



Leitprojekt  
TransHyDE



## Zementindustrie im Wandel

Transformationspfade und zukünftige Rolle  
der CO<sub>2</sub>-Infrastruktur

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt



Finanziert von der  
Europäischen Union  
NextGenerationEU

## Autorinnen und Autoren

Maximilian Much – DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.  
Dr. Mariia Merko – DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.  
Dr. Johannes Ruppert – VDZ Technology gGmbH  
Amanda Pleier – Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH

## Disclaimer

Die im Rahmen dieser Veröffentlichung gesammelten Ergebnisse und Daten wurden im TransHyDE-Projekt Systemanalyse, gefördert vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR), in Form eines Unterauftrags durch die VDZ Technology gGmbH (VDZ) erhoben und aufbereitet. Primäres Ziel war es eine Bestandsaufnahme der deutschen und europäischen Zementindustrie zu erstellen und perspektivische Transformationspfade darzustellen. Die Inhalte und Analysen, die auf diesen Daten basieren, wurden sorgfältig geprüft. Aufgrund der Dynamik in der Forschungslandschaft kann sich der Status gelisteter Transformationsprojekte und Untersuchungen laufend ändern. Eine zeitaktuelle eigenständige Prüfung durch die Leserinnen und Leser wird daher ausdrücklich empfohlen. Die Methodik der Datenerhebung wird im Anhang vorgestellt.

Die Inhalte der Autorenpublikation wurden unabhängig vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt erstellt und spiegeln nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Wasserstoff-Leitprojekts TransHyDE wider.

## Impressum

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

## Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE

cruh21 GmbH  
Erste Brunnenstraße 1  
20459 Hamburg

Fraunhofer-Einrichtung für Energie-  
infrastrukturen und Geothermie IEG  
Gulbener Straße 23  
03046 Cottbus

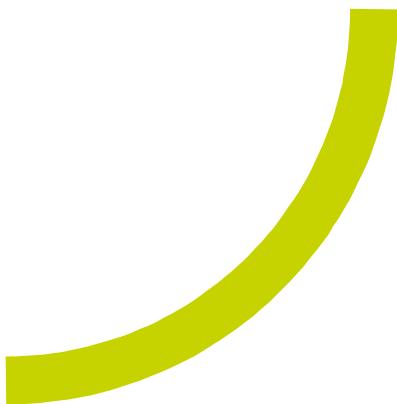
Max-Planck-Institut für Chemische  
Energiekonversion Stiftstraße 34-36  
45470 Mülheim an der Ruhr



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	S. 4
<b>Tabellenverzeichnis</b>	S. 5
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	S. 6
<b>1   Einleitung</b>	S. 7
<b>2   Europäische Zementindustrie – Status-Quo</b>	S. 8
2.1 Prozess der Zementherstellung	S. 8
2.2 Produktionsmengen und CO <sub>2</sub> -Emissionen	S. 9
2.3 Brennstoffportfolio der Gegenwart	S. 11
2.4 Transportinfrastruktur der deutschen Zementindustrie	S. 12
<b>3   Szenario 2050 – Wege zur Transformation</b>	S. 13
3.1 Ressourcenschonung und Materialeinsatz	S. 13
3.2 Brennstoffportfolio der Zukunft	S. 14
3.3 CO <sub>2</sub> -Management	S. 15
3.3.1 Verfahren zur CO <sub>2</sub> -Abscheidung	S. 15
3.3.2 Zukünftiger Energiebedarf der CO <sub>2</sub> -Abscheidung	S. 15
3.4 Übersicht zu aktuellen CO <sub>2</sub> -Infrastrukturstudien	S. 17
3.4.1 Anwendungsbasierte CO <sub>2</sub> -Infrastrukturanalyse	S. 17
3.4.2 Simulationsbasierte CO <sub>2</sub> -Infrastrukturanalyse	S. 19
<b>4   Zusammenfassung</b>	S. 21
<b>A   Anhang</b>	S. 22
A.1 Methodik & Annahmen	S. 22
A.1.1 Datenerhebung	S. 22





