärmeübergang von der Heizlanzenoberfläche auf den Bodenkörper die sich im Verlauf des Aufheizprozesses um die Heizlanze herum ausbildende Trockenschicht ist. Eine wirksame Möglichkeit, diese Limitation zu überwinden, ist die Erzwingung eines konvektiven Wärmestroms durch die Injektion von Luft während des Heizprozesses. Dazu wurde ein Standardhüllrohr, in das die Heizelemente eingelassen werden, durch Aufbringung von Luftauslässen auf der Hüllrohroberfläche in drei verschiedenen Höhen modifiziert. Die Luftzufuhr erfolgt mittels eines Kompressors über Injektionsrohre, die ebenfalls auf der Hüllrohroberfläche angebracht sind, so dass die zu injizierende Luft bereits vorgewärmt die Luftauslässe erreicht.

Versuchslanze für den Schrägverbau

Standardheizlanzen sind nur für den vertikalen Einbau in den Bodenkörper geeignet. Dies setzt voraus, dass die für den Einbau vorgesehen Bereiche frei zugänglich sind und dass, abhängig von der Länge der Heizlanze, mindestens drei Meter Montagehöhe verfügbar sind. Dies ist bei bestehenden Gebäuden, die sich über einem kontaminierten Bereich befinden, häufig nicht gegeben. Eine Option, um dennoch Heizlanzen zu installieren, ist deren Schrägverbau von außerhalb des Gebäudes, so dass sich die Heizfläche dann unterhalb des Gebäudes im zu sanierenden Bereich befindet.

Beim Schrägverbau von Heizlanzen ist die Anordnung der Keramikkörper, mit denen der Abstand der Heizdrähte in den Heizelementen zueinander und zur Wandung des Hüllrohres sichergestellt wird, nicht geeignet. Diese Anordnung musste modifiziert werden, um der geänderten Druckbelastung der Keramiken auf das Hüllrohr und dem geänderten Ausdehnungsverhalten der Heizdrähte, die aus dem Schrägverbau resultieren, entsprechend zu berücksichtigen.

Feldversuche

Heizlanze mit segmentierter Aufheizung

Im Feldversuch konnte gezeigt werden, dass die Heizlansensegmente separat angesteuert und somit unabhängig voneinander betrieben werden konnten. Somit ist dieser Heizlantyp dazu geeignet, abhängig von Bodenbeschaffenheit und Schadstofftyp, bei thermischen Sanierungen unterschiedliche Zieltemperaturen an einem Installationspunkt zu realisieren.

Heizlanze mit Luftinjektion

Die Aufheizphase wurde durch die Injektion vorgewärmter Frischluft deutlich verkürzt. Im Vergleich zur Referenzlanze wurde in 0.66 m Entfernung der Temperaturbereich von 80°C bereits nach 7 Tagen und damit 21 Tage früher erreicht. Beim Betrieb der Heizlanze mit Luftinjektion wurden im Testbetrieb immer höhere mittleren Temperaturen über alle Tiefenhorizonte zu vergleichbaren Zeitpunkten und Entfernungen zur Heizlanze ermittelt als die für die Referenzlanze

Heizlanze im Schrägverbau

Die schräg eingebaute Heizlanze führte zu einer mit der vertikal verbauten Standardheizlanze vergleichbaren Temperaturentwicklung im Bereich direkt oberhalb des Heizzone. Auch lateral zur Heizlanze versetzt wurden deutliche Temperaturzunahmen erreicht, so dass mit dem diesem Lantyp die Aufheizung des angenommenen kontaminierten Bereichs unterhalb eines bestehenden Gebäudes möglich ist.

Modellierung des Feldversuchs mit Luftinjektion

Die Modellierung des Feldversuchs, bei dem eine Heizlanze mit gleichzeitiger Luftinjektion zur Ausheizung des Bodenkörpers verwendet wurde, bestätigt die erzielten Ergebnisse. Die starke getrocknete Schicht des Bodens, die eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt, führt zu einer starken Behinderung der Wärmeleitung. Dies trifft jedoch nicht auf die durch Luftinjektion hervorgerufene Konvektion zu. Durch den konvektiven Wärmetransport bilden sich große warme Bereiche um die Injektionspunkte aus. Nach 10 Tagen dominiert die Konvektion.

Monitoring der Schwermetallmobilität bei der TCH

Der Einfluss der thermischen Behandlung auf die Mobilität der Schwermetalle As, Cd, Cr, Cu, Pb und Zn sowie auf Ba, die als Hauptkontaminanten in den untersuchten Standortproben anzusehen sind, lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Arsen

Ein Einfluss der Behandlungstemperatur auf die Mobilisierbarkeit von Arsen ist bei $\text{pH} > 8$ zu erkennen. Während die Konzentrationen der 20 °C-, der 105 °C- und der 300 °C-Probe in diesem pH-Bereich auf gleichem Niveau liegen, sind die As-Konzentrationen der 500 °C-Eluate um bis zu zwei Größenordnungen verringert.

Barium

Im alkalischen Milieu ($\text{pH} > 9$) nimmt die Mobilisierbarkeit von Barium mit steigender Behandlungstemperatur des Probematerials ab.

Cadmium

Ein signifikanter Einfluss der Behandlungstemperatur des Probematerials auf die Auslaugbarkeit von Cadmium ist bei der 300 °C- und der 500 °C-Probe erkennbar. Bei $\text{pH} > 7.5$ liegen die Eluatkonzentrationen unter der Nachweisgrenze und sind damit deutlich geringer als die Eluatkonzentrationen der 20 °C- und der 105 °C- Probe.

Chrom

Mit steigender Behandlungstemperatur erhöht sich die Mobilisierung von Chrom. Dabei ist zusätzlich von der Bildung des toxischen Chrom(VI) auszugehen. Eine thermische Behandlung wirkt sich negativ auf die Mobilität von Chrom in Böden aus.

Kupfer

Im Bereich $\text{pH} > 9$ ist der Einfluss der thermischen Behandlung auf die Auslaugbarkeit von Kupfer gut zu erkennen. Hier nehmen die Eluatkonzentrationen von Kupfer von der 20 °C-Probe zur 500 °C-Probe um bis zu drei Größenordnungen ab.

Blei

Der Einfluss der Behandlungstemperatur des Probematerials auf die Eluatkonzentrationen ist signifikant in zwei Bereichen zu erkennen. Bei pH 4 bis pH 6,5 geht die Auslaugbarkeit von Blei mit abnehmender Behandlungstemperatur zurück. Im pH-Bereich > 8 ist dagegen eine Zunahme der Eluatkonzentrationen mit abnehmender Behandlungstemperatur festzustellen.

Zink

Der Einfluss der thermischen Behandlung auf die Auslaugbarkeit von Zink zeigt sich deutlich bei $\text{pH} > 8$. Hier liegen die Eluatkonzentrationen der 300 °C- und der 500 °C-Proben um bis zu drei Größenordnungen unter denen der 20 °C- und 105 °C-Proben.

8 Executive Summary

The research project "Innovationen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung – InnoBLA" (Innovations for the Thermal Enhanced Soil-Vapor Extraction) addressed the following technical-scientific issues:

On the technical level:

- Investigations of the heat transfer between heater and the adjacent soil;
- Optimization of the material used for the heater casing;
- Development of heat and mass transfer algorithms for a planning tool to optimize the layout (number of heaters) in the thermal remediation of the saturated and unsaturated soil zone;
- Development and testing of 3 novel types of heaters:
 - Segmented heating of the soil body with different temperatures,
 - Heaters allowing simultaneously the injection of air,
 - Heaters for the inclined installation
- Investigation of the mobility of heavy metals before and after thermal treatment of soils.

