Verbundprojekt CDR: Negative Emissionen mittels photoelektrochemischer Methoden (NETPEC)

Teilprojekt 4: “Entwicklung von Endlagerungskonzepten von $C0_2$ in geologischen Formationen, Wechselwirkungen zwischen Wirtsgestein und den Einlagerungsprodukten"

Sachbericht

Förderkennzeichen: 01LS2103D
Projektlaufzeit: 01.10. 2021–31.03.2025

Karsten Reiter, Sarah Diekmeier und Andreas Henk

4. November 2025

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

NETPEC

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Zusammenfassung

Das Teilprojekt NETPEC TU Da untersucht das Potenzial der geologischen Endlagerung von kohlenstoffreichen Produkten, die durch technische Negativemissionstechnologien aus Kohlenstoffdioxid erstellt wurden. Als geologische Lager kommen ausgebeutete Bergwerke und Lagerstätten über- und untertägig in Frage. Auf der Basis von Flächendaten der geologischen Landesämter wurde eine Datenbank zu bergbaulich relevanten Flächen erstellt. Auch wenn die Daten nicht vollständig und eindeutig zuordenbar sind, gibt es ein großes Potenzial, solche Flächen als Endlager für die angedachten kohlenstoffreichen Produkte zu nutzen. Erste hydro-geochemische Experimente zur Wechselwirkung zwischen Produkt, Wirtsgestein und Grundwasser wurden getestet.

Abstract

The NETPEC TU Da subproject is investigating the potential of geological storage of carbon-rich products created from carbon dioxide using negative emission technologies. Exhausted mines and deposits above and below ground are being considered as geological storage sites. A database of areas relevant to mining was created based on area data from the state geological services. Even though the data is not complete and cannot be clearly assigned, there is great potential for using such areas as final storage sites for the planned carbon-rich products. Initial hydrogeochemical experiments on the interaction between the product, host rock, and groundwater have been tested.

Inhaltsverzeichnis

1 AP 3.2 Qualitative und quantitative Bewertung potenzieller geologischer Speicher 3
1.1 Rekapitulation der Zielstellung . . . 3
1.2 Generalisierte Endlagerszenarien (Playtypes) . . . 3
1.3 Erstabschätzung durch Massenvergleich von Kohlenstoffdioxid-Emission vs. Rohstoffextraktion in Deutschland . . . 4
1.4 Datengrundlage der Flächennutzungsanalyse . . . 4
1.4.1 Daten der Geologischen Dienste zu bergbaulichen Flächen . . . 4
1.4.2 Neustrukturierung der Daten . . . 5
1.5 Flächennutzungspotenzial in Deutschland . . . 7
1.5.1 Potenzial der oberflächlichen Endlagerung in ehemaligen Tagebauen . . . 7
1.5.2 Potenzial der untertägigen Endlageurng . . . 8
1.5.3 Karte des Bergbaustatus . . . 8
1.6 Quantitative Abschätzung des Einlagerungspotenzials von NET-Produkten . . . 11

2 AP4.2 Abschätzung potenzieller Wechselwirkungen von Endlagerprodukt und geologischem Speicher 12
2.1 Zielstellung das Arbeitspaketes . . . 12
2.2 Hydro-geo-chemische Untersuchungen zum Wechselwirkungspotential . . . 12
2.3 Batch-Experimente . . . 12
2.4 Analysemethoden . . . 12
2.4.1 Durchführung Batch-Experimente . . . 12
2.5 Verwendete Stoffe und analysierte Materialkombinationen . . . 12
2.6 Ergebnisse der Etablierung des hydro-chemischen Workflows . . . 13
2.6.1 Grundkonzept . . . 13
2.6.2 Etablierung des Workflows . . . 14
2.6.3 Lösungsverhalten, bzw. Wechselwirkungen der getesteten Stoffkombinationen . . . 14

3 Ergänzungen zum Inhalt für den Projektträger lt. BMBF-Vordr. 0701/12.22 16
3.1 Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises . . . 16
3.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten . . . 16
3.3 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses und konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans . . . 16
3.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen . . . 16
3.5 Erfolgte und geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF . . . 16

Informationen/Danksagungen

Die hydro-geochemischen Experimente wurden in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Hydrogeologie des Instituts für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt durchgeführt. Wir danken Aghughu Paulinus Ayere für die Durchführung der Experimente, Stefanie Schmidt für die Betreuung der Arbeit sowie der Probenanalyse, Zahra Neumann für Probenanalyse, Dr. Thomas Schiedek für die Idee (Batch-Versuch) und die wissenschaftliche Betreuung und Prof. Christoph Schüth für wissenschaftliche Betreuung und Ermöglichung der Durchführung. Bei der Aufbereitung der Daten für die Datenbank hat Colin Friebe als HiWi über mehrere Monate mitgearbeitet. Wir danken ihm für seinen geleisteten Einsatz und Beitrag zur Erstellung der Datenbank.

1 AP 3.2 Qualitative und quantitative Bewertung potenzieller geologischer Speicher

1.1 Rekapitulation der Zielstellung

Ziel des Arbeitspaktes 3.2 war es, eine Datenbankstruktur und die Datenbank selbst zu erstellen, welche potenzielle geologische Einlagerungsräume für feste und flüssige kohlenstoffreiche Produkte in Deutschland erfasst. Dafür sollten Flächen ehemaliger Bergbauflächen und Kohlenwasserstoff-Reservoire erfasst werden. Dabei sollte eine qualitative als auch quantitative Erfassung auf der Basis der bisherigen Nutzungsszenarien erfolgen. Weiterhin sollte eine Erstdefinition von Endlagerungsszenarien bezüglich der potenziellen Produkte als auch der potenziellen Einlagerungsräume erfolgen. Die generelle Abschätzung soll Auskunft geben, ob die angedachten geologischen Endlagerräume in Deutschland bezogen auf das Volumen ausreichend sind für eine industrielle Nutzung der NETPEC Technologie, um CO_2 dauerhaft und sicher, abgetrennt von der Atmosphäre, geologisch endzulagern.

1.2 Generalisierte Endlagerszenarien (Playtypes)

Das Ziel des Projektes *Negative Emissionen mittels photoelektrochemischer Methoden* (NETPEC; May and Rehfeld, 2019) war/ist es, feste oder flüssige kohlenstoffreiche Produkte zu erzeugen, die mit möglichst wenig Energieaufwand erzeugt werden können, also möglichst keine Energiespeicher wie Kohlenwasserstoffe sind. Die Produkte sollen den Kohlenstoff möglichst kompakt und langlebig binden und möglichst einfach und sicher geologisch endgelagert werden können. Die Probleme und Herausforderungen, die das unter übertägigen Druckbedingungen gasförmige CO_2 hat (Bickle, 2009; Lu et al., 2010; Olden et al., 2014; Vilarrasa and Rutqvist, 2017), sollen mit diesem NET-Ansatz gelöst oder zumindest reduziert werden.

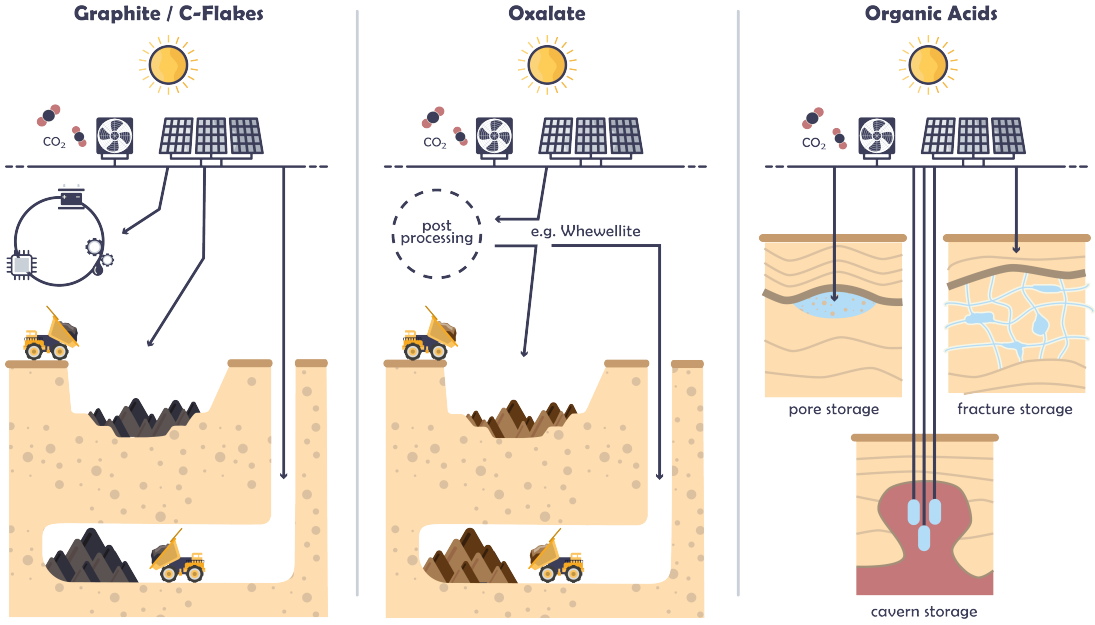


Abbildung 1: Grundsätzliches Konzept, bzw. grundsätzlich potenzielle Arten der Endlagerung kohlenstoffreicher Produkte im Rahmen des NETPEC-Ansatzes: Das abgeschiedene CO_2 wird mithilfe photo-elektrochemischer Verfahren, bei denen Sonnenenergie als Energiequelle genutzt wird, in feste oder flüssige Produkte (Grafit oder Oxalat, bzw. Oxalsäure oder andere organische Säuren) umgewandelt. Die festen Produkte können in Tagebau- oder Untertagebergwerken gelagert werden; die flüssigen Produkte können in Gesteinen mit großer Porosität (z.B. Sandstein) oder Klüftigkeit (z.B. Kalkstein), sowie in (Salz-)kavernen gelagert werden.