# Abbildungsverzeichnis

2.1	Grafische Darstellung der Zementherstellung mit verschiedenen Produktionsschritten. . . . .	9
2.2	Geographische Verteilung der Zementwerke in Europa. . . . .	10
2.3	Geschätzte Verteilung der Zementproduktion in den betrachteten europäischen Ländern im Jahr 2022. . . . .	10
2.4	Gegenüberstellung der verwendeten Brennstoffmixe bei der Zementherstellung in der EU und in Deutschland im Jahr 2022. . . . .	11
2.5	Gegenüberstellung der verwendeten alternativen Brennstoffe bei der Zementherstellung in der EU und in Deutschland. . . . .	11
3.1	Geschätzter Rohmaterialbedarf in europäischen Ländern sowie Aufteilung der Zumahlstoffe in den Jahren 2022 und 2050. . . . .	14
3.2	Brennstoffportfolio der europäischen Zementindustrie. . . . .	14
3.3	Geschätzter elektrischer und thermischer Energieeinsatz im Jahr 2022 und prognostiziert für das Jahr 2050 für die Zementherstellung in den betrachteten europäischen Ländern. . . . .	17
3.4	Entwurf des CO <sub>2</sub> -Leitungsnetzes für Deutschland aus der VDZ-Veröffentlichung „Anforderungen an eine CO <sub>2</sub> -Infrastruktur in Deutschland“ [10]. . . . .	18
3.5	Zukünftiges CO <sub>2</sub> -Leitungsnetz in Bayern 2040 aus [29]. . . . .	18
3.6	Pipelineverlauf nach Szenario C1 aus der Studie „Shaping the future CO <sub>2</sub> transport network for Europe“ vom Joint Research Centre für das Jahr 2050 [32]. . . . .	19
3.7	Ergebnisse der Simulation zur CO <sub>2</sub> -Infrastruktur des TransHyDE-Projekts Systemanalyse für Deutschland. . . . .	20
3.8	Ergebnisse der Modellierung einer CO <sub>2</sub> -Infrastruktur des TransHyDE-Projekts Systemanalyse für die EU. . . . .	20



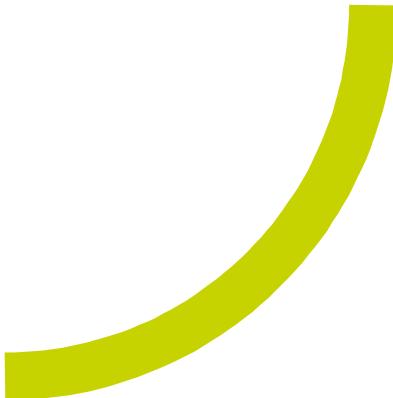


# Tabellenverzeichnis



1.1 Auflistung der in diesem Whitepaper betrachteten europäischen Länder. . . . .	7
3.1 Einschätzung der Zusammensetzung von Zement im Referenzjahr 2021 und im Jahr 2050 [9, 11, 12]. . . . .	14
3.2 Gegenüberstellung des Oxyfuel-Verfahrens und der Aminwäsche mit Monoethanolamin für die Abscheidung von CO <sub>2</sub> im Klinkerherstellungsprozess [12]. . . . .	15
3.3 Überschlagsrechnung* Sauerstoffbereitstellung durch Wasserelektrolyse für das Jahr 2050. . . . .	16
3.4 Europäische Energiebedarfsfaktoren für die CO <sub>2</sub> -Abscheidung mittels Oxyfuel-Technologie und Aminwäsche auf Basis von [10, 12]. . . . .	16
A.1 Auflistung der in diesem Whitepaper betrachteten europäischen Länder. . . . .	23
A.2 Angenommenen Eckdaten für die europäische Zementindustrie im Jahr 2021 und 2050 (Szenario 2050). . . . .	23





# Abkürzungsverzeichnis

<b>AVA</b>	Abfallverbrennungsanlage
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Calciumcarbonat
<b>CaO</b>	Calciumoxid
<b>CCS</b>	Carbon Capture and Storage
<b>CCU</b>	Carbon Capture and Utilization
<b>CCUS</b>	Carbon Capture and Utilization/Storage
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>ECRA</b>	European Cement Research Academy
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>EU-ETS</b>	Emissionshandelssystem (engl. Emissions Trading System) der Europäischen Union
<b>GJ</b>	Gigajoule
<b>GWh</b>	Gigawattstunde
<b>H<sub>2</sub></b>	Wasserstoff
<b>kWh</b>	Kilowattstunde
<b>Mio.</b>	Millionen
<b>Mt</b>	Megatonnen (Millionen Tonnen)
<b>PJ</b>	Petajoule
<b>PtX</b>	Power-to-X
<b>TRL</b>	Technology Readiness Level
<b>TWh</b>	Terawattstunde