On the planning level:

- Development of a TCH planning tool based on a novel concept.

The following results were obtained as part of the research work:

Material Studies - Modeling of the Area Surrounding the Heaters

Two different numerical models were used to model the processes involved in heating the soil body in the immediate vicinity of the heaters:

Model 1

The first model, a multiphase model, depicts all relevant physical and chemical processes obtaining a profound understanding of the contributing processes, and is based on the open-source software OpenFOAM 2.4. The material data required for the modeling (soil composition, density, permeability, thermal conductivity, pyrolysis kinetics) were obtained from laboratory tests on uncontaminated soils. To validate the modeling results, a heater was installed in a soil body in a pilot plant. The heating process was monitored by temperature sensors installed in the soil body at different distances from the heater.

Model 2

Based on the calculation approaches used in Model 1, a simplified model, Model 2, was developed for the newly designed planning tool, which is based on significant simplifications and is to be used for the design and better estimation of the operating time of thermal remediation projects. The simplified approaches were checked using the temperature distributions determined in the pilot tests when the soil body was heated to 900 °C. The magnitude of the calculated curves and the qualitative behavior of the drying showed a good agreement in relation to the simplified approach taken.

Material Studies - Optimization of the Heater Material

The investigations on a casing used in the thermal remediation of a contaminated site showed that the application temperature of 650 °C leads to sensitization (precipitation of chromium-rich carbides at the grain boundaries) of the material over the entire wall thickness. The cause was identified as electrolytic attack (intercrystalline corrosion) and not, as assumed at the beginning of the project, corrosion due to scaling (high-temperature corrosion). Intergranular corrosion caused by the action of an electrolyte reaches a depth of over 500 µm. Aging tests were used to determine the mass erosion in grams per square centimeter and hour for 15 materials that can be used to manufacture

casings. As a result, a ranking was obtained for the examined materials, three of which proved to be particularly suitable for use as casing in thermal remediation.

Material Studies - Improving the Heat Transfer

The pilot tests showed that the fundamental limitation of conductive heat transfer in the soil is its drying out in the vicinity of the heater. This means that the greater the proportion of air-filled pores, the slower the heating, i.e. the more water evaporates from the pore space. The soil body can therefore not be heated faster by conduction, as the dried-out area around the lance limits the heat transfer. The introduction of a layer with high thermal conductivity to improve conduction would only shift the problem locally. The pilot tests have shown that targeted air feed (forced convection) is therefore the most promising way to solve this problem. This was also confirmed by the simulation of air injection with simultaneous heating of the soil body by heaters.

Novel Concept for a Planning Tool

For the dimensioning of thermally enhanced soil vapor extraction, a planning tool was designed consisting of the simplified heat transport model developed in InnoBLA for calculating the optimum distances between heaters and the positioning of the soil vapor extraction wells as well as a contaminant transport model for describing the temperature-dependent percolation of contaminants. The simplified heat transport model was validated using the data from the pilot tests.

The planning tool determines the required layout for the installation of the BLA components, considering a predefined remediation target and a maximum remediation duration. All required soil and contaminant parameters are stored in databases or are calculated using algorithms implemented in the planning tool.

Data is entered by a user-friendly graphical interface. The planning tool runs as an online application and was programmed by an ASP.NET (Active Server Pages .NET) interface. The presentation of results includes graphics and tables that can be used to document the simulated progress of a thermally assisted soil vapor extraction system.

Development of Heaters

Evaluation Model of a Heater for Segmented Soil Heating

Different target temperatures may be required to remove contaminants by heating a soil body, depending on the type of soil and contaminant. Conventional heaters are only operated at one temperature, which is then based on the highest target temperature to be achieved. A more economical heating regime is possible if an installed heater is equipped with heating segments that can be controlled independently from each other. To achieve this goal, three standard heaters, each with a heating surface length of 2.50 m, were connected to each other but wired separately so that each of the three segments could be controlled separately from each other by the power supply panel.

Evaluation Model of a Heater for Combining TCH with Simultaneous Air Injection

In the pilot tests, it was determined that the limiting factor in heat transfer from the heater's surface to the soil body is the dry layer formed around the heater during the heating process. An effective way of overcoming this limitation is to force a convective heat flow by injecting air during the heating process. For this purpose, a standard casing into which the heating elements are inserted was modified by placing air outlets at three different heights on the surface of the casing. The air is supplied by a compressor by injection pipes, which are also attached to the surface of the casing, so that the air being injected reaches the air outlets already preheated.

Evaluation Model of a Heater for Inclined Installation

Standard heaters are only suitable for vertical installation in the soil body. This requires that the areas intended for installation are freely accessible and that, depending on the length of the heater, at least three meters of installation height is available. This is often not the case in existing buildings that are located above a contaminated area. One option for installing heaters anyhow is to install them at an angle from outside the building, so that the heating surface is then located below the building in the area to be remediated.

When installing heaters at an angle, the arrangement of the ceramic bodies, which ensure the distance between the heating wires in the heating elements and the wall of the casing, is not suitable. This arrangement had to be modified considering the changed pressure

load of the ceramics on the casing and the changed expansion behavior of the heating wires resulting from the inclined installation.

Field Tests

Heater with Segmented Heating

The field test showed that the segments of the heater could be controlled separately and thus operated independently from each other. This type of heater is therefore suitable for carrying out thermal remediations - depending on the soil conditions and type of contaminant - with different target temperatures at one installation point.

Heater with Air Injection

The heating phase was significantly shortened by injecting preheated fresh air. Compared to the reference heater, the temperature range of 80°C was reached at a distance of 0.66 m just after 7 days and therefore 21 days earlier. When operating the heater with air injection, higher average temperatures were always determined across all depth horizons at comparable times and distances from this heater than those for the reference heater.

Heater in Inclined Installation

The heater installed at an angle led to a temperature development in the area directly above the heating zone that was comparable to the vertically installed standard heater. Significant temperature increases were also achieved laterally offset to the heater, so that heating of the assumed contaminated area below an existing building is possible with this type of heater.

Modeling of the Field Test with Air Injection

The modeling of the field test, in which a heater with simultaneous air injection was used to heat the soil body, confirmed the results obtained. The strong dried layer of the soil, which has poor thermal conductivity, led to a strong obstruction of heat conduction. However, this did not apply to the convection caused by air injection. Convective heat transfer caused the formation of large warm areas around the injection points. Convection dominates after 10 days.

Monitoring of the Heavy Metal Mobility during TCH

The influence of thermal treatment on the mobility of the heavy metals As, Cd, Cr, Cu, Pb and Zn as well as on Ba, which are to be regarded as the main contaminants in the investigated site samples, can be summarized as follows:

Arsenic

The influence of the treatment temperature on the mobilizability of arsenic can be seen at $\text{pH} > 8$. While the concentrations of the 20 °C, 105 °C and 300 °C samples are at the same level in this pH range, the arsenic concentrations of the 500 °C eluates are reduced by up to two orders of magnitude.

Barium

In an alkaline environment ($\text{pH} > 9$), the mobilizability of barium decreases with increasing treatment temperature of the sample material.

Cadmium

A significant influence of the treatment temperature of the sample material on the leachability of cadmium can be seen in the 300 °C and 500 °C samples. At $\text{pH} > 7.5$, the eluate concentrations are below the detection limit and therefore significantly lower than the eluate concentrations of the 20 °C and 105 °C samples.

Chromium

The mobilization of chromium increases as the treatment temperature rises. The formation of toxic chromium(VI) must also be assumed. Thermal treatment has a negative effect on the mobility of chromium in soils.