Um eine dauerhafte und sichere Endlagerung zu ermöglichen, sollten die Produkte von der Atmo- und Biosphäre dauerhaft abgetrennt werden. Da dies große Mengen betrifft, kann nur eine geologische Endlagerung in Betracht kommen. Um potenzielle Raumnutzungskonflikte in der Geo- bzw. Biosphäre zu vermeiden, sollen die Produkte in ehemaligen (ausgebeuteten) Bergwerken oder Lagerstätten deponiert werden. Diese haben den Vorteil, dass große Volumen gespeichert werden können, die Infrastruktur noch vorhanden sein kann, sowie die Akzeptanz der Bevölkerung für bergbauliche Tätigkeiten höher sein sollte. Als Lager in Betracht kommen ehemalige Tagebaue von Braunkohle, Erz, Werkstein, Kies oder Sand, aber auch untertägige Gruben (z.B. Steinkohle, Erz oder Salz). Solche Bergwerke sind vor allem geeignet, um feste Produkte, wie Grafit oder Oxalat aufzunehmen (siehe Abbildung 1). Kohlenwasserstoffe (KW) wie Erdöl und Erdgas wurden und werden aus dem Untergrund gefördert und sind entweder an das Poren- oder Kluftsystem gebunden. Solche ausgebeuteten KW-Lagerstätten (Abbildung 1) wären geeignet, flüssige Produkte (Oxalsäuren

und andere organische Säuren) einzulagern, ähnlich wie auch klassisch flüssiges oder überkritisches CO_2. Salze werden entweder untertägig, aber auch durch Laugung gewonnen. Aus letzterem resultieren Kavernen, die u.a. als Zwischenspeicher für Erdgas genutzt werden, sowie als Druckluftspeicher. Auch wenn bezüglich des Volumens solche Kavernen selten ungenutzt sind, wäre es trotzdem eine Option, flüssige NET-Produkte in Kavernen endzulagern.

Tabelle 1: Kohlenstoffreiche Verbindungen, die für eine Langzeitlagerung verwendet werden könnten. Wichtige physikalische Eigenschaften sowie geschätzte Massen und Volumina bezogen zu einer globalen Umwandlung von 10 Gt CO_2 sind dargestellt.

Produkt	**Aggregats-zustand**	**Besonderheiten**	**kritische Aspekte**	**Formel**	**Masse[a] [Gt]**	**Volumen[a] [km^3]**
CO_2	gasförmig	Druck und Temperatur Temperaturabhängigkeit[b]	Leckage, Rechtliche Beschränkungen	CO_2	10,00	14,3[d]
Oxalsäure	flüssig	Azidität, Gefahr für Grundwasser, Löslichkeit[c]	Grundwasserwechsel-wirkung, Leckage, Abfallbestimmungen	$H_2C_2O_4$	10,23	6,19
Kohlenstoff (Grafit)	fest	Keine[c]	Keine	C	2,72	1,21
Oxalat (Ca-Oxalate)	fest	Löslichkeit[c]	Grundwasserwechselwirkung, Abfallbestimmungen	CaC_2O_4	14,55	5,60

[a] Resultierend aus 10 Gt CO_2, [b]Vilarrasa and Rutqvist (2017), [c]May and Rehfeld (2019), [d]Kühn (2011), in 2,5 km Tiefe

1.3 Erstabschätzung durch Massenvergleich von Kohlenstoffdioxid-Emission vs. Rohstoffextraktion in Deutschland

Um eine Erstabschätzung zu erhalten, ob theoretisch überhaupt größere Mengen von kohlenstoffreichen Produkten aus einer Negativemissionstechnologie endgelagert werden könnten, erfolgte ein Verglich zwischen der aktuellen Emission von CO_2 und der aktuellen geologischen Extraktion von gasförmigen, flüssigen als auch festen Rohstoffen in Deutschland. Die gasförmigen und flüssigen Rohstoffe betreffen Erdgas und Erdöl, die festen Rohstoffe umfassen Braunkohle, Erze und andere mineralische Rohstoffe, Werkstein als auch Sand- und Kiese. Die Ergebnisse sind getrennt für jedes Bundesland als auch in Summe für ganz Deutschland verfügbar, siehe Tabelle 2 und Abbildung 2.

Das Ergebnis zeigt, dass die Masse der jährlichen geologisch gewonnenen Rohstoffe in Deutschland fast identisch ist zu der Masse der jährlichen CO_2 Emission. Auch auf der Ebene der Bundesländer betrachtet zeigt der Vergleich, dass die Mengen zumindest in einer vergleichbaren Größenordnung sind. In Anbetracht der Annahme, dass 8% der 1990'er CO_2 Emissionen (UBA, 2025, Basiswert für Deutschland: 1252 Mt;) ab dem Jahr 2040 durch landbasierte oder technische Methoden in Europa entzogen werden müssen (Bodirsky et al., 2024), entspräche dies etwa 100 Mt/a für Deutschland, etwa 1/6 der aktuellen Emission. Dies würde bedeuten, dass etwa 17% der aktuellen Rohstoffentnahme mit kohlenstoffreichen Produkten verfüllt werden müssten, unter der Annahme, der Massenkonstanz und dass die negativen Emissionen nur geologisch gespeichert würden. Da ein solches Szenario zumindest bezüglich der Einlagerung grundsätzlich realistisch erscheint, wird im Folgenden näher darauf eingegangen, welche konkreten Flächen in Deutschland potenziell verfügbar sein könnten. Global ist es das Ziel, 10 Gt CO_2 pro Jahr der Atmosphäre zu entziehen (Anderson and Peters, 2016); somit würde 100 Mt CO_2/a ungefähr dem globalen Bevölkerungsanteil Deutschlands entsprechen.

1.4 Datengrundlage der Flächennutzungsanalyse

1.4.1 Daten der Geologischen Dienste zu bergbaulichen Flächen

Zur Abschätzung des Potenzials der geologischen Endlagerung kohlenstoffreicher Produkte wurden alle Geologischen Dienste der Bundesländer gebeten, Daten über ehemalige und aktuelle bergbauliche Tätigkeiten, oberflächlich und untertägig, zur Verfügung zu stellen. Die Anfrage umfasst folgende Fragen:

- Digitale Daten mit geographischem Bezug zu ehemalige, aktuellen und geplanten Flächen des oberflächlichen sowie unterirdischen Rohstoffabbaus
- Digitale Daten mit geographischem Bezug zu unterirdischen Kavernen und Gasspeichern
- Ergänzende Informationen über Abbaumengen oder Speicherkapazitäten (im Falle von Gasspeichern)

Die Verfügbarkeit der Daten ist je nach Bundesland ist verschieden. In Abbildung 3 wird die unterschiedliche Zugänglichmachung der Daten untergliedert in übertägige und untertägige Rohstoffgewinnung dargestellt. Die Ursache für fehlende Verfügbarkeit ist,

Tabelle 2: Energiebezoge CO_2 Emission durch den Verbrauch von Primärenergie im Jahr 2019 im Kontext der Erzeugung einheimischer Produktion von Rohstoffen aus dem geologischen Untergrund (German Environment Agency, 2022; Statistical Offices of the Federal Government and the Federal States, 2022; Statistical Offices of the Federal States Germany, 2022). Abbildung 2 visualisiert die Daten auch in einer Karte.

Bundesland	Emission CO_2eq [Mio. t/a]	Extraktion (energetisch) [Mio. t/a]	Extraktion (mineralisch) [Mio. t/a]
Baden-Württemberg	63,82	0,49	88,87
Bayern	73,58	0,04	112,51
Berlin	13,68	-	-
Brandenburg	48,84	24,79	23,55
Bremen	11,44	-	-
Hamburg	14,65	-	-
Hessen	34,47	$0{,}2*10^{-4}$	33,13
Niedersachsen	60,15	5,57	41,12
Mecklenburg-Vorpommern[a]	9,16	0,01	15,80
Nordrhein-Westfalen	209,84	64,92	122,82
Rheinland-Pfalz	26,71	0,15	42,88
Saarland[b]	21,64	0,095	2,24
Sachsen	45,40	35,62	50,82
Sachsen-Anhalt	24,06	6,35	47,44
Schleswig-Holstein	16,68	1,07	19,52
Thüringen	10,40	0,014	26,43
Germany	657,69	139,13	629,19

[a] 2018, [b] 2015

dass manche Bundesländer die Daten nicht kostenlos in einer Form bereitstellen konnten, wie dies für die geplante Datenbank notwendig gewesen wäre. Die konkrete Verfügbarmachung der Daten erfolgte über Shape-files (Datenformat für Geodaten) oder via WMS-Datenserver (siehe Tabelle 3). Da die Bergbaugeschichte, der ehemaligen als auch der aktuelle rechtliche Rahmen von Bundesland zu Bundesland verschieden sind, konnten die Daten nicht in der existierenden Form zusammengeführt werden.