# 1

## Einleitung

Zement gilt als elementarer Baustoff, der eine hohe gesellschaftliche Relevanz besitzt und auch in Zukunft weiterhin eine zentrale Rolle einnimmt. Gleichzeitig ist die Zementproduktion mit erheblichen prozessbedingten Emissionen von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) verbunden. Im Jahr 2019 war die Zementindustrie für rund 3 % der gesamten  $\text{CO}_2$ -Emissionen in Deutschland und für etwa 6-8 % der weltweiten  $\text{CO}_2$ -Emissionen verantwortlich [1]. Die Herausforderung besteht darin, dass diese Emissionen prozessbedingt nicht allein durch Elektrifizierung oder den Einsatz alternativer Energieträger wie Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) vermieden werden können. Deshalb gewinnen  $\text{CO}_2$ -Abscheidung und -Speicherung sowie der Aufbau einer geeigneten  $\text{CO}_2$ -Infrastruktur künftig stark an Bedeutung für die Branche.

Vor diesem Hintergrund skizziert das Whitepaper die zentralen Rahmenbedingungen und technologischen Optionen für die Transformation der Zementindustrie und die Reduktion von  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Im Kapitel *Europäische Zementindustrie – Status-Quo* wird der Stand der europäischen und deutschen Zementindustrie im Referenzjahr 2022 dargestellt. Dabei werden die wichtigsten Prozessschritte, die Produktionsstandorte sowie das verwendete Brennstoffportfolio beschrieben. Im Kapitel *Szenario 2050 – Wege zur Transformation* werden die möglichen zukünftigen Entwicklungen in der europäischen Zementindustrie vorgestellt und mit dem Status-Quo verglichen. Dafür wurden geschätzte Prozesskennwerte für das Jahr 2050 auf den in Tabelle 1.1 gelisteten geographischen Betrachtungsrahmen übertragen und in geeigneter Form visuell aufbereitet. Es zeigt auf, wie Rohstoff- und Energiebedarf, Zementzusammensetzung und Brennstoffportfolio im Jahr 2050 in Europa aussehen könnten und welche Rolle  $\text{CO}_2$ -Abscheidungstechnologien dabei spielen. Abschließend erfolgt eine Übersicht aktueller Studien zu

$\text{CO}_2$ -Infrastrukturen (vgl. Kapitel *Übersicht zu aktuellen  $\text{CO}_2$ -Infrastrukturstudien*) sowie ein Einblick in die Ergebnisse der Modellierung eines europäischen  $\text{CO}_2$ -Pipelinetzes aus dem TransHyDE-Projekt Systemanalyse.

**Tabelle 1.1.** Auflistung der in diesem Whitepaper betrachteten europäischen Länder.

Albanien	Kosovo	Rumänien
Belarus	Kroatien	Schweden
Belgien	Lettland	Schweiz
Bosnien und Herzegowina	Litauen	Serbien
Bulgarien	Luxemburg	Slowakei
Dänemark	Moldau	Slowenien
Deutschland	Niederlande	Spanien
Finnland	Nordmazedonien	Tschechien
Frankreich	Norwegen	Ukraine
Griechenland	Österreich	Ungarn
Irland	Polen	Vereiniges Königreich
Italien	Portugal	Zypern

# 2

## Europäische Zementindustrie – Status-Quo

### 2.1. Prozess der Zementherstellung

Der Prozess der Zementherstellung umfasst mehrere aufeinanderfolgende Schritte, die in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt sind. Diese lassen sich in folgende übergeordnete Produktionsphasen gliedern [2]:

- Rohstoffgewinnung und -aufbereitung
- Rohmehlgewinnung
- Zementklinkerherstellung
- Zementmahlung