Copper

In the $\text{pH} > 9$ range, the influence of thermal treatment on the leachability of copper is clearly visible. Here, the eluate concentrations of copper decrease by up to three orders of magnitude from the 20 °C sample to the 500 °C sample.

Lead

The influence of the treatment temperature of the sample material on the eluate concentrations can be seen significantly in two ranges. At pH 4 to pH 6.5, the leachability of lead decreases with decreasing treatment temperature. In the pH range > 8 , on the other hand, an increase in eluate concentrations with decreasing treatment temperature can be observed.

Zinc

The influence of thermal treatment on the leachability of zinc is evident at pH > 8 . Here, the eluate concentrations of the 300 °C and 500 °C samples are up to three orders of magnitude lower than those of the 20 °C and 105 °C samples.

9 Finding/Ausblick

Mit dem Forschungsprojekt InnoBLA wurden fünf Fragestellungen auf technischer und eine Fragestellung auf planerischer Ebene bearbeitet. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse zu den einzelnen Fragestellungen in Kurzform zusammengefasst und der sich daraus jeweils ergebene Ausblick auf die Sanierungspraxis dargestellt:

- **Fragestellung 1:** Untersuchungen zum Wärmeübergang zwischen Heizlanze und Bodenkörper.
 - **Ergebnis** (Kap. 2): Der Wärmeübergang zwischen der Heizlanzenoberfläche und dem umgebenen Bodenkörper wird durch die sich ausbildende Trockenschicht während des Aufheizprozesses gehemmt. Das Einbringen von besser wärmeleitenden Materialien in den Zwischenraum zwischen Heizlanze und Bodenkörper verschiebt diese Problemzone nur lokal. Als wesentlich wirksamer wurde das Erzwingen eines konduktiven Wärmestroms durch Injektion von Luft identifiziert. Dieses Prinzip wurde bei der Entwicklung eines neuartigen Heizlantentyps realisiert (s.a. **Fragestellung 4**).
 - **Ausblick:** s. **Fragestellung 4**.
- **Fragestellung 2:** Optimierung des Heizlanzenmaterials zur Unterbindung von Korrosionsprozessen an der Oberfläche der Hüllrohre.
 - **Ergebnis** (Kap. 2): Als maßgeblicher Prozess, der zur Korrosion an der Oberfläche von typischerweise für Heizlanzen verwendete Hüllrohre führt, wurde die interkristalline Korrosion, verursacht durch einen elektrolytischen Angriff, identifiziert. Basierend auf Auslaugversuchen mit verschiedenen Materialien, die zur Fertigung von Hüllrohren verwendet werden, konnte eine Rangliste von geeigneten Werkstoffen erarbeitet werden, die als Maßstab die Abtragsrate des Hüllrohrmaterials unter korrosiven Bedingungen pro Flächen- und Zeiteinheit verwendet.
 - **Ausblick:** Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Korrosion ermöglichen die zielgenaue Auswahl des Hüllrohrmaterials unter Berücksichtigung der Standortbedingen und der Sanierungsdauer. Somit wird dadurch ein Beitrag zur Optimierung der Sanierungskosten geliefert, da insbesondere das Hüllrohrmaterial einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt.

- **Fragestellung 3:** Entwicklung von Algorithmen für ein Planungstool zum Wärme- und Stofftransport für die Optimierung des Layouts (Anzahl der Heizlanzen) bei der thermischen Sanierung von gesättigter und ungesättigter Bodenzone.
 - **Ergebnis** (Kap. 2 und 3): Auf Basis der Ergebnisse aus den Laborversuchen und den Versuchen im Technikumsmaßstab konnte ein detaillierter Modellansatz entwickelt werden, der Strömung, Energieerhaltung, Stoffhaltung, Trocknung und Pyrolyse berücksichtigt. Dieser Modellansatz beschreibt den Aufheizungsprozess im Bodenkörper mit hinreichender Genauigkeit und war damit die Basis für ein vereinfachtes Modell, das im neuentwickelten Planungstool implementiert wurde.
 - **Ausblick:** s. **Fragestellung 6.**
- **Fragestellung 4:** Entwicklung und Test von drei neuartige Heizlanzentypen.
 - **Ergebnis** (Kap. 4): Es wurden die folgenden Heizlanzentypen entwickelt: (i.) Heizlanze zur segmentierten Aufheizung des Bodenkörpers mit unterschiedlichen Temperaturen, (ii.) Heizlanze kombiniert mit Luftinjektion und (iii.) Heizlanze zum Schrägverbau. Mit diesen Heizlanzen wurde in einem Testfeld unter Realbedingungen ein Bodenkörper aufgeheizt. Es zeigte sich, dass (i.) mit einer installierten segmentierten Heizlanze ein unabhängiges Heizregime möglich ist und somit verschiedene Bodenschichten auf unterschiedliche Zieltemperaturen aufgeheizt werden können, (ii.) die gleichzeitige Injektion von Luft beim Aufheizprozess zu einer wesentlichen Verkürzung der Aufheizzeiten bei gleichzeitiger Vergrößerung des thermischen Radius führt und (iii.) mit der Heizlanze im Schrägverbau auch Schadensherde unterhalb bestehender Gebäude thermisch saniert werden können.
 - **Ausblick:** Mit der segmentierten Heizlanze und der Heizlanze, die die simultane Luftinjektion ermöglicht, stehen zwei neue Heizlanzentypen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung zur Verfügung, die aufgrund der erhöhten thermischen Reichweite bzw. des optimierten Heizregimes zu einer deutlich verbesserten Wirtschaftlichkeit dieses Sanierungsverfahrens führen. Der erfolgreiche Feldtest mit der Heizlanze im Schrägverbau hat gezeigt, dass mit diesem Heizlanzentyp auch thermische Sanierungen unter bestehenden Gebäuden durchgeführt werden können, wodurch sich ein weiteres Anwendungsfeld für dieses Sanierungsverfahren eröffnet. Alle drei neu entwickelten Heizlanzentypen können in die Serienfertigung übernommen werden.