1.4.2 Neustrukturierung der Daten

Die Neu- bzw. Umstrukturierung der Daten war notwendig, um die Daten zu homogenisieren, als auch für die angedachten Anwendungsfälle nutzbar zu gestalten. Dabei ist die allgemeine Untergliederung in übertägige und untertägige Bergbautätigkeit erfolgt. Weiterhin wird der Status als auch die Art des Rohstoffes klassifiziert (Tabelle 4). Dies ermöglicht es, konkret auf der Basis der Daten Zuordnungen zu Nutzungsszenarien, generellen Potenzialen zu erstellen.

Im Allgemeinen lassen die gesammelten Daten auf ein weitreichendes Potenzial an Gebieten in Deutschland schließen, in denen die zukünftige Lagerung von kohlenstoffreichen Produkten in fester oder flüssiger (oder auch gasförmiger) Form möglich ist. Unter den angegebenen Gebieten gibt es kein bestimmtes Bundesland mit signifikant höherem Potenzial, mit Ausnahme der nördlichen Bundesländer, die über eine größere Häufigkeit an Kavernen als auch ehemaligen Kohlenwasserstofflagerstätten verfügen, und damit ein höheres Potenzial für die Lagerung flüssiger Produkte verfügen. In einigen Fällen, wie beispielsweise in Bayern, resultiert die begrenzte Anzahl an Standorten und Gebieten schlicht aus einem Mangel an Daten.

Da die Verteilung der Gebiete und damit das Speicherpotenzial über ganz Deutschland verteilt ist, ist eine dezentrale Speicherung für die zukünftige Entsorgung möglich. Somit ist nicht nur der Ausgleich regionaler Emissionen durch die Speicherung der Endprodukte, sondern bei Bedarf auch die Integration der Technologie an den jeweiligen Standorten möglich, wodurch weitere Emissionen durch den Transport entfallen.

Deutschland plant derzeit den Aufbau eines neuen CO_2-Verteilungsnetzes, das erhebliche Investitionen erfordern wird (OGE - Open Grid Europe, 2024). Durch die Umsetzung lokaler Speicherlösungen kann der Bedarf an einem umfangreichen Netzausbau minimiert werden. Da das Speicherpotenzial über ganz Deutschland verteilt ist, sind dezentrale Speicheroptionen für die zukünftige Entsorgung realisierbar. Dies ermöglicht es, regionale Emissionen durch die lokale Speicherung kohlenstoffreicher Endprodukte auszugleichen.

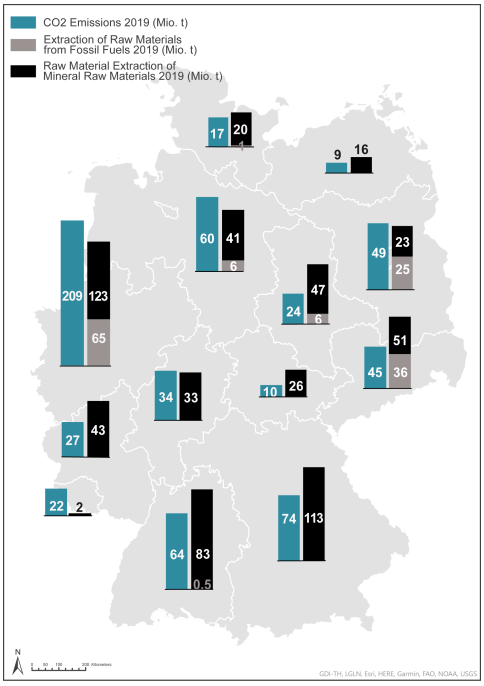


Abbildung 2: Energeiebezogene CO_2-Emissionen durch Primärenergieverbrauch im Vergleich zu der Extraktion von mineralhaltigen Rohstoffen in Deutschland im Jahr 2019. Die Stadtstaaten Bremen, Hamburg und Berlin sind nicht dargestellt. Datenquelle: (German Environment Agency, 2022), die Details befinden sich in Tabelle 2.

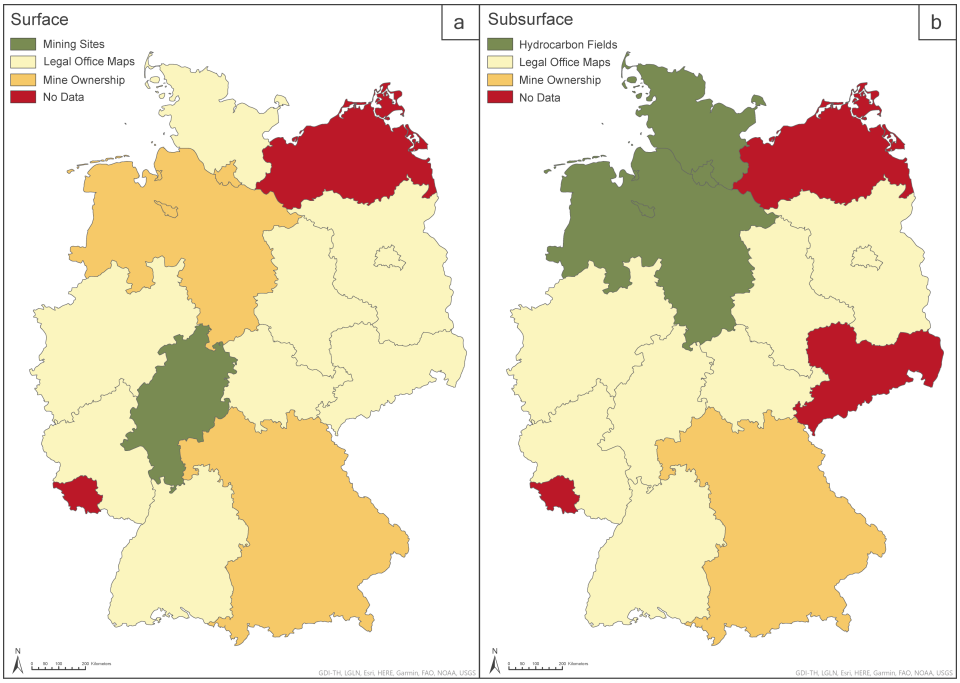


Abbildung 3: Verfügbarkeit von Daten zur Rohstoffgewinnung in den Bundesländern für a) oberflächlichen Abbau und b) für die untertägige Rohstoffgewinnung.

Tabelle 3: Datenverfügbarkeit, Datentyp und Informationsquelle untergliedert nach Bundesland.

Bundeslands	Datentype	Informationsquelle
Baden-Württemberg	wms	Regierungspräsidium Freiburg Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau LGRB-BW Rauminformationssystem Bergbau (RISBinBW) des LGRB-BW
Bayern	shape-files	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
Berlin	wms	INSPIRE ST AM
Brandenburg	wms	INSPIRE ST AM Brandenburger Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR)
Bremen	shape-files	Niedersächsisches Bodeninformationssystem NIBIS®
Hamburg	shape-files	Niedersächsisches Bodeninformationssyste NIBIS®
Hessen	shape-files	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Niedersachsen	shape-files	Niedersächsisches Bodeninformationssystem NIBIS®
Meckl.-Vorpommern	–	–
Nordrhein-Westph.	shape-files	Bezirksregierung Arnsberg; Bundesland NRW
Rheinland-Pfalz	wms	INSPIRE ST AM
Saarland	–	–
Sachsen	wms	Landesamt für Geobasisinformation Sachsen (GeoSN) INSPIRE SN: Mineralische Bodenschätze; Fossile Energieträger
Sachsen-Anhalt	wms	INSPIRE ST AM; Geodatenportal Sachsen-Anhalt Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB);
Schleswig-Holstein	-	-
Thüringen	shape-files	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz

Tabelle 4: Neuklassifikation der Flächen mit einem bergbaulichen Status im Kontext allgemeiner Kriterien für potenzielle Negativemissionsprodukte.

	Übertägiger Abbau	Fläche km^2	Untertägiger Abbau	Fläche km^2
	Total	99.260	Total	34.800
Status	ehemaliger Bergbau	1.270	Kohlenwasserstofflagerstätten	16.530
	Bergwerksbesitz	1.500	Kavernen	2.200
	industrielle Betriebsflächen	3.940	Sonstige unterirdische Lagerstätten	640
	Abbau ist aktiv/inaktiv	12.110	Bergwerksbesitz	14.670
	unbekannt	80.440	unbekannt	760
Rohstoff/Nutzung	Metallische Rohstoffe/Erz	61.870	Metallrohstoffe/Erz	10.860
	Festgestein (nicht veränderlich)	550	Festgestein (veränderlich)	910
	Festgestein (veränderlich)	6.810	Kohlenwasserstoffe	16.530
	Lockergestein (kohäsiv)	110	Salz/Sole	13.130
	Lockergestein (nicht kohäsiv)	340	Kohle	180
	Organische Rohstoffe	7.010	Untergrundspeicher	160
	unbekannt	19.870	unbekannt	760

1.5 Flächennutzungspotenzial in Deutschland

1.5.1 Potenzial der oberflächlichen Endlagerung in ehemaligen Tagebauen

Die Zusammenfassung aller Flächen mit einem bergbaulichen Status, für eine potenzielle Oberflächenlagerung sind in Abbildung 5 dargestellt. Es handelt sich in Summe um eine Fläche von bis zu 99.260 km^2 mit unterschiedlichem Nutzungs- und Genehmigungsstatus. Es ist wichtig zu beachten, dass diese Abbildung, bzw. die Flächenwerte nicht genau den praktisch/effektiv nutzbaren Regionen widerspiegelt, da aufgrund unterschiedlicher Genehmigungen Doppelzählungen nicht ausgeschlossen werden können, und es auch Flächen gibt, für die nur eine Genehmigung der optionalen Flächennutzung (Berechtsame) vorliegt, aber kein tatsächlicher Abbau stattfindet (Tabelle 4).