Klinker ist das zentrale Zwischenprodukt in der Zementherstellung. Zu seiner Herstellung werden zu Beginn der Wertschöpfungskette Kalkstein und Mergel<sup>1</sup> im Steinbruch gewonnen und nach der Zerkleinerung in einem Mischbett gesammelt und homogenisiert. Das Rohgemisch wird im nächsten Schritt in einer Mühle zu Rohmehl feingemahlen und im Gegenstrom der heißen Abluft aus dem nachfolgenden Klinkerbrennprozess getrocknet. Nach dem anschließenden Erhitzen im Vorwärmer (gegebenenfalls mit einem Kalzinator<sup>2</sup>) und im Drehofen entsteht der Zementklinker. Die Entsäuerung des Kalksteins (Kalzinierung) findet

bei Temperaturen von 830 °C bis 950 °C statt [3]. Dabei wird in folgender chemischer Reaktion CO<sub>2</sub> aus dem Kalkstein freigesetzt: CaCO<sub>3</sub> → CaO + CO<sub>2</sub>. Diese während des Prozesses anfallenden rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen machen etwa zwei Drittel der Gesamtemissionen der Zementherstellung aus. Das restliche Drittel der anfallenden Gesamtemissionen ist im Wesentlichen auf den Einsatz des Brennstoffs in der Kalzinierung und in der Drehofenfeuerung zurückzuführen [1]. Im Drehofen wird bei Materialtemperaturen bis zu 1.450 °C das kalzinierte Gemisch zum Sintern erhitzt, wobei sich die sogenannten Klinkerphasen bilden. Unter Zugabe von Calciumsulfat, welches ausschlaggebend für das Erstarrungsverhalten des Zements ist, wird der Klinker final in Mühlen zu Zement gemahlen und abschließend als Lose oder Sack-Ware zu den Zwischen- und Endabnehmern transportiert [2].

Das Produkt Zement besteht zum Großteil aus Zementklinker und Calciumsulfat. Andere Bestandteile des Zements, die im Zementherstellungsprozess hinzugefügt werden, können Hüttensand, natürliche Puzzolane<sup>3</sup>, Steinkohleflugasche, Ölschieferabbrand<sup>4</sup> oder Kalkstein sein [2]. Die Zementzusammensetzung richtet sich hierbei nach der harmonisierten Norm EN 197-1, die 27 in Europa genormte Zementarten festlegt [4].

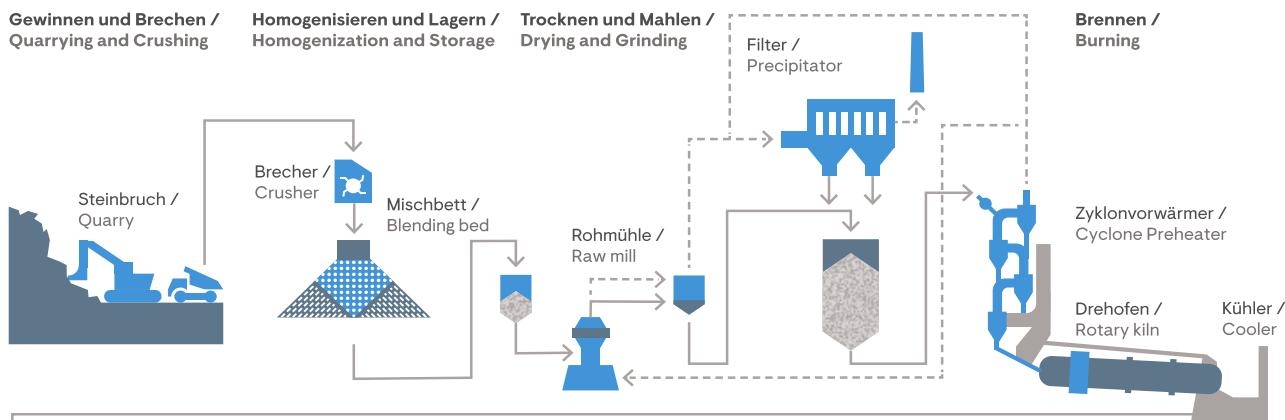
<sup>1</sup> Feinkörniges Sedimentgestein aus einer Mischung von Kalk (Calciumcarbonat) und Tonmineralen.

<sup>2</sup> Aggregat im Zementprozess, in dem Rohmehl bei etwa 850-900 °C decarbonatisiert wird, um den Drehofen zu entlasten und die Energieeffizienz zu steigern.