- **Fragestellung 5:** Untersuchung der Mobilität von Schwermetallen vor und nach einer thermischen Behandlung von Böden.
 - **Ergebnis** (Kap. 5): Die Schwermetalle Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer, Blei und Zink sowie Barium, die in Bodenproben von kontaminierten Standorten mit unterschiedlichen Temperaturen (20 °C, 105 °C, 300 °C, 500 °C) behandelt wurden zeigen hinsichtlich ihrer Mobilität zum Teil deutliche Veränderungen. Allerdings ist kein einheitlicher Trend feststellbar. Abhängig von der Behandlungstemperatur und des chemischen Milieus tritt bei einigen Schwermetallen eine deutliche Reduzierung der Mobilität mit steigender Behandlungstemperatur auf (z.B. Zn im alkalischen Bereich), während diese bspw. bei Chrom zunimmt.
 - **Ausblick:** Die Untersuchungen zur Mobilität von Schwermetallen haben deutliche Hinweise auf den Einfluss der Behandlungstemperatur gegeben. Für Schadensfälle, bei denen neben organischen Verbindungen (der eigentlichen Zielgruppe für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung) auch Schwermetalle vorliegen, ist eine Ermittlung des Gefährdungspotentials, bedingt durch die Änderung der Mobilisierbarkeit unter Berücksichtigung der Zieltemperatur bei einer thermischen Sanierung, angezeigt.
- **Fragestellung 6:** Neukonzeption eines Planungstools für TCH-Sanierungen.
 - **Ergebnis** (Kap. 3): Basierend auf dem Detailmodell zur Beschreibung der relevanten Prozesse, die bei der Aufheizung des Bodenkörpers auftreten, wurde durch Vereinfachungen der Berechnungsansätze ein benutzerfreundliches Planungstool entwickelt, mit dem Layouts für eine thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung berechnet werden können. Diese Layouts umfassen alle zu installierenden Komponenten (Heizlanzen, Absaugbrunnen für die Bodenluft, Heizlanzen mit Luftinjektion) und werden mit der Zielstellung dimensioniert, eine wirtschaftlich-technisch optimale Sanierung zu gewährleisten. Dabei steht die Abschätzung von geeigneten Lanzenabständen im Vordergrund, bei welchen der zur Sanierung eines belasteten Bodenkörpers erforderliche Schadstoffaustrag mit geringstem wirtschaftlichem Aufwand erreicht wird.
 - **Ausblick:** Mit dem neuen Planungstool steht ein Werkzeug zur Verfügung, das insbesondere im Rahmen von Sanierungsuntersuchen für die üblicherweise geforderten Variantenstudien eingesetzt werden kann. Durch den im Planungstool implementierten Optimierungsalgorithmus können standortspezifisch unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen an den Sanierungserfolg (i.d.R. Sanierungszielwert, Masse an ausgetragenen Schadstoff, Sanierungszeit) die technisch wirksamsten und wirtschaftlich günstigsten Layouts entwickelt werden.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Ermittelte grundlegende Materialparameter	11
Tabelle 2 Daten der Versuche für die Messung der Durchströmbarkeit	12
Tabelle 3 Daten für die Wärmeleitung	20
Tabelle 4 Makroskopische Bildaufnahmen der 7 Rohrabschnitte	80
Tabelle 5 Stereomikroskopie der Außen- und Innenseite der Rohrabschnitte	81
Tabelle 6 Lichtmikroskopie der Außen- und Innenseite der Rohrabschnitte	84
Tabelle 7 Elementanalyse in Massen-%; Rohrabschnitt 3, Innen	88
Tabelle 8 Elementanalyse in Massen-%; Rohrabschnitt 3, außen	89
Tabelle 9 Elementanalyse in Massen-%; Rohrabschnitt 6, außen	90
Tabelle 10 RFA Massen-% (Spezies) an den Rohrabschnittsoberflächen 2, 3, 5, 6 und 7	91
Tabelle 11 Reihung von Materialqualitäten nach ihrer interkristallinen Korrosionsbeständigkeit	94
Tabelle 12 Gemittelte Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und Qualität der Messung	131
Tabelle 13 Errechnete Gemischsiedetemperaturen bei 1 bar	177
Tabelle 14 Heizlantentypen und durchgeführte Versuche	186
Tabelle 15 Abstände zwischen Monitoringbrunnen und Heizlantzen.....	194
Tabelle 16 Tiefenhorizontierung der PT-100 Sensoren	195
Tabelle 17 Definition der „Plan A“- , „Plan B“- , „Plan-C“- und „Plan D“-Altlasten.	225
Tabelle 18 Altlastenrecherche 1 – Altablagerungen mit organischer und anorganischer Kontamination.....	227
Tabelle 19 Altlastenrecherche 2 – Altstandorte mit organischer und anorganischer Kontamination.....	231
Tabelle 20 Altlastenrecherche 3 – Altablagerungen mit anorganischer Kontamination ...	232
Tabelle 21 Altlastenrecherche 4 – Altstandorte mit anorganischer Kontamination	233
Tabelle 22 Gesamtgehaltuntersuchung von 90 Feststoffproben der ST30	235
Tabelle 23 Eluatuntersuchung von 46 Feststoffproben der ST30.....	236
Tabelle 24 Gesamtgehaltuntersuchung von 41 Feststoffproben der N82	239
Tabelle 25 Eluatuntersuchung von ausgewählten Feststoffproben der N82	240
Tabelle 26 Ergebnisse der Gesamtgehaltuntersuchung von Feststoffproben der ST32	243
Tabelle 27 Arsengehalte in den Teilbereichen der K29	246
Tabelle 28 Bleigehalte in den Teilbereichen der K29	247
Tabelle 29 Zusammenfassende Eckdaten der Probenahme auf der ST30.	250
Tabelle 30 Zusammenfassende Eckdaten der Probenahme auf der N82.	251
Tabelle 31 Zusammenfassende Eckdaten der Probenahme auf der ST32.	253
Tabelle 32 Zusammenfassende Eckdaten der Probenahme auf der K29.....	255

Tabelle 33 Chemische Analysen der Bodenproben.....	256
Tabelle 34 Probenbezeichnungen der unbehandelten und behandelten Proben	266
Tabelle 35 Massenbilanz der thermischen Behandlung.....	267
Tabelle 36 Eingestellte Konzentrationen an Eisenhydroxiden	281
Tabelle 37 Eingestellte Konzentrationen an CO_3^{2-}	281

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung der Versuchsanordnung zur Bestimmung der Durchströmbarkeit	12
Abbildung 2 Darstellung des Druckdifferenz über die Leerrohrgeschwindigkeit	13
Abbildung 3 Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ..	14
Abbildung 4 Relativen Trockenmasse des Bodens als Funktion der Temperatur	15
Abbildung 5 Arrhenius Diagramm der Pyrolyse.....	16
Abbildung 6 Vergleich der Abnahme der relativen Masse zwischen der Messung und dem Kinetikmodell	17
Abbildung 7 Struktur des Rechnernetzes.....	21
Abbildung 8 Temperaturverlauf der Heizlanze, Versuch 1, sowie das Polynom, welches als Randbedingung für das Modell dient	22
Abbildung 9 Temperaturfeld, Versuch 1 nach 22 Minuten	23
Abbildung 10 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 1 nach 22 Minuten	24
Abbildung 11 Wärmeleitfähigkeit des Bodens, Versuch 1 nach 22 Minuten	25
Abbildung 12 Temperaturfeld, Versuch 1 nach 333 Minuten	26
Abbildung 13 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 1 nach 333 Minuten	27
Abbildung 14 Spezifische Masse Organik, Versuch 1 nach 333 Minuten.....	28
Abbildung 15 Wärmeleitfähigkeit des Bodens, Versuch 1 nach 333 Minuten	29
Abbildung 16 Temperaturfeld, Versuch 1 bei Versuchsende (700 Minuten).....	30
Abbildung 17 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 1 bei Versuchsende (700 Minuten)	31
Abbildung 18 Spezifische Masse Organik, Versuch 1 bei Versuchsende (700 Minuten)	32
Abbildung 19 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 1 an der ersten Messstelle (\varnothing 320 mm).	33
Abbildung 20 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 1 an der zweiten Messstelle (\varnothing 520 mm).....	34
Abbildung 21 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 1 an der dritten Messstelle (\varnothing 720 mm).	35
Abbildung 22 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 1 an der vierten Messstelle (\varnothing 920 mm).	36
Abbildung 23 Temperaturverlauf der Heizlanze, Versuch 2, sowie das Polynom, welches als Randbedingung für das Modell dient.	37
Abbildung 24 Temperaturfeld, Versuch 2 bei Versuchsende (700 Minuten).....	38
Abbildung 25 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 2 bei Versuchsende (700 Minuten).	39
Abbildung 26 Spezifische Masse Organik, Versuch 2 bei Versuchsende (700 Minuten)	40