Insbesondere bei Endprodukten, die zu Wechselwirkungen mit dem Wirtsgestein führen könnten, wurden die potenziellen Flächen in die dort gewonnenen Rohstoffe unterteilt. Bei den Oberflächenstandorten erwiesen sich Erzlagerstätten mit 61.870 km^2 als die

größte potenzielle Fläche, gefolgt von nicht-klassifizierter Nutzungsflächen (unbekannt), organischen Rohstoffen und veränderlichem Festgestein mit entsprechend 19.870, 7.010 und 6.810 km^2 (Tabelle 4).

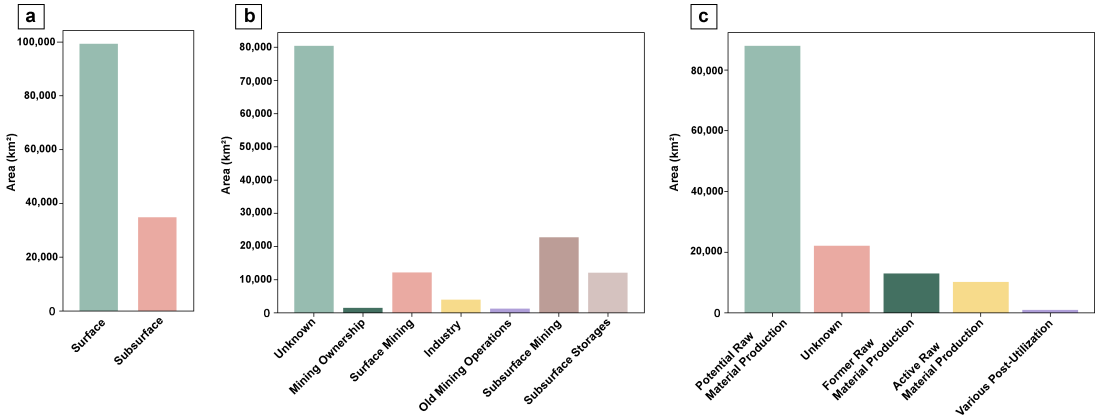


Abbildung 4: Gebiete mit potenziellen Endlagerräumen, unterschieden nach Art und Status. Die Diagramme zeigen die Fläche der bergbaubezogenen Flächen in Deutschland. a) Verteilung der Fläche von ober- und untertägigen Standorten. b) Verteilung der Standortarten für übertägige Regionen nach ihrer Fläche. c) Status der verschiedenen untertägigen Standorte nach ihrer Fläche.

1.5.2 Potenzial der untertägigen Endlageurng

Das CO_2-Speicherpotenzial des geologischen Untergrunds in Deutschland wurde über viele Jahre hinweg je nach Forschungsschwerpunkt mehrfach bewertet (Borchers et al., 2024; Hilgers et al., 2024) und beläuft sich auf 20 bis 115 Gt in tiefen salinen Aquifären (Festland und offene See), 2,75 Gt in erschöpften Öl- und Gasfeldern und 130 Gt in erschöpften Ölfeldern (Hilgers et al., 2024). Da sich hier dieselben Herausforderungen wie bei Bergbaugebieten im Allgemeinen stellen, schien das Gesamtpotenzial in Deutschland im Detail noch unklar. Diese Datenbank zeigt, dass es hinsichtlich der für die Speicherung potenzieller flüssiger Endprodukte vorgesehenen Untergrundstandorte Gebiete mit einer Gesamtfläche von bis zu 34.800 km^2 (Abbildung 6) für potenzielle Speicher gibt.

In Deutschland sind unterirdische Gebiete für verschiedene Rohstoffe im Zusammenhang mit dem Bergbau zugelassen. Metallerze kommen in großen Regionen vor, während Kohlenwasserstoffe wie Öl und Gas noch ausgedehntere Gebiete bedecken. Auch die Gewinnung von Salz und Sole ist von Bedeutung, während der Kohlebergbau eine viel kleinere Fläche einnimmt. Einige Gebiete mit unbekannter Genehmigung bleiben bestehen (Tabelle 4).

Ungeachtet der Ergebnisse des Speicherkatasters Deutschland 2011 (Reinhold et al., 2011), das umfangreiche Untersuchungen zu Porenspeichern durchgeführt hat, die auch für kohlenstoffreiche flüssige und gasförmige Produkte relevant sein könnten, bleibt das Potenzial für unterirdische Lagerung weiterhin vielversprechend (Kühn, 2011).

Wenn man sich ausschließlich auf das Potenzial konzentriert und einzelne Standorte untersucht, kann man schätzen, dass eine einzelne Kaverne, die auf die Abmessungen einer auf diese Weise gefüllten Produktionskaverne erweitert wurde, ein Hohlraumvolumen von etwa 1 Million m^3 besitzt (Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen mbH& Co. KG, 2021, persönliche Mitteilung). Die 114 Kavernen der Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen mbH& Co. KG können daher zur Veranschaulichung des Potenzials für die Endlagerung eines Produkts herangezogen werden, auch wenn hier zugegebenermaßen künftige Konflikte hinsichtlich der Wasserstoffspeicherung zu berücksichtigen sind.

1.5.3 Karte des Bergbaustatus

Die Kartenabbildungen zeigen das flächenbezogene Potenzial für die Lagerung und wurden hinsichtlich ihrer lagerungsbezogenen Themen sowie in Tagebau- oder Oberflächenstandorte und Untertagebau- oder Untergrundstandorte unterteilt. In der Regel umfasst ein genehmigter und ausgeübter Bergbau nicht die gesamte dargestellte Fläche, weshalb in diesem Kapitel nur eine Schätzung des Potenzials vorgenommen wurde. Die dargestellten Flächen können aufgrund unterschiedlicher Genehmigungsformen doppelt vorkommen.

Die in diesem Kapitel beschriebene Unterteilung ist in den jeweiligen Karten (Abbildung 5 und 6) dargestellt und veranschaulicht die Gründe für eine solche Unterteilung. Je nach geologischen Gegebenheiten werden unterschiedliche Gebiete sichtbar. Im Norden Deutschlands sind die Kapazitäten für die unterirdische Speicherung von Produkten größer, da hier aufgrund der Kohlenwasserstoffvorkommen bereits diverse Reservoire genutzt wurden.