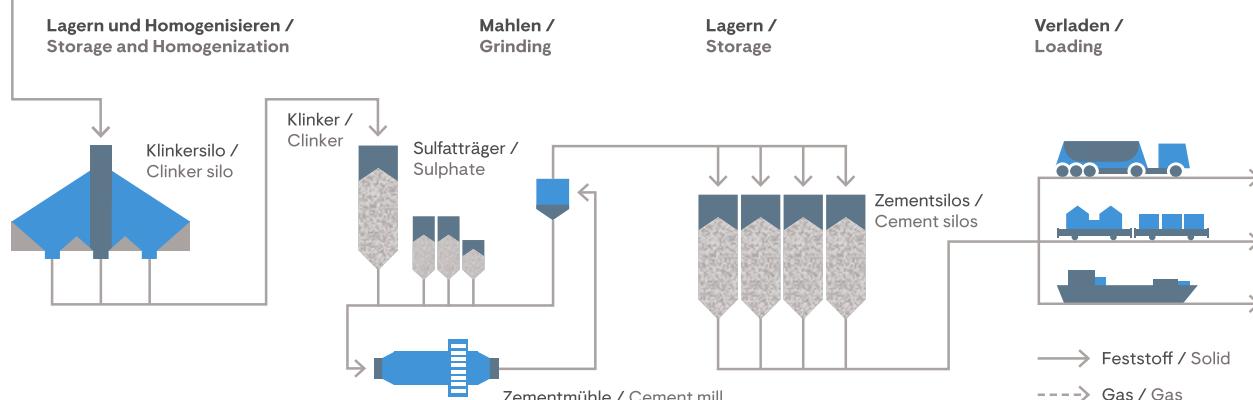
<sup>3</sup> Feinkörnige, silikatische oder silikaluminatische Materialien (natürlich oder industriell), die in Gegenwart von Wasser mit Calciumhydroxid reagieren und zusätzliche Zementsteinphasen bilden; dienen als klinkerreduzierender, festigkeitsbildender Zusatz im Zement.

<sup>4</sup> Rückstand, der nach der thermischen Verwertung (Verbrennung/Verkalkung) von Ölschiefer entsteht; besteht überwiegend aus mineralischen, kalk- und silikatreichen Aschen und kann z. B. als puzzolanischer bzw. hydraulischer Zusatzstoff in Zement genutzt werden.

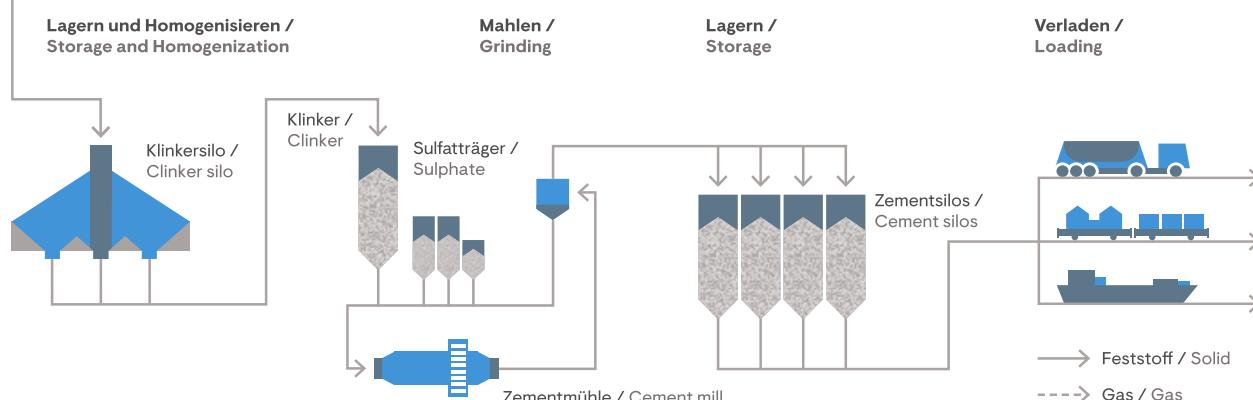
## Rohstoffe / Raw material



## Klinker / Clinker



## Zement / Cement



**Abbildung 2.1.** Grafische Darstellung der Zementherstellung mit verschiedenen Produktionsschritten. Ausgehend von der Rohstoffgewinnung oben links, bis zum Transport des fertigen Produkts unten rechts (aus [2]).

## 2.2. Produktionsmengen und CO<sub>2</sub>-Emissionen

Im Jahr 2022 waren in den betrachteten europäischen Ländern 244 Zementwerke mit integrierter Klinkerproduktion und 115 Zementmahlwerke ohne Klinkerproduktion ansässig. Das Verhältnis in Deutschland betrug 33 integrierte Zementwerke zu 19 Zementmahlwerke ohne Klinkerproduktion.