Abbildung 27 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 2 an der ersten Messstelle (\varnothing 320 mm)	41
Abbildung 28 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 2 an der zweiten Messstelle (\varnothing 520 mm)	42
Abbildung 29 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 2 an der dritten Messstelle (\varnothing 720 mm).	43
Abbildung 30 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 2 an der vierten Messstelle (\varnothing 920 mm)	44
Abbildung 31 Temperaturverlauf der Heizlanze, Versuch 3, sowie das Polynom, welches als Randbedingung für das Modell dient.	45
Abbildung 32 Temperaturfeld, Versuch 3 beim Versuchsende (700 Minuten).....	46
Abbildung 33 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 3 bei Versuchsende (700 Minuten)	47
Abbildung 34 Spezifische Masse Organik, Versuch 3 bei Versuchsende (700 Minuten)	48
Abbildung 35 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 3 an der ersten Messstelle (\varnothing 320 mm).	49
Abbildung 36 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuchs 3 an der zweiten Messstelle (\varnothing 520 mm).....	50
Abbildung 37 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 3 an der dritten Messstelle (\varnothing 720 mm).	51
Abbildung 38 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 3 an der vierten Messstelle (\varnothing 920 mm).	52
Abbildung 39 Struktur des Rechnernetzes.....	53
Abbildung 40 Temperaturverlauf der Heizlanze, Versuch 4, sowie das Polynom, welches als Randbedingung für das Modell dient.	54
Abbildung 41 Temperatur der injizierten Luft der Messung an allen 4 Injektoren, sowie das Polynom für die Eingangsdaten der Simulation.....	55
Abbildung 42 Bahnlinien des Strömungsfeldes der Luftinjektion nach 17 Minuten	56
Abbildung 43 Bahnlinien des Strömungsfeldes der Luftinjektion nach 333 Minuten	57
Abbildung 44 Bahnlinien des Strömungsfeldes der Luftinjektion am Versuchsende (583 Minuten)	58
Abbildung 45 Temperaturfeld, Versuch 4 nach 167 Minuten	59
Abbildung 46 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 4 bei 167 Minuten	60
Abbildung 47 Spezifische Masse Organik, Versuch 4 nach 167 Minuten.....	61
Abbildung 48 Temperaturfeld, Versuch 4 nach 333 Minuten	62
Abbildung 49 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 4 nach 333 Minuten	63
Abbildung 50 Spezifische Masse Organik, Versuch 4 nach 333 Minuten.....	64

Abbildung 51 Temperaturfeld, Versuch 4 beim Versuchsende (583 Minuten).....	65
Abbildung 52 Spezifische Masse flüssiges Wasser, Versuch 4 bei Versuchsende (583 Minuten)	66
Abbildung 53 Spezifische Masse Organik, Versuch 4 bei Versuchsende (583 Minuten)	67
Abbildung 54 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 4 an der ersten Messstelle (\varnothing 320 mm).	68
Abbildung 55 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 4 an der zweiten Messstelle (\varnothing 520 mm).	69
Abbildung 56 Vergleich der Temperatur zwischen Messung und Modell, Versuch 4 an der dritten Messstelle (\varnothing 720 mm).	70
Abbildung 57 Spezifische Masse flüssiges Wasser und Organik, Versuch 4 an der Oberfläche bei Versuchsende (583 Minuten)	71
Abbildung 58 Spezifische Masse flüssiges Wasser und Organik, Versuch 4 am Boden bei Versuchsende (583 Minuten).....	72
Abbildung 59 Konzept für das vereinfachte Modell.....	74
Abbildung 60 Temperaturverteilung mit dem vereinfachten Modell.....	75
Abbildung 61 Temperaturabhängige Wärmekapazität des trockenen Bodens.	75
Abbildung 62 Verteilung vom Wassergehalt mit dem vereinfachten Modell.	76
Abbildung 63 Temperaturkurven in unterschiedlichen Höhen.	77
Abbildung 64 Temperaturverläufe mit dem vereinfachten Modell.....	78
Abbildung 65 Längsschnitt der Bohrung und des dort eingesetzten Hüllrohres mit den ausgewählten Schnitten für korrosionstechnische Untersuchungen	79
Abbildung 66 Probe 3 (links) und Probe 6 (rechts).	86
Abbildung 67 Rohrinnenseite von Rohrabschnitt 3 mit Messpunkten 1-3	87
Abbildung 68 Rohraußenseite von Rohrabschnitt 3 mit Messpunkten 1-4	88
Abbildung 69 Rohraußenseite von Rohrabschnitt 6 mit Messpunkten 1-4	89
Abbildung 70 Auslagerungstests zur Bestimmung der Neigung der Werkstoffproben zu interkristalliner Korrosion	93
Abbildung 71 3D Schnitt des Stahlbaus.	96
Abbildung 72 Aufbau der Zustellung der Versuchsapparatur.	97
Abbildung 73 Messpositionen und Bezeichnungen der Thermoelemente.	97
Abbildung 74 Foto des Messaufbaus mit Heizlanze, Thermoelementen, Wasserkühlung und Absaugung.	98
Abbildung 75 Gemessener Temperaturverlauf der Heizlanze.....	99
Abbildung 76 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 1, welche auf einem Kreis mit 320 mm angeordnet sind.....	100

Abbildung 77 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 1, welche auf einem Kreis mit 520 mm angeordnet sind.....	101
Abbildung 78 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 1, welche auf einem Kreis mit 720 mm angeordnet sind.....	102
Abbildung 79 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 1, welche auf einem Kreis mit 920 mm angeordnet sind.....	103
Abbildung 80 Foto des gesamten Bodens nach dem ersten Versuch.....	104
Abbildung 81 Detailfoto des getrockneten und pyrolysierten Bereichs.	105
Abbildung 82 Gemessener Temperaturverlauf der Heizlanze beim zweiten Versuch.	106
Abbildung 83 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 2, welche auf einem Kreis mit 320 mm angeordnet sind.....	107
Abbildung 84 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 2, welche auf einem Kreis mit 520 mm angeordnet sind.....	108
Abbildung 85 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 2, welche auf einem Kreis mit 720 mm angeordnet sind.....	109
Abbildung 86 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 2, welche auf einem Kreis mit 920 mm angeordnet sind.....	110
Abbildung 87 Foto des gesamten Bodens nach dem zweiten Versuch.	111
Abbildung 88 Detailfoto des getrockneten Bereichs. Es wird nahezu keine Organik abgebaut.	112
Abbildung 89 Gemessener Temperaturverlauf der Heizlanze beim dritten Versuch.	113
Abbildung 90 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 3, welche auf einem Kreis mit 320 mm angeordnet sind.....	114
Abbildung 91 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 3, welche auf einem Kreis mit 520 mm angeordnet sind.....	115
Abbildung 92 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 3, welche auf einem Kreis mit 720 mm angeordnet sind.....	116
Abbildung 93 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 3, welche auf einem Kreis mit 920 mm angeordnet sind.....	117
Abbildung 94 Foto des teilaufgeschmolzenen Bodens an der Lanze.	118
Abbildung 95 Foto des Bodens nach dem dritten Versuch.	118
Abbildung 96 Aufbau vierter Versuch, bei dem der Boden konvektiv durchströmt wird..	119
Abbildung 97 Gemessener Temperaturverlauf der Heizlanze beim dritten Versuch.	120
Abbildung 98 Gemessene Temperaturen der in das Ende der inneren Rohe eingeführten Thermoelemente.	121
Abbildung 99 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 4, welche auf einem Kreis mit 320 mm angeordnet sind.....	122