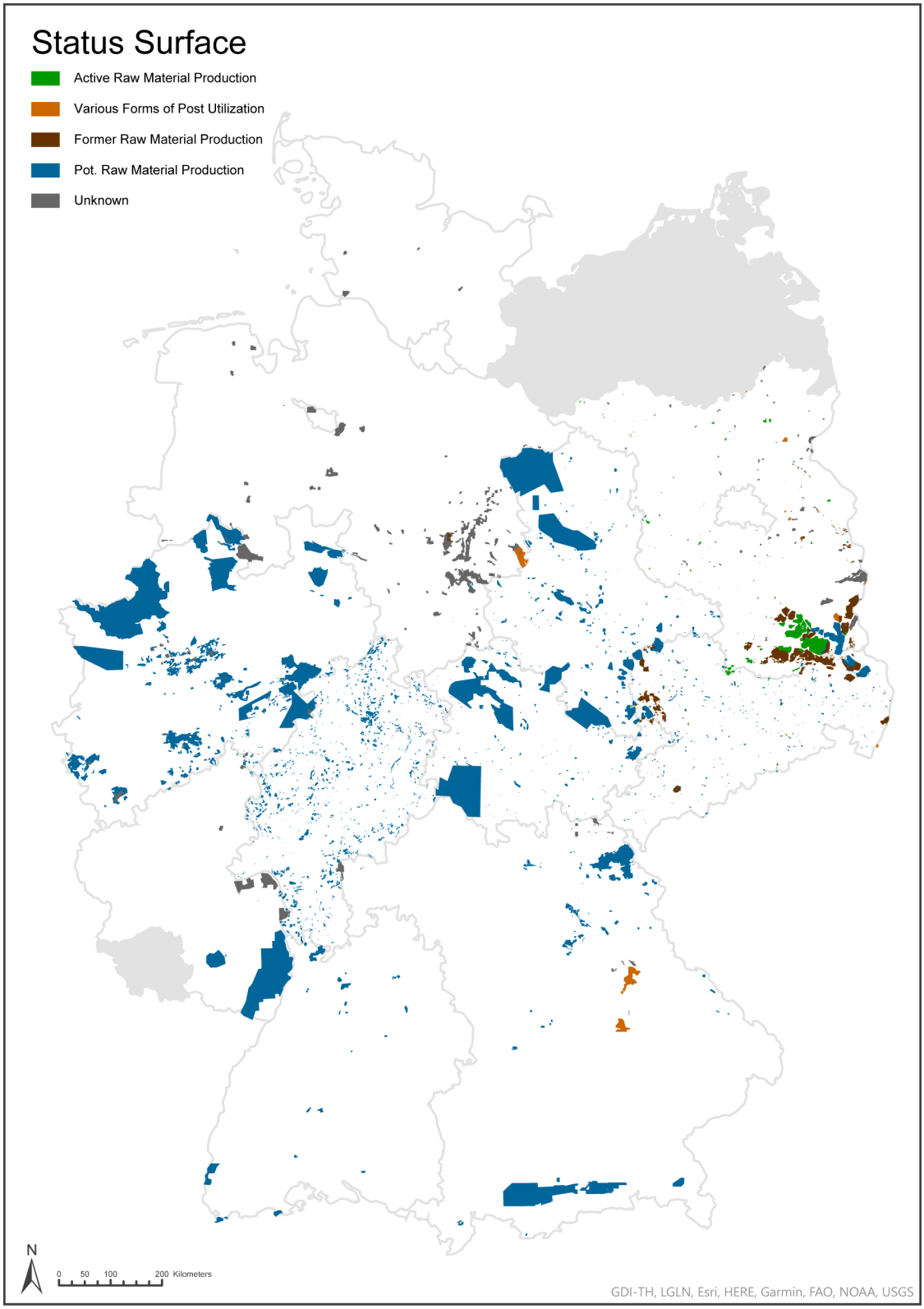


Abbildung 5: Karte von Deutschland mit den oberflächlichen Regionen mit einem bergbaulichen Status, kategorisiert nach Status: aktiver Bergbau, verschiedener Status des Abbaus, ehemaliger Abbau, potenzieller Abbau und unbekannter Status. Für die ausgegrauten Bundesländer liegen keine Daten vor.

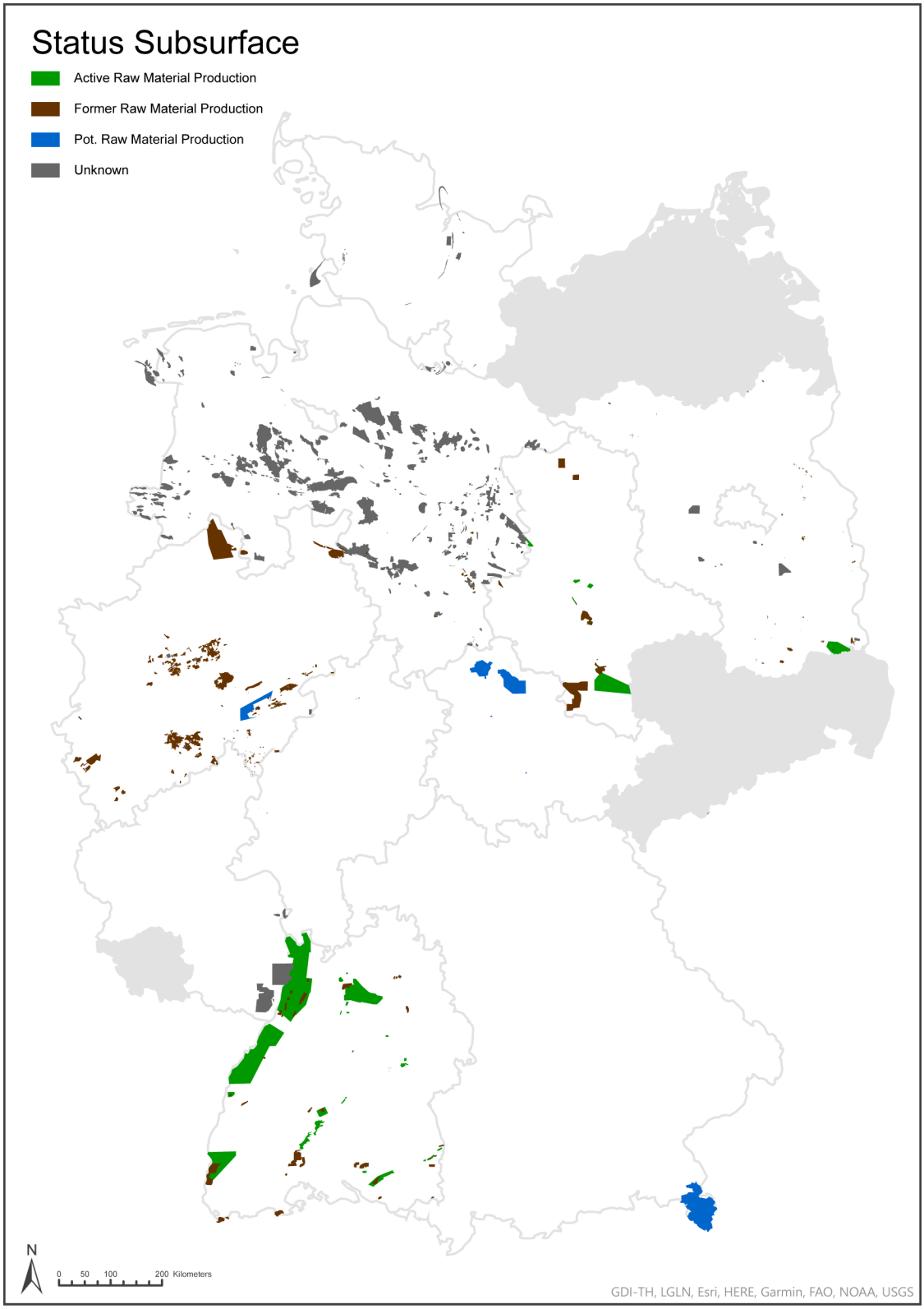
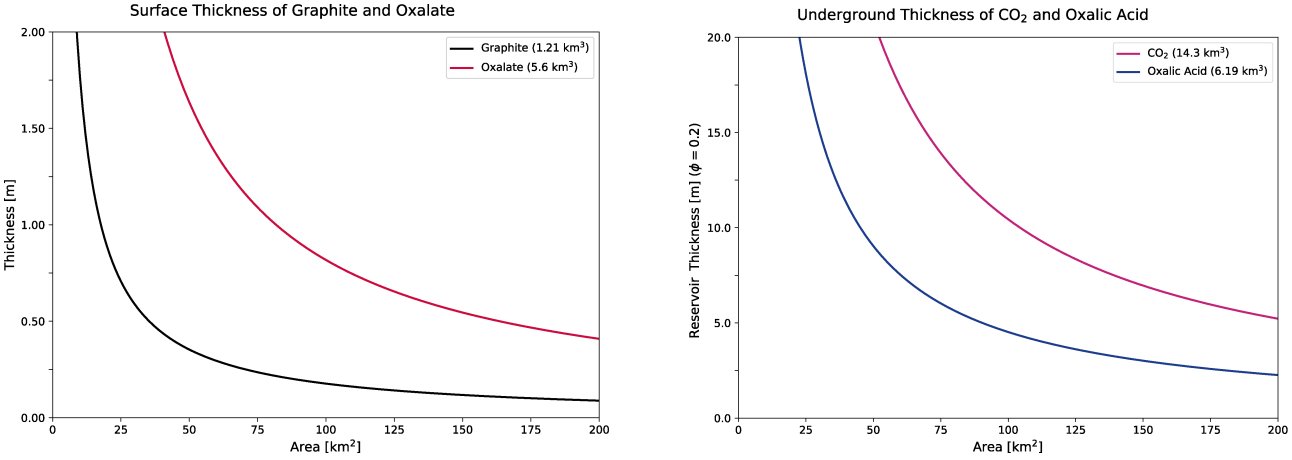


Abbildung 6: Karte von Deutschland mit den untertägigen Regionen mit einem bergbaulichen Status, kategorisiert nach Status: aktiver Abbu, ehemaliger Abbau, potenzieller Abbau und unbekannt. Für die ausgegrauten Bundesländer liegen keine Daten vor.

1.6 Quantitative Abschätzung des Einlagerungspotenzials von NET-Produkten

Da die Datenbank nur Angaben zu Flächen und nur wenige Informationen zu Abraum und Volumen enthält, wird in diesem Kapitel eine grobe Schätzung der potenziellen Volumina vorgenommen, basierend auf den geologischen Berichten und den durchschnittlichen Dichten der potenziellen Produkte (Tabelle 1) sowie den durchschnittlichen Mächtigkeiten der Gesteinsschichten .

Im Falle des NETPEC-Projekts erzeugen die verschiedenen Endprodukte unterschiedliche Massen und Volumina bei der Umwandlung von einer bestimmten Menge an Kohlendioxid. Als Basiswerte wurde das globale Ziel von 10 Gt CO_2 pro Jahr (Tabelle 1), die aus der Atmosphäre extrahiert werden sollen (Anderson and Peters, 2016) verwendet, um die spezifischen Massen zu berechnen, die sich aus der Umwandlung ergeben.



(a) Geschätzte Mächtigkeiten die für die endgültige oberflächliche Lagerung kohlenstoffreicher Produkte wie Grafit und Oxalat erforderlich sind. Das Diagramm zeigt die Beziehung zwischen notwendiger Fläche und resultierender Mächtigkeit für Grafit von 1,21 km^3 bzw. Oxalat (5,6 km^3), was einer negativen Emission von 10 Gt CO_2/a entspricht.

(b) Geschätzte erforderliche unterirdische Mächtigkeiten für die endgültige Speicherung kohlenstoffreicher Produkte für CO_2 und Oxalsäure, basierend auf den verfügbaren unterirdischen Flächen, wenn 10 Gt CO_2 aus der Atmosphäre entfernt werden würde. Das Diagramm visualisiert die unterirdische Mächtigkeit bei einer Porosität von 20% bezüglich der Fläche, um CO_2 (14,3 km^3) oder Oxalsäure (6,19 km^3) endzulagern. (Es wurde ein CO_2-Volumen von 1,43 t/m^3 bei einer Speichertiefe von 2,5 km angenommen (Kühn, 2011).