Integrierte Zementwerke vereinen die wesentlichen Prozessschritte der Zementherstellung an einem Standort. Dazu gehören die Entsäuerung (Kalzinierung) von Kalkstein, die Herstellung von Zementklinker im Drehofen sowie in der Regel die Mahlung der Ausgangsstoffe für Zement. So entsteht aus Rohmaterialien über thermische und mechanische Prozesse der Klinker, der anschließend zu Zement weiterverarbeitet wird. Zementmahlwerke hingegen konzentrieren sich ausschließlich auf die finale Produktphase: Sie mahlen und mischen Klinker mit weiteren Be standteilen (z. B. Gips, Hüttensand, Puzzolane) zur Herstellung von Zement. Im Unterschied zu integrierten Werken besitzen Zementmahlwerke keine Drehöfen und führen keine Kalzinierung oder Klinkerproduktion durch.

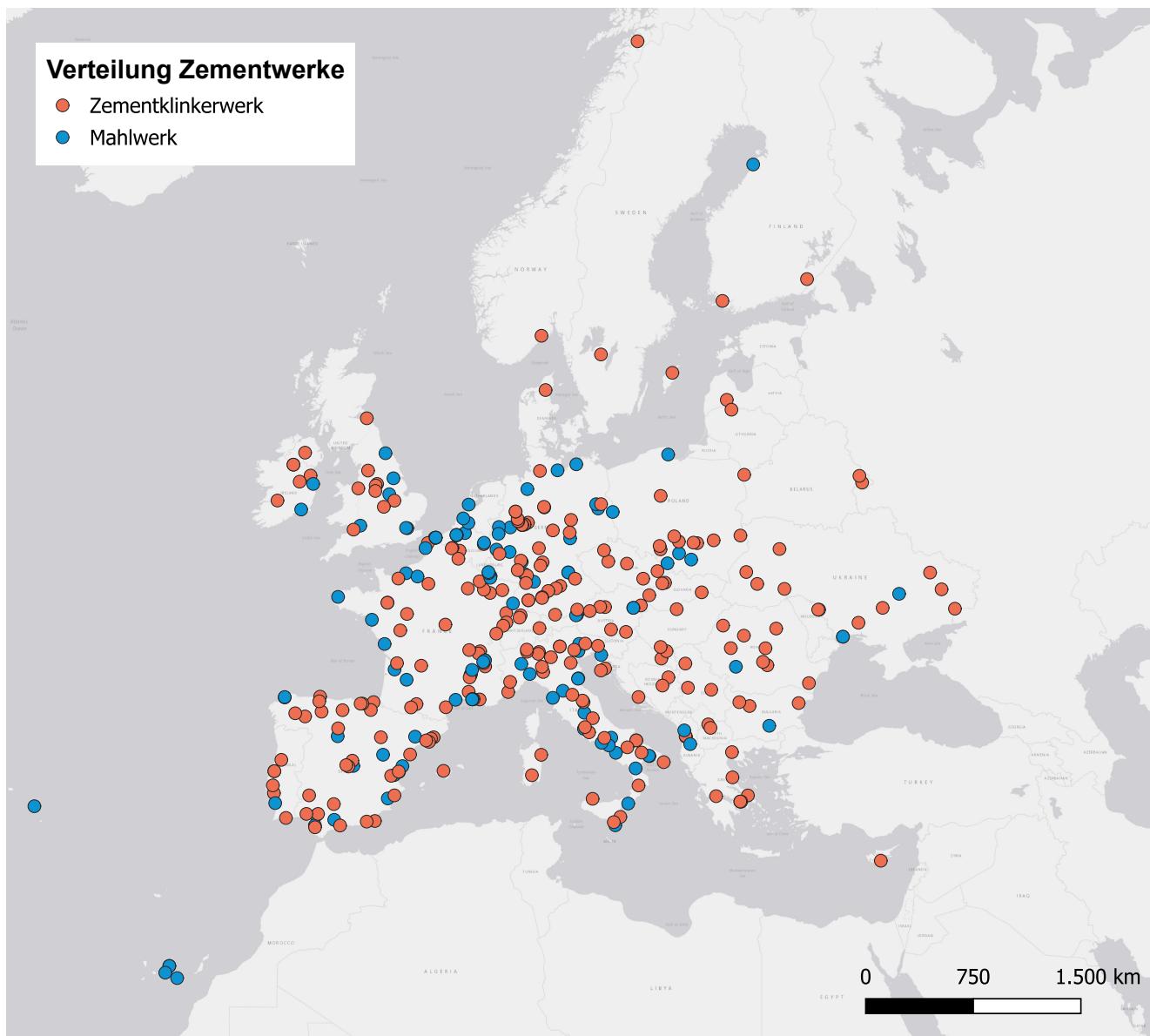
Die geographische Verteilung der Standorte ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Entsprechend der hohen gesellschaftlichen Relevanz von Zement liegt ein flächendeckend dezentrales Produktionsangebot vor. Die Zementerzeugung richtet sich häufig primär an den regionalen Markt und passt sich der Nachfrage nach Baustoffen an. Die Lage der Produktionsstandorte hängt dabei einerseits mit den lokal verfügbaren Ressourcen, wie z. B. Kalkstein, zusammen, wird jedoch andererseits in hohem Maße