Abbildung 100 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 4, welche auf einem Kreis mit 520 mm angeordnet sind.....	123
Abbildung 101 Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente des Versuchs 4, welche auf einem Kreis mit 720 mm angeordnet sind.....	124
Abbildung 102 Foto des gesamten Bodens nach dem vierten Versuch.....	125
Abbildung 103 Detailfoto des vierten Versuches, für die Position Mitte.....	126
Abbildung 104 Profil des Bodens nach dem vierten Versuch, für die Position Mitte.....	127
Abbildung 105 Gemittelte Wärmeleitfähigkeitswerte in Abhängigkeit von der Orientierung der Messebene.....	133
Abbildung 106 Entwicklung und Vorgehen für das Planungstool.....	136
Abbildung 107 Aufbau des Planungstools	137
Abbildung 108 Struktureller Aufbau des Planungstools.....	138
Abbildung 109 Struktur der Datenbank für Bodenparameter	140
Abbildung 110 Struktur der Datenbank für Schadstoffparameter	141
Abbildung 111 User Login Maske des Tools	142
Abbildung 112 Auswahlmaske für Berechnungen	142
Abbildung 113 Maske für Benennung und Feldabmessungen	143
Abbildung 114 Eingabe der Bodenschichten	144
Abbildung 115 Abschluss der Eingabe für den Bodenaufbau	144
Abbildung 116 Eingabe der Schadstoffe	145
Abbildung 117 Darstellung der Erkundungsbohrung	146
Abbildung 118 Laden von Erkundungsbohrungen	146
Abbildung 119 Auswahl von Berechnungen und Ergebnissen	147
Abbildung 120 Eingabe der Lanzendaten für eine Berechnung „Case“	148
Abbildung 121 Eingabe der Betrachtungsdauer für eine Berechnung „Case“	149
Abbildung 122 Ergebnisse für eine Berechnung „Case“	149
Abbildung 123 Temperaturverteilungen für eine Berechnung „Case“	150
Abbildung 124 Verteilung der Startkontaminationen für eine Berechnung „Case“	151
Abbildung 125 Schadstoffverteilung nach Betrachtungsdauer für eine Berechnung „Case“	152
Abbildung 126 Zeitlicher Verlauf der Heizleistungen für eine Berechnung „Case“	153
Abbildung 127 Verlauf der gesamten Heizenergie für eine Berechnung „Case“	153
Abbildung 128 Verlauf des Sanierungserfolges für eine Berechnung „Case“	154
Abbildung 129 Ergebnisdaten Dateidownload für eine Berechnung „Case“	155
Abbildung 130 Ergebnisdaten „Heat Rates Results“	155
Abbildung 131 Ergebnisdaten „Remediation Results“	156
Abbildung 132 Ergebnisdaten „AirFlow Results“	157

Abbildung 133	Ergebnisdaten „AirHeat Results“	157
Abbildung 134	Eingabe der Parameter für eine Berechnung „Optimum Distance“	158
Abbildung 135	Ergebnisse Energiebedarf für „optimalen Heizlanzenabstand“	159
Abbildung 136	Diagramm Sanierungszeiten für Heizlanzenabstände	159
Abbildung 137	Diagramm Lanzenmeter für Heizlanzenabstände“	160
Abbildung 138	Diagramm Kosten für Heizlanzenabstände	161
Abbildung 139	Diagramm Kosten – Variante 2 für Heizlanzenabstände	161
Abbildung 140	Download-Möglichkeit für Ergebnisdaten zu „Optimum Distance“	162
Abbildung 141	Ergebnisdatei zu „Optimal Distance“	162
Abbildung 142	Ergebnisse Temperaturen für einen ausgewählten Heizlanzenabstand ...	163
Abbildung 143	Ergebnisse Schadstoffverteilung (Sanierungsende) für einen ausgewählten Heizlanzenabstand.....	164
Abbildung 144	Ergebnisse Heizleistungen für einen ausgewählten Heizlanzenabstand ...	164
Abbildung 145	Ergebnisse Heizenergie für einen ausgewählten Heizlanzenabstand	165
Abbildung 146	Ergebnisse Sanierungsverlauf für einen ausgewählten Heizlanzenabstand	166
Abbildung 147	Download-Möglichkeiten für einen ausgewählten Heizlanzenabstand	166
Abbildung 148	Verlauf der Heizleistungen aus „Heat Rates Results“	167
Abbildung 149	Darstellung der Sanierungsverläufe unterschiedlicher Heizlanzenabstände	168
Abbildung 150	Input-Maske für „2-dim. Example“	169
Abbildung 151	Ergebnis Temperaturen für „2-dim. Example“	170
Abbildung 152	Ergebnis Schadstoffverteilung (Sanierungsbeginn), „2-dim. Example“	171
Abbildung 153	Ergebnis Schadstoffverteilung (Sanierungsende), „2-dim. Example“	171
Abbildung 154	Download der Ergebnisdaten für „2-dim. Example“	172
Abbildung 155	Ergebnisdatei „Heatrates.csv“	173
Abbildung 156	Ergebnisdatei „Massflow_air.csv“	174
Abbildung 157	Modellansatz für das Transportmodell.....	175
Abbildung 158	Errechnete Dampfdrücke	176
Abbildung 159	Bestimmung der Gemischsiedetemperaturen	177
Abbildung 160	Gemischsiedetemperaturen bei 1 bar	178
Abbildung 161	Errechnete Henry Konstanten	179
Abbildung 162	Prozesse des Stofftransportes	179
Abbildung 163	Relative Konzentrationsverläufe für unterschiedliche Sättigungslängen ..	181
Abbildung 164	Ausgangsbasis für eine Kontaminationsverteilung.....	182
Abbildung 165	Ergebnisse für Random Walk mit N = 10.....	182
Abbildung 166	Ergebnisse für Random Walk mit N = 1000.....	183

Abbildung 167 Berechnung für Dichlormethan	184
Abbildung 168 Berechnung für Tetrachlorethen	184
Abbildung 169 Relativer Schadstoffaustrag zweier Schadstoffe	185
Abbildung 170 Segmentierte Heizlanze, Detailansicht der Verbindung mit Haken und Öse sowie Verkabelung (grün)	187
Abbildung 171 Segmentierte Heizlanze mit Hüllrohr	188
Abbildung 172 Hüllrohr mit Luftinjektion	189
Abbildung 173 Versuchslanze für den Schrägverbau mit Keramikkörper	190
Abbildung 174 Fläche für die Feldversuche	191
Abbildung 175 Layout Versuchsfeldinstallationen	192
Abbildung 176 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 0,66 m	196
Abbildung 177 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,00 m	197
Abbildung 178 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,33 m	197
Abbildung 179 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,66 m	198
Abbildung 180 Tiefenprofil segmentierte Heizlanze; Abstand zur Heizlanze: 2,00 m	198
Abbildung 181 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 0,66 m ..	200
Abbildung 182 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 0 66 m	200
Abbildung 183 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 1,00 m ..	201
Abbildung 184 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,00 m	201
Abbildung 185 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 1,33 m ..	202
Abbildung 186 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,33 m	202
Abbildung 187 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 1,66 m ..	203
Abbildung 188 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 1,66 m	203
Abbildung 189 Tiefenprofil Heizlanze mit Luftinjektion; Abstand zur Heizlanze: 2,00 m ..	204
Abbildung 190 Tiefenprofil Referenzlanze; Abstand zur Heizlanze: 2,00 m	204
Abbildung 191 Schräglanze Tiefenprofil 1; Abstand zur Heizlanze: 0,00 m	205
Abbildung 192 Schräglanze Tiefenprofil 2; Abstand zur Heizlanze: 0,00 m	206
Abbildung 193 Schräglanze Tiefenprofil lateral 1,50 m versetzt	206
Abbildung 194 Schräglanze Tiefenprofil lateral 0,75 m versetzt	207
Abbildung 195 Darstellung der Gesamtgeometrie zur Modellierung des Feldversuchs ...	212
Abbildung 196 Darstellung der Luftinjektion	213
Abbildung 197 Bahnlinien der Bodenluft, eingefärbt durch die Geschwindigkeit für alle Injektionen nach 1 Stunde	216
Abbildung 198 Bahnlinien der Bodenluft, eingefärbt durch die Geschwindigkeit für die Injektion in 2 m Tiefe nach 1 Stunde	216
Abbildung 199 Bahnlinien der Bodenluft, eingefärbt durch die Geschwindigkeit für die Injektion in 4 m Tiefe nach 1 Stunde	217