Abbildung 7: Abschätzung notwendiger Mächtigkeiten vs. notwendiger Flächen

Für Grafit ergibt sich aus der Umwandlung von 10 Gt CO_2 weltweit eine Masse von 2,72 Gt pro Jahr, für (Ca-)Oxalat eine Masse von 14,55 Gt und für Oxalsäure zu 10,23 Gt pro Jahr, die dann für eine grobe Schätzung des Speicherpotenzials in Deutschland verwendet werden können. Angenommen, nur 1% der bergbaubezogenen Flächen wären für die Endlagerung kohlenstoffreicher Endprodukte geeignet, stünden insgesamt noch 990 km^2 an der Oberfläche und 348 km^2 im Untergrund zur Verfügung. Das bedeutet, dass allein für die oberirdische Lagerung eine Fläche zur Verfügung stünde, die größer ist als die Stadt Berlin, und für die unterirdische Lagerung eine Fläche, die größer ist als die Stadt Frankfurt (Main). Unter dieser Annahme weist Deutschland in allen Fällen der anfallenden Endprodukte das Potenzial für eine Endlagerung auf.

Um die Anforderungen für die Lagerung dieser Materialien besser zu verstehen, wurde die Dicke der Oberflächen- und Untergrundschichten auf der Grundlage der verfügbaren Flächen und des Produktvolumens geschätzt (Tabelle 1, Abbildung 7a, Abbildung 7b). Grafit würde beispielsweise Oberflächenschichten mit einer Dicke von etwa 2 Metern auf kleinen Flächen bis hin zu weniger als 0,5 Metern bei zunehmender Fläche erfordern, bei einem Gesamtvolumen von 1,21 km^3 für ein Negativemissionsziel von 10 Gt. Bei Calciumoxalat, das ein größeres Volumen von 5,6 km^3 aufweist, nimmt die Dicke der Oberflächenschicht mit zunehmender Fläche ebenfalls ab, würde aber größer bleiben als die Dicke von Grafit. Diese Schätzungen der Mächtigkeit deuten darauf hin, dass selbst bei verfügbaren großen Flächen für die Entsorgung die Materialschichten relativ dünn bleiben würden.

Bei der unterirdischen Speicherung (Abbildung 7b) sieht das Szenario etwas anders aus. Die geschätzte Reservoirmächtigkeit für CO_2 beginnt bei etwa 20 Metern für kleinere Gebiete und nimmt mit zunehmender Fläche ab, basierend auf einem Gesamtvolumen von 14,3 km^3. Es würde eine Porosität von 20% im Reservoir angenommen. Ähnlich verhält es sich mit Oxalsäure, die mit einem Volumen von 6,19 km^3 eine ähnliche Mächtigkeit erfordert, die mit zunehmender Fläche abnimmt. Diese unterirdischen Mächtigkeiten sind aufgrund der größeren Volumina der jeweiligen Produkte deutlich größer als die für Oberflächenschichten.

Diese Schätzungen, die sowohl die oberirdische als auch die unterirdische Lagerung berücksichtigen, zeigen, dass die oberirdische Entsorgung für Produkte wie Grafit und Oxalat dünnere Schichten erfordert, während die unterirdische Lagerung für die gegebenen Produkte erheblich dickere Schichten erfordern würde, insbesondere für CO_2 und Oxalsäure. Dennoch bieten die in Deutschland verfügbaren oberirdischen und unterirdischen Flächen eine beträchtliche Kapazität zur Lagerung der erforderlichen Mengen an Endprodukten, wodurch die Machbarkeit der Endlagerung dieser kohlenstoffreichen Materialien gewährleistet ist.

2 AP4.2 Abschätzung potenzieller Wechselwirkungen von Endlagerprodukt und geologischem Speicher

2.1 Zielstellung das Arbeitspaketes

Ziel von AP 4.2 war es, eine Erstabschätzung bezüglich der geomechanischen als auch geochemischen Wechselwirkungen zwischen den potenziellen Einlagerungsprodukten und einem potenziellen Einlagerungsraum zu identifizieren. Dazu sollten geomechanische Modelle erstellt werden, die Endlagerszenarien spezifischer Produkte in einigen geologischen Szenarien bezüglich deren last-bedingten Wechselwirkungen auf das unterlagernde Gebirge untersuchen. Da die kohlenstoffreichen Produkte in direkten Kontakt mit dem geologischen Rahmengestein gelangen sollen, war eine Erstabschätzung potenzieller Lösungs- und Transportpfade mittels hydrogeochemischer Modelle geplant. Die Ergebnisse davon sollten auch in AP5 der Nachhaltigkeitsanalyse verfügbar gemacht werden.

2.2 Hydro-geo-chemische Untersuchungen zum Wechselwirkungspotential

Die im Antrag angedachte hydrogeo-chemische Modellierung bzw. reaktive Transportmodellierung in porösen Medien sollte mit der Standartsoftware PHREEQC erfolgen. Nach intensiver Recherche und Diskussion mit PHREEQC-Experten wurde uns gewahr, dass für die angedachten Stoffkombinationen aktuell keine Daten zu Reaktionskinetik verfügbar sind. Da der Aufwand der Generierung solcher reaktionskinetischen Daten den Rahmen des Teilprojektes sprengen würde, wurde ein anderer, experimenteller Ansatz verfolgt.

2.3 Batch-Experimente

Da eine reaktive hydro-chemisch Modellierung nicht möglich war, wurde ein klassischer hydro-chemischer Experimentalansatz verfolgt. Batchexperimente (Vaitl and Wohnlich, 2018) sind Laborversuche, bei denen bei denen ein Feststoff in einer geschlossenen Probenflasche mit einer Flüssigkeit zusammengeführt wird, um deren Wechselwirkung, wie Lösungsverhalten oder Sorption (z.B.: Johansson et al., 1998; Kleineidam et al., 1999) zu ermitteln. Mit zunehmenden Zeitabschnitten erfolgt eine Beprobung des Fluids, um eine hydro-chemische Veränderung am Fluid, z.B. Abnahme in der Flüssigphase durch Sorption, zu analysieren. Da bisher keine Erfahrungen mit den Stoffkombinationen bestanden, wurde mittels einer mehrstufigen Testserie ein experimenteller Arbeitsablauf entwickelt. Die Variablen dabei sind die Probenmenge, das Feststoff-Wasser-Verhältnis, die Dauer, bzw. die Zeitschritte des Kontakts bis zur Analyse, als auch die verwendeten Analysemethoden, je nach gewünschter Eigenschaft oder der zu bestimmenden Ionenkonzentration.

2.4 Analysemethoden

Verschiedene Analysemethoden kamen zu Etablierung des Experiment-Analyseworkflow zur Anwendung. Der pH-Wert sowie die elektrische Leitfähigkeit wurden mit einem Hach HQ40d Multimeter bestimmt. Der Gehalt des gesamten organischen Kohlenstoffs (Total Organic carbon, TOC) wurde mit dem Liquid TOC II von Elementar ermittelt. Mit dem Ionentomatograph Metrohm 882 compact IC plus wurden folgende Ionenkonzentrationen ermittelt: F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}, Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+}. Mit der Methode der Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS, Plasma Quant MS Elite von Analytik Jena) wurden folgende Ionen ermittelt: Li^+, Na^+, NH_4^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}.

2.4.1 Durchführung Batch-Experimente

Jeder batch-Versuch wurde wie folgt angesetzt und beprobt. In eine verschließbare Polyethylen-Flasche wurde der Feststoff (z.B. Grafit) eingewogen. Das entsprechende Fluid (z.B. Mineralwasser) wurde anschließend ebenfalls mit einer Präzisionswaage in die Flasche vorsichtig eingefüllt, verschlossen und anschließend auf einem Horizontal-shaker sanft bei Raumtemperatur geschüttelt. Bei jeder Beprobung wurde pH-Wert und Leitfähigkeit gemessen und ein Fluid-Probe genommen und eventuell verdünnt. In der ersten Versuchsreihe wurde das Fluid-Probenvolumen dem Gesamtvolumen (1000 ml) entnommen, war aber so gering, dass eine Störung des batch-Versuches (signifikante Verschiebung des Feststoff-Fluid-Verhältnisses) vernachlässigbar war. In Versuchsreihe 2-4 wurde für jede Probe ein separater Ansatz verwendet.

2.5 Verwendete Stoffe und analysierte Materialkombinationen

Folgende Stoffe wurden in den Batchexperimente verwendet:

- Destilliertes Wasser (dH_2O)
- Mineralwasser ($minH_2O$) Es kam das Germania Mineralwasser als Ersatz für Grundwasser zur Anwendung
- Oxalsäure-Dihydrat ($\geq$99,5%, ROTH)
- Eisen(II)-oxalat Dihydrat ($\geq$98%, ROTH)
- Grafit (natürlich, amorph, 45-50%C und 50-55% Asche, ROTH)

Um die Wechselwirkung der potenziellen kohlenstoffreichen Produkte mit dem Wirtsgestein, bzw. dem Grundwasser zu simulieren wurden folgende Materialkombinationen untersucht. Details sind in Tabelle 5 aufgeschlüsselt.