auch durch die Bevölkerungsverteilung und den regionalen Bedarf an Gebäuden und Infrastruktur bestimmt.

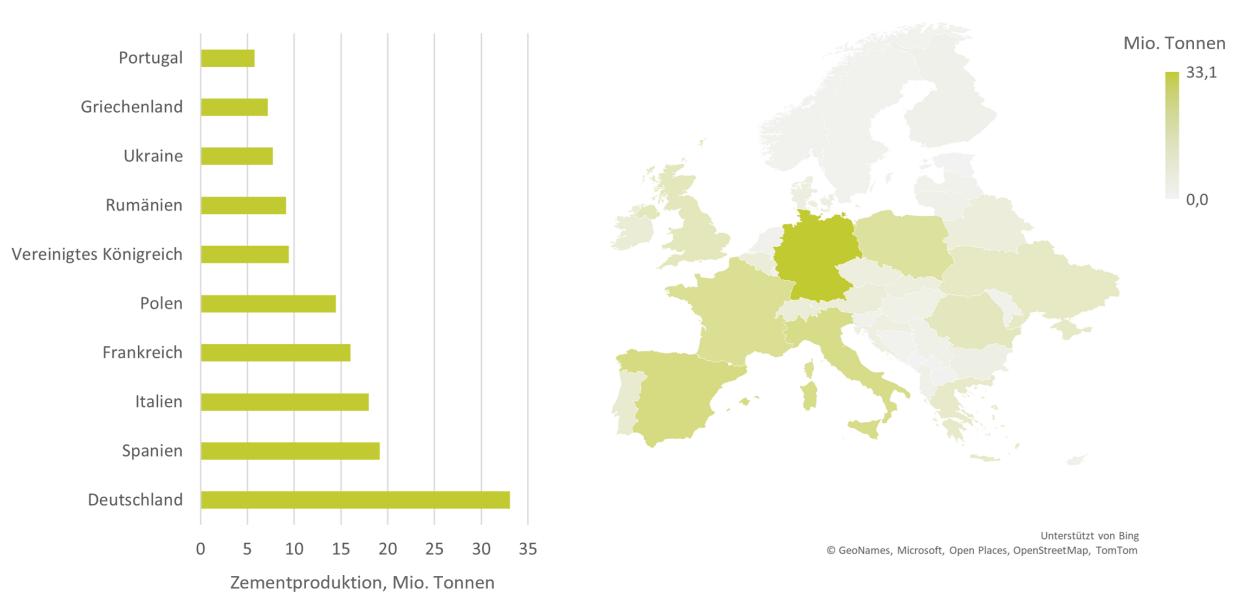
Nach Abschätzungen des VDZ lag die maximale Klinkerproduktionskapazität in den betrachteten europäischen Ländern im Jahr 2022 bei 311 Mio. Tonnen. Mit einer effektiven Klinkerproduktion von 151 Mio. Tonnen, betrug die Anlagenauslastung damit ca. 49 %. Daraus resultiert eine Zementproduktion von 197 Mio. Tonnen bei einer maximalen Kapazität von 296 Mio. Tonnen. Die geschätzte Verteilung der Zementproduktion in den europäischen Ländern ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Die höchste Produktion entfiel auf Deutschland mit etwa 33 Mio. Tonnen. Auch in Spanien (etwa 19 Mio. Tonnen), Italien (etwa 18 Mio. Tonnen), Frankreich (etwa 16 Mio. Tonnen) und Polen (etwa 14 Mio. Tonnen) wurden im betrachteten Jahr 2022 große Zementmengen produziert.