Abbildung 200 Bahnlinien der Bodenluft, eigefärbt durch die Geschwindigkeit für die Injektion in 6 m Tiefe nach 1 Stunde	217
Abbildung 201 Geschwindigkeitsfeld im Schnitt durch Injektion in 2 m Tiefe	218
Abbildung 202 Bahnlinien der Bodenluft, eigefärbt durch die Geschwindigkeit für alle Injektion nach 10 Tagen	218
Abbildung 203 Temperatur des Bodens nach 1 Stunde an der Injektion in 2 m Tiefe	219
Abbildung 204 Temperatur der Bodenluft nach 1 Stunde an der Injektion in 2 m Tiefe...	220
Abbildung 205 Darstellung der Temperaturverteilung um die Lanze nach einer Stunde..	220
Abbildung 206 Darstellung der Temperaturverteilung um die Lanze nach 10 Stunden....	221
Abbildung 207 Darstellung der Temperaturverteilung um die Lanze nach 10 Tagen	221
Abbildung 208 Gehalte an $C_{r_{ges}}$ im Oberboden (0 – 0,1 m uGOK).....	237
Abbildung 209 Analyseergebnisse der Feststoffuntersuchungen	241
Abbildung 210 Gesamtgehalte von Pb im Oberboden.....	244
Abbildung 211 Verteilung des Parameters Pb (links) und As (rechts).....	248
Abbildung 212 Probenahmestellen ST30_A und ST30_B	249
Abbildung 213 Probenahmestelle N82.....	250
Abbildung 214 Probenahmestelle ST32.....	252
Abbildung 215 Probenahme ST32.	253
Abbildung 216 Probenahmestelle K29	254
Abbildung 217 Röntgendiffraktogramm der Probe der Altlast ST32	260
Abbildung 218 Röntgendiffraktogramm der Probe aus der Altlast N82	260
Abbildung 219 Röntgendiffraktogramm der Probe aus der Altlast K29	261
Abbildung 220 Röntgendiffraktogramm der Probe „Poschacher“	261
Abbildung 221 Analysenschema K29 < 2 mm	263
Abbildung 222 Analysenschema N82 < 2 mm.....	264
Abbildung 223 Analysenschema Poschacher < 2 mm	264
Abbildung 224 Analysenschema ST30 < 2 mm	265
Abbildung 225 Analysenschema ST32 < 2 mm	265
Abbildung 226 Vor (links) und nach (rechts) thermischer Behandlung, ST32 mit 105 °C..	268
Abbildung 227 Vor (links) und nach (rechts) thermischer Behandlung, ST32 mit 300 °C..	269
Abbildung 228 Vor (links) und nach (rechts) thermischer Behandlung, ST32 mit 500 °C..	269
Abbildung 229 Röntgendiffraktogramme der Probe ST32 als Funktion der Temperatur..	270
Abbildung 230 Röntgendiffraktogramme der Probe K29 als Funktion der Temperatur ...	271
Abbildung 231 Elementverteilungskarten einer Probe aus der Altlast K29 nach Behandlung mit 105 °C.....	272
Abbildung 232 SEM-EDX-Spektrum einer Pb-führenden Phase aus der Altlast K29 nach Behandlung mit 105 °C	273

Abbildung 233 Elementverteilungskarte einer Probe aus der Altlast K29 nach Behandlung mit 500 °C.....	274
Abbildung 234 SEM-EDX-Spektrum einer Pb-führenden Phase aus der Altlast K29 nach Behandlung mit 500 °C	275
Abbildung 235 Erweitertes Analysenschema mit LeachXS™	277
Abbildung 236 Eluatkonzentrationen K29 Al, As, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb und Si	283
Abbildung 237 Modellierung K29 Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	290
Abbildung 238 Modellierung K29 Arsen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	291
Abbildung 239 Modellierung K29 Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	292
Abbildung 240 Modellierung K29 Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	293
Abbildung 241 Modellierung K29 Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	294
Abbildung 242 Modellierung K29 Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	295
Abbildung 243 Modellierung K29 Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze).....	296
Abbildung 244 Modellierung K29 Mangan (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	297
Abbildung 245 Modellierung K29 Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	298
Abbildung 246 Modellierung K29 Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	299
Abbildung 247 Modellierung K29 Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	300
Abbildung 248 Elementarverteilungskarten K29 von C, O, P, S, Al, As, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb, Si, und Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis – grün – gelb – orange – rot – pink – weiß).....	302
Abbildung 249 Eluatkonzentrationen N82 Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, Si und Zn.....	306
Abbildung 250 Modellierung N82 Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	311
Abbildung 251 Modellierung N82 Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	312

Abbildung 252 Modellierung N82 Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	313
Abbildung 253 Modellierung N82 Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	314
Abbildung 254 Modellierung N82 Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	315
Abbildung 255 Modellierung N82 Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	316
Abbildung 256 Modellierung N82 Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	317
Abbildung 257 Modellierung N82 Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	318
Abbildung 258 Modellierung N82 Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	319
Abbildung 259 Elementarverteilungskarten N82 von C, O, P, S, Al, Ca, Fe, Mg, Pb, Si, Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis - grün – gelb – orange – rot – pink – weiß)	320
Abbildung 260 Eluatkonzentrationen ST30 Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Pb, Si und Zn	325
Abbildung 261 Modellierung ST30 Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	331
Abbildung 262 Modellierung ST30 Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	332
Abbildung 263 Modellierung ST30 Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	333
Abbildung 264 Modellierung ST30 Chrom (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	334
Abbildung 265 Modellierung ST30 Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	335
Abbildung 266 Modellierung ST30 Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	336
Abbildung 267 Modellierung ST30 Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	337
Abbildung 268 Modellierung ST30 Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	338
Abbildung 269 Modellierung ST30 Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	339

Abbildung 270 Modellierung ST30 Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	340
Abbildung 271 Elementarverteilungskarten ST30 von C, O, P, S, Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Pb, Si, Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis - grün – gelb – orange – rot – pink – weiß)	342
Abbildung 272 Eluatkonzentrationen ST32 Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, Si und Zn	346
Abbildung 273 Modellierung ST32 Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	352
Abbildung 274 Modellierung ST32 Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	353
Abbildung 275 Modellierung ST32 Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	354
Abbildung 276 Modellierung ST32 Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	355
Abbildung 277 Modellierung ST32 Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	356
Abbildung 278 Modellierung ST32 Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	357
Abbildung 279 Modellierung ST32 Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	358
Abbildung 280 Modellierung ST32 Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	359
Abbildung 281 Modellierung ST32 Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	360
Abbildung 282 Elementarverteilungskarten ST32 von C, O, P, S, Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Pb, Si, Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis - grün – gelb – orange – rot – pink – weiß)	361
Abbildung 283 Eluatkonzentrationen Poschacher Al, Ba, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Pb, Si, Zn ...	365
Abbildung 284 Modellierung Poschacher Aluminium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	370
Abbildung 285 Modellierung Poschacher Barium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	371
Abbildung 286 Modellierung Poschacher Calcium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	372
Abbildung 287 Modellierung Poschacher Cadmium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	373

Abbildung 288 Modellierung Poschacher Kupfer (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	374
Abbildung 289 Modellierung Poschacher Eisen (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	375
Abbildung 290 Modellierung Poschacher Magnesium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze).....	376
Abbildung 291 Modellierung Poschacher Blei (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	377
Abbildung 292 Modellierung Poschacher Silicium (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	378
Abbildung 293 Modellierung Poschacher Zink (rote Punkte: gemessene Werte, blau strichlierte Linie: Modellverlauf, rote durchgehende Linie: Nachweisgrenze)	379
Abbildung 294 Elementarverteilungskarten Poschacher C, O, P, S, Al, Ba, Ca, Fe, Mg, Mn, Pb, Si, Zn (Zunahme der Intensität in folgender Reihenfolge: schwarz – blau – türkis - grün – gelb – orange – rot – pink – weiß)	380

Literaturverzeichnis

Austrian Standards: ÖNORM S 2091:2006 05 01. Altlasten – Feststoff-Probenahme – Entnahme von Feststoffproben von Altablagerungen und Altstandorten, 2006.