- Grafit in destilliertem Wasser
- Grafit in Mineralwasser, als Modell des Kontaktes von Grafit mit Grundwasser
- Fe-Oxalat in destilliertem Wasser
- Fe-Oxalat in Mineralwasser, als Modell des Kontaktes von Oxalat mit Grundwasser
- Quarz-Sand in Oxalsäure als Modell für Oxalsäure in einem Sandstein

2.6 Ergebnisse der Etablierung des hydro-chemischen Workflows

2.6.1 Grundkonzept

Um einen gut anwendbaren experimentellen Workflow zu etablieren, wurden vier Experimentreihen durchgeführt (Tabelle 5). Dabei wurde die Probengröße, die Konzentration, die Zeitabstände der Analysen als auch die Analysemethoden in Kombination getestet. Nach jeder Serie erfolgte die Analyse der Ergebnisse, und auf deren Basis wurden die Parameter der folgenden Serie definiert.

Tabelle 5: Übersicht der hydro-geochemischen Versuchsreihen. Als Lösungsfluid kam destilliertes Wasser (dH_2O), mineralisiertes Wasser ($minH_2O$) bzw. 10%ige Oxalsäure Dihydrat zur Anwendung. Bei den festen Stoffen handelt es sich um Grafit, Eisen(II)-oxalat Dihydrat und Quarz-Sand. Angegeben ist die die analysierte Eigenschaft, bzw. die analysierten Ionen in gelöster Form in dem Lösungsfluid.

Versuchsreihe 1	
Anzahl:	1
Konzentration:	1:10
Probengröße [ml]:	1000
Probenzeiten [h]:	0, 4, 6, 24, 48, 72, 96, 192, 388
Grafit + dH_2O:	EC, pH, F, Cl, NO_2, Br, NO_3,PO_4, SO_4, NPOC, Li, Na, Na, NH_4, K, Mg, Ca
Fe-Oxalat + dH_2O:	EC, pH, Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn
Quarzsand + Oxalsäure (10%):	-
Versuchsreihe 2	
Probenanzahl:	1
Konzentration:	1:100
Probengröße [ml]:	1000
Probenzeiten [h]:	0, 2, 4, 7, 24, 48, 168, 192, 216, 244, 588, 636
Grafit + dH_2O:	EC, pH
Fe-Oxalat + dH_2O	EC, pH, Fe, Mn
Versuchsreihe 3	
Probenanzahl:	3
Konzentration:	1:100
Probengröße [ml]:	50
Probenzeiten [h]:	0, 10, 30, 80, 310, 990, 1400, 2021
Grafit + dH_2O:	EC, pH
Grafit + $minH_2O$:	EC, pH
Ca-Oxalat + dH_2O:	EC, pH, FE, Mn
Ca-Oxalat + $minH_2O$:	EC, pH, Fe, Li, Na, NH_4, K, Mg, Ca
Versuchsreihe 4:	
Probenanzahl:	3
Konzentration:	1:1000
Probengröße [ml]:	50
Probenzeiten [h]:	0, 3, 10, 24, 34, 72, 90, 180
Fe-Oxalat + dH_2O:	EC, pH, Fe, Mn
Fe-Oxalat + $minH_2O$:	EC, pH, Fe, Mn

2.6.2 Etablierung des Workflows

Als Resultat der vier Versuchsreihen lässt sich zusammenfassen, dass sich folgende Parameter als geeignet herausgestellt haben. Als Probengröße für Batch-Experimente hat sich die Verwendung von 50 ml Probenflaschen als praktikables Maß herausgestellt und liefert ausreichend Probematerial für die Analyse. Bei der Probengröße ist die Verwendung von Triblets (3-fache Probenanzahl) gut praktikabel und lieferte sichere und nachvollziehbare Ergebnisse. Ein Mischungsverhältnis von 1:1000 ist ausreichend ist, um die methodischen Nachweisgrenzen für alle Analysemethoden deutlich zu überschreiten.

2.6.3 Lösungsverhalten, bzw. Wechselwirkungen der getesteten Stoffkombinationen

Wechselwirkung Grafit im Kontakt zu Grundwasser: Bezüglich des Kontaktes von Grafit mit Grundwasser können z.Z. keine neuen Erkenntnisse durch die Experimente dargestellt werden. Die Hauptursache ist die sehr hohe Anteil von Aschen (50-55%!) in dem kommerziell für Labore verfügbaren, als Grafit gelabelten Produkt. Die Zusammensetzung der Aschen ist leider unbekannt. Während der Lösungsexperimente konnte gelöster Kohlenstoff als auch diverse Kat- und Anionen nachgewiesen werden. Dies lässt aber keine Rückschlüsse auf das Lösungsverhalten von Grafit auszusagen. Die Grundannahme, dass Grafit unlöslich in Grundwasser ist, ließe sich nur bei der Verwendung wirklich reinen Grafits nachweisen. Solch reines Grafit war infolge der letztendlich begrenzen Zeit weder zugänglich, noch war es möglich, es näher zu untersuchen.

Wechselwirkung eines Oxalats mit Grundwasser: Auf Basis der Experimentdurchführung unter Verwendung von Fe(II)-oxalat Dihydrat lassen sich keine sofort übertragbaren Aussagen zu anderen Oxal-Salzen, also von Oxalaten in Kombination mit anderen Kationen (z.B.: Ca^{2+}, Na^{+} und NH_4^{+}) treffen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich immer um Salze der Oxalsäure handelt, kann aber eine vergleichbar hohe Löslichkeit angenommen werden. Als Nachweis der Löslichkeit kann die Konzentration von $Fe^{2}+$ in der Lösung angesehen werden, wie von den Experimenten aufgezeigt (Abbildung 8). Nach 80 Stunden kommt es nur zu einer eher geringen Zunahme der Konzentration von ca. 18 mg/l zu ca. 50 mg/l, in dem Mineralwasser. Später kommt es zu einem deutlichen Anstieg der Konzentration (ca. 400 mg/l nach 2021 h. So sind nach dem maximal untersuchten Zeitraum von 2021 h etwa 13% des Fe-Oxalats aufgelöst worden. Damit ist aber noch nicht die volle Löslichkeit erreicht. Das Experiment müsste also für einen deutlich längeren Zeitraum durchgeführt werden, bis ein Gleichgewicht, bzw. die komplette Auflösung erwartet werden kann. Beobachtet wurde eine Abnahme der Konzentration von K^{+}- und Na^{+}-Ionen. Bei den Ca^{2+} Ionen kommt es schnell zu einer Verringerung in der Lösung, welche später aber wieder leicht ansteigt. Die Konzentration von Mg^{2+} bleibt nahezu beständig. Daraus lässt sich ableiten, dass das Lösungsverhalten eines Oxalats von den hydro-geochemischen Bedingungen abhängt, und sich ein Gleichgewicht erst nach Monaten oder Jahren einstellt. Das Oxalatanion $(COO)_2^{2-}$ bevorzugt scheinbar eine Bindung mit Ka^{+} und Na^{+} zu Mg^{2+} oder Fe^{2+}. Trotz der limitierten Aussagekraft kann davon ausgegangen werden, dass langfristig (nach Jahren oder Jahrzehnten) es zu einer kompletten Auflösung des Oxalats zu Oxalsäure kommt, wenn ausreichen gering mineralisiertes Wasser dem Endlager zugeführt würde.

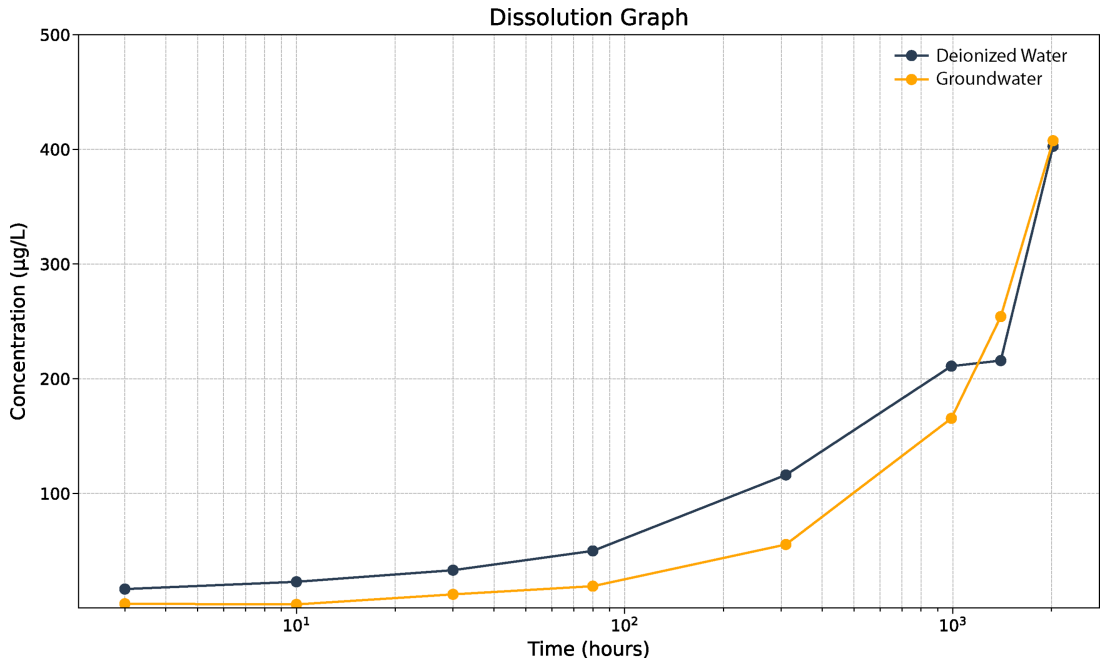


Abbildung 8: Lösungskonzentration von Eisenionen in destilliertem und mineralisiertem Wasser. Dargestellt sind Ergebnisse aus der dritten Versuchsreihe, bei welcher das Verhalten von 0,45 g Fe-Oxalat in 45 ml Fluid untersucht wurde. die letzte Messung erfolgte nach 2021 h (etwa 84 Tage).