Berrer, I.: Auswirkungen der thermischen Behandlung von Böden auf die Mobilität von Schwermetallen, Montanuniversität Leoben, 2022.

Bundesministerium für Klimaschutz Umwelt, Energie, Mobilität, Innovationen und Technologie: Innovationen für die thermische unterstützte Bodenluftabsaugung – InnoBLA Zwischenbericht, Wien, 2021.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) & Umweltbundesamt GmbH (UBA): www.altlasten.gv.at, 2021. Mehrfach abgerufen zwischen 01.08.2020 und 31.07.2021.

Burton, E.D.; Choppla, G.; Vithana, C.L.; Karimian, N.; Hockmann, K.; Johnston, S.G.: Chromium(VI) formation via heating of Cr(III)-Fe(III)-(oxy)hydroxides: A pathway for fire-induced soil pollution, 2019.

Caretto, L.S.; Gosman, A.D.; Patankar, S.V.; Spalding, D.B.: Two Calculation Procedures for Steady, Three-Dimensional Flows With Recirculation. In: Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics, Band 19 von „Lecture Notes in Physics“, Springer, 1972, S. 60–68.

Darcy, H.: Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Paris, 1856

Döberl G.: Altstandort und Altablagerung "Lederfabrik Schmidt"; Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung (§§ 13 und 14 Altlastensanierungsgesetz), Wien, 2012.

Döberl G.: Altablagerung „Halde Schrems“; Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung, Wien, 2019.

Dörrie T.: Altstandort "BBU Miniumfabrik Saag"; Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung (§13 und §14 Altlastensanierungsgesetz), Wien, 2012.

G-MAC; Hjelmar, O.: Leaching Expert System – LeachXS: A database/expert Decision Support System (DSS) coupled with geochemical modelling, 2014.

Gunn., D.J.: Transfer of heat or mass to particles in fixed and fluidised beds. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21(4):467–476, 1978. ISSN 00179310. doi: 10.1016/0017-9310(78)90080-7.

Hippler aus Kamen, M.: Bestimmung von Chrom und seinen Spezies in Böden, Universität Dortmund, 2001

Kern, J.: Mobilität von Schwermetallen bei der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung, Montanuniversität Leoben, 2021.

Kittinger, F.: Simultanthermoanalyse, Laborbericht, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, 2021.

Martens, E.; Jacques, D.; van Gerven, T.; Wang, L.; Mallants, D.: Geochemical modeling of leaching of Ca, Mg, Al and Pb from cementitious waste forms, 2010.

Meima, J.; Comans, R.: The leaching of trace elements from municipal solid waste incinerator bottom ash at different stages of weathering, 1997.

Müller, B.: Über die Adsorption von Metallionen an Oberflächen aquatischer Partikel, 1989.

Obot, N. T.: Toward a better understanding of friction and heat/mass transfer in microchannels – A literature review, Microscale Thermophysical Engineering, 2010, S. 155-173.

Schuch, M.: Physik des Torfes und der Moorböden. In: Göttlich, K. (Ed.), Moor- und Torfkunde. Schweizerbart 1980, Stuttgart.

Spijker, C.: Numerische Untersuchung der partikelinneren Effekte bei Lycopodiumstaubdeflagrationen, Dissertation, Leoben, 2015

Technisches Komitee CEN/TC 292: DIN EN 14429:2015-05. Charakterisierung von Abfällen – Untersuchung des Elutionsverhaltens – Einfluss des pH-Wertes auf die Elution unter voriger Säure/Base-Zugabe, 2015.

The OpenFOAM Foundation Ltd.: Openfoam 2.4.x, 2015. URL
<https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-2.4.x>.

Van der Sloot, H.A.; van Zomeren, A.: Characterisation Leaching Tests and Associated Geochemical Speciation Modelling to Assess Long Term Release Behaviour from Extractive Wastes, 2012.

Valtl, M.: Altablagerung „Glanzstoff - Traisenau“; Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung (§§ 13 und 14 Altlastensanierungsgesetz), Wien, 2016.

Vollprecht, D.; Riegler, C.; Ahr, F.; Stuhlpfarrer, S.; Wellacher, M.: Sequential chemical extraction and mineralogical bonding of metals from Styrian soils. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, 17, 3663-3676, doi: 10.1007/s13762-020-02694-0

Zhang, N., & Wang, Z.: Review of soil thermal conductivity and predictive models. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 117 Jg., S. 172-183.

Abkürzungen

°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
Ag	Silber
Al	Aluminium
ALSAG	Altlastensanierungsgesetz
AOX	adsorbierbare organisch gebundene Halogene
As	Arsen
AVAW	Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Ba	Barium
BBU	Bleiberger Bergwerks-Union
Be	Beryllium
BH	Bezirkshauptmannschaft
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
ca.	circa
Cd	Cadmium
CKW	Chlorkohlenwasserstoffe
Co	Kobalt
Cr	Chrom
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
Cu	Kupfer
d.h.	das heißt
DGM	Digitales Geländemodell
EDX	energy dispersive X-ray spectroscopy
etc.	et cetera
Fe	Eisen
GMRS	GM Remediation Systems GmbH

GOK	Geländeoberkante
HEL	Heizelement
HFO	Wasserhaltige Eisenhydroxide
Hg	Quecksilber
IC	Ionenaustauschchromatographie
ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
III, VI	Wertigkeit von Elementen
InnoBLA	Innovation für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung
K	Kelvin
K	Kalium
kg	Kilogramm
L	Liter
L/S-Verhältnis	Flüssig-Feststoff-Verhältnis
LCKW	Leichtflüchtige Chlorierte Kohlenwasserstoffe
Li	Lithium
m	Meter
Max	Maximum
Mg	Magnesium
Min	Minimum
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
mm	Millimeter
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MTBE	Methyl-tertiär-butylether
MUL	Montanuniversität Leoben
n.m.	nicht modelliert
Na	Natrium
Ni	Nickel
NL	Normliter
O	Sauerstoff

P	Phosphor
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
Pd	Palladium
PW	Prüfwert
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RW	Richtwert
s	Sekunde
S	Schwefel
Sb	Antimon
Se	Selen
SEM-EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
Si	Silicium
Sn	Zinn
Sr	Strontium
TCE	Trichlorethen
TCH	Thermal Conduction Heating
Tl	Thallium
TM	Trockenmasse
TML	Temperatursensor
TOC	Total Organic Carbon
uGOK	Unter Geländeoberkante
usw.	und so weiter
UZ	Ungesättigte Zone
V	Vanadium
v.a.	vor allem
W	Watt
W	Wolfram
z.B.	zum Beispiel

Zn

Zink

Zyl.

Zylinder

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und
Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 1 711 62 65-0

email@bmk.gv.at

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)