Wechselwirkung des Quarzsandes mit der Oxalsäure: Dieses Experiment wurde in der ersten Versuchsreihe durchgeführt. Die Ergebnisse davon waren aber inkonsistent. Da Quarz ein sehr stabiles Mineral ist, kann erwartet werden, dass eine organische Säure nur extrem geringe Mengen in Lösung bringen kann. Problematisch ist die potenzielle Analyse der geringen Mengen von gelöstem Silizium in der hoch konzentrierten Oxalsäure. Das ist auch der Grund, warum keine weiteren Experimente erfolgten, und bisher noch kein Workflow entwickelt werden konnte. Es könnte in der Zukunft ein Ansatz verfolgt werden, der die Massenkonstanz des verwendeten Quarz-Sandes nach einem längeren Kontakt mit der Oxalsäure untersucht.

3 Ergänzungen zum Inhalt für den Projektträger lt. BMBF-Vordr. 0701/12.22

3.1 Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die entstandenen Ausgaben belaufen sich in Summe auf 185.500,91€. Diese setzen sich zusammen aus dem Gehalt der wissenschaftlichen Mitarbeiterin von 171.141,54€, den Beschäftigungsentgelten der studentischen Hilfskraft von 3.878,24€, Dienstreisen im Umfang von 5.396,43€ und sonstigen allgemeinen Verwaltungsausgaben von 5.084,70€. Weitere Details können der Anlage 2 zum zahlenmäßigen Nachweis nur für Ausgabenvorhaben entnommen werden.

3.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Ohne die genehmigten Projektmittel hätte das Projekt bzw. Teilprojekt nicht durchgeführt werden können. Die geleisteten Projektarbeiten sind angemessen, da die Hauptziele des Teilprojektes erreicht wurden. Es konnten nur wenige Teilaspekte nicht erbracht werden, weil diese nicht wie geplant umsetzbar waren. Die grundsätzliche Machbarkeit der Methode konnte auf dem anvisierten Niveau nachgewiesen werden.

3.3 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses und konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Aus den Ergebnissen des Teilprojektes erwachsen keine direkt monetarisierbaren Ergebnisse, was auch nie die Intention des Teilprojektes war. Die Verwertbarkeit der Ergebnisse des Teilprojektes NETPEC TU Da gliedert sich in zwei Themenbereich. 1. Stellen die Ergebnisse für das Projekt NETPEC den Nachweis, dass es potenziell ausreichend genug Flächen in Deutschland gibt, in denen geologisch (übertägig bzw. untertägig) die kohlenstoffreichen Produkte aus photo-elektro-chemischer Reduktion von CO_2 endgelagert werden können. 2. Es können die potenziellen geologischen Endlagerregionen auch für andere Produkte aus Negativemissoionstechnologien genutzt werden, egal ob es sich um bio-basierte Produkte oder andere künstliche Produkte handelt.

3.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit haben sich keine grundlegenden neuen Erkenntnisse im Feld der wissenschaftlichen Untersuchung dieses Teilprojektes ergeben.

3.5 Erfolgte und geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Folgende Publikation, Tagungsbeiträge und Datenpublikationen sind bisher veröffentlicht worden:

Diekmeier, S., Reiter, K., Friebe, C. (2023): Storage potentials for artificial CO_2 products in Germany. EGU General Assembly 2023. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-13953, 2023

Diekmeier, S. Reiter, K.: Geological Potential in Germany for the Final Disposal of Alternative Negative Emission Products, 3rd International Conference on Negative CO_2 Emissions 2024, 18-21 June 2024, Oxford, 2024

Diekmeier, S., Reiter, K., Henk, A., and Friebe, C.: Storage potentials for carbon-rich products in Germany - Database, TUdatalib repository https://doi.org/10.48328/tudatalib-1577, 2024

Diekmeier, S., Reiter, K., Henk, A., and Friebe, C.: Storage potentials for carbon-rich products in Germany – a database and outlook on final storage of products derived from negative emission technologies, Earth Syst. Sci. Data Discuss. [preprint], https://doi.org/10.5194/ essd-2024-489, 2025.

Das Manuskript, eingereicht bei Earth System Science Data Discussion wurde trotz positiver Reviews abgelehnt, da es zu sehr ein 'wissenschaftliches Paper' ist. Das Manuskript wird gerade zu Neueinreichung vorbereitet.

Literatur

Nationale Treibhausgas-Inventare 1990 Bis 2023, Tech. rep., Umweltbundesamt, 2025.

Anderson, K. and Peters, G.: The trouble with negative emissions, Science, 354, 182–183, https://doi.org/10.1126/science.aah4567, 2016.

Bickle, M. J.: Geological Carbon Storage, Nature Geoscience, 2, 815–818, https://doi.org/10.1038/ngeo687, 2009.

Bodirsky, B. L., Gawel, E., Hartmann, J., Havermann, F., Kuse, K., May, M., Montero de Oliveira, F. E., Pongratz, J., Rehfeld, K., Thrän, D., and von der Assen, N.: Die Bedeutung Einer Gezielten CO2-Entnahme Für Die Zukunft Des Europäischen Emissionshandelssystems (ETS), https://doi.org/10.5281/zenodo.14411048, 2024.

Borchers, M., Förster, J., Thrän, D., Beck, S., Thoni, T., Korte, K., Gawel, E., Markus, T., Schaller, R., Rhoden, I., Chi, Y., Dahmen, N., Dittmeyer, R., Dolch, T., Dold, C., Herbst, M., Heß, D., Kalhori, A., Koop-Jakobsen, K., Li, Z., Oschlies, A., Reusch, T. B. H., Sachs, T., Schmidt-Hattenberger, C., Stevenson, A., Wu, J., Yeates, C., and Mengis, N.: A Comprehensive Assessment of Carbon Dioxide Removal Options for Germany, Earth's Future, 12, 1–23, https://doi.org/10.1029/2023EF003986, 2024.

German Environment Agency: The Use of Natural Resources. Resources Report for Germany 2022, Yearly Report for Germany, URL `https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_the_use_of_natural_resources_2022_0.pdf`, 2022.

Hilgers, C., Schilling, F. R., Hilgers, C., and Schilling, F. R.: Kohlendioxidabscheidung und geologische Speicherung (CCS) – ein Überblick, ZDGG, 175, 89–109, https://doi.org/10.1127/zdgg/2024/0435, 2024.

Johansson, H., Siitari-Kauppi, M., Skålberg, M., and Tullborg, E.: Diffusion pathways in crystalline rock—examples from Äspö-diorite and fine-grained granite, Journal of Contaminant Hydrology, 35, 41–53, 1998.

Kleineidam, S., Rügner, H., and Grathwohl, P.: Impact of grain scale heterogeneity on slow sorption kinetics, Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal, 18, 1673–1678, 1999.

Kühn, M.: Chancen und Risiken: CO2-Speicherung, Chemie in Unserer Zeit, 45, 126–138, https://doi.org/10.1002/ciuz.201100538, 2011.

Lu, J., Partin, J. W., Hovorka, S. D., and Wong, C.: Potential risks to freshwater resources as a result of leakage from CO2 geological storage: a batch-reaction experiment, Environmental Earth Sciences, 60, 335–348, https://doi.org/10.1007/s12665-009-0382-0, 2010.

May, M. M. and Rehfeld, K.: ESD Ideas: Photoelectrochemical carbon removal as negative emission technology, Earth System Dynamics, 10, 1–7, https://doi.org/10.5194/esd-10-1-2019, 2019.

OGE - Open Grid Europe: CO2-Netz, URL `https://oge.net/de/co2/co2-netz`, [Accessed: 02-Oct-2024], 2024.

Olden, P., Jin, M., Pickup, G., Mackay, E., Hamilton, S., Somerville, J., and Todd, A.: Geomechanical Modelling of CO2 Geological Storage with the Use of Site Specific Rock Mechanics Laboratory Data, Petroleum Geoscience, 20, 323–337, https://doi.org/10.1144/petgeo2012-048, 2014.

Reinhold, K., Müller, C., and Riesenberg, C.: Informationssystem Speichergesteine Für Den Standort Deutschland - Synthese - Abschlussbericht, Tech. rep., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin/Hannover, 2011.

Statistical Offices of the Federal Government and the Federal States: Environmental economic accounts of all federal states - Indicators and key figures, URL `https://www.statistikportal.de/de/ugrdl`, 2022.

Statistical Offices of the Federal States Germany: Environmental economic accounts of the federal states 2022 - Indicators and key figures, Statistical offices of the federal states, 2022.

Vaitl, T. and Wohnlich, S.: Batch-Versuche zur Bestimmung der Sorption und Reaktionskinetik von fluoreszierenden Tracern, Grundwasser, 23, 141–153, 2018.

Vilarrasa, V. and Rutqvist, J.: Thermal effects on geologic carbon storage, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.011, 2017.