Die Zementproduktion in den betrachteten europäischen Ländern ging mit einem geschätzten elektrischen Energiebedarf von etwa 12 TWh für die Klinkerproduktion und von ebenfalls 12 TWh für die Zementmahlung sowie mit einem geschätzten thermischen Energiebedarf von 556 PJ für die Klinkerproduktion einher. Laut den Daten des Emissionsregisters im EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS) [5] und Schätzungen des VDZ konnten im Jahr 2022 insgesamt rund 132 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen der europäischen Zementindustrie angerechnet werden, davon waren etwa 13 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> biogenen Ursprungs<sup>5</sup>. Deutschland, das Land mit der höchsten Zementproduktion, war dabei für etwa 17 % (22,4 Mio. Tonnen, davon etwa 2,3 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> biogenen Ursprung) der CO<sub>2</sub>-Emissionen der europäischen Zementindustrie verantwortlich.

<sup>5</sup> Im Falle des Einsatzes biogener Brennstoffe.



**Abbildung 2.2.** Geographische Verteilung der Zementwerke in Europa. Zementwerke mit integrierter Klinkerproduktion werden in orange dargestellt, Standorte von Zementmahlwerken ohne Klinkerproduktion werden in blau gezeigt. Eigene Darstellung auf Basis der VDZ-Datensammlung im Rahmen des Unterauftrags [6].

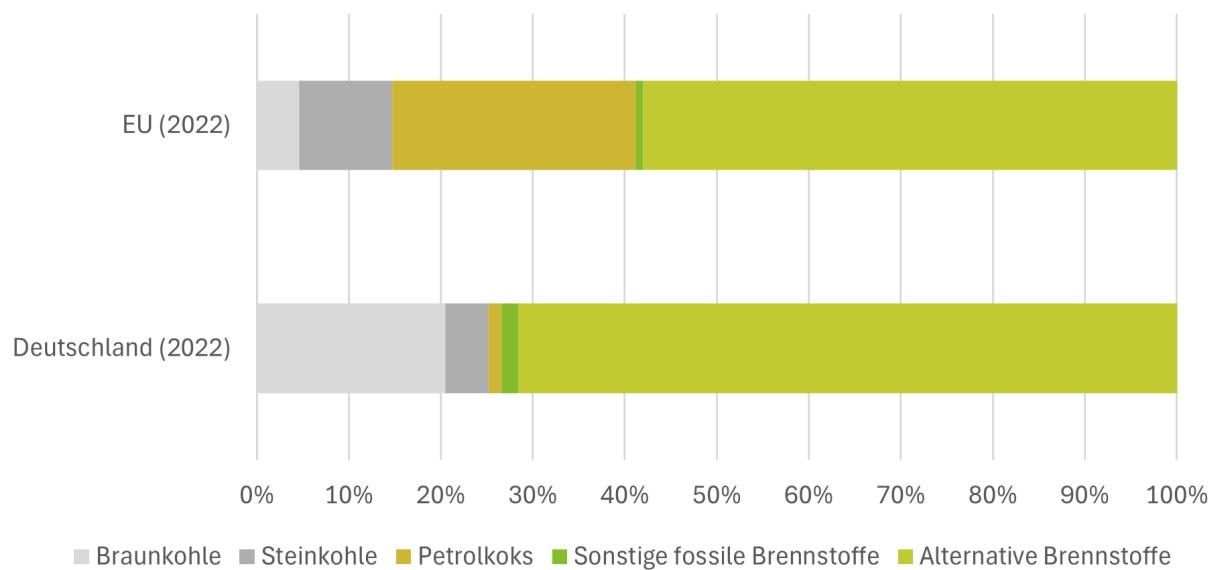


**Abbildung 2.3.** Geschätzte Verteilung der Zementproduktion in den betrachteten europäischen Ländern im Jahr 2022 (rechts). Die zehn Länder mit den höchsten Werten werden auf der linken Seite gelistet. Eigene Darstellung auf Basis der Datenanalyse des VDZ im Rahmen des Unterauftrags [6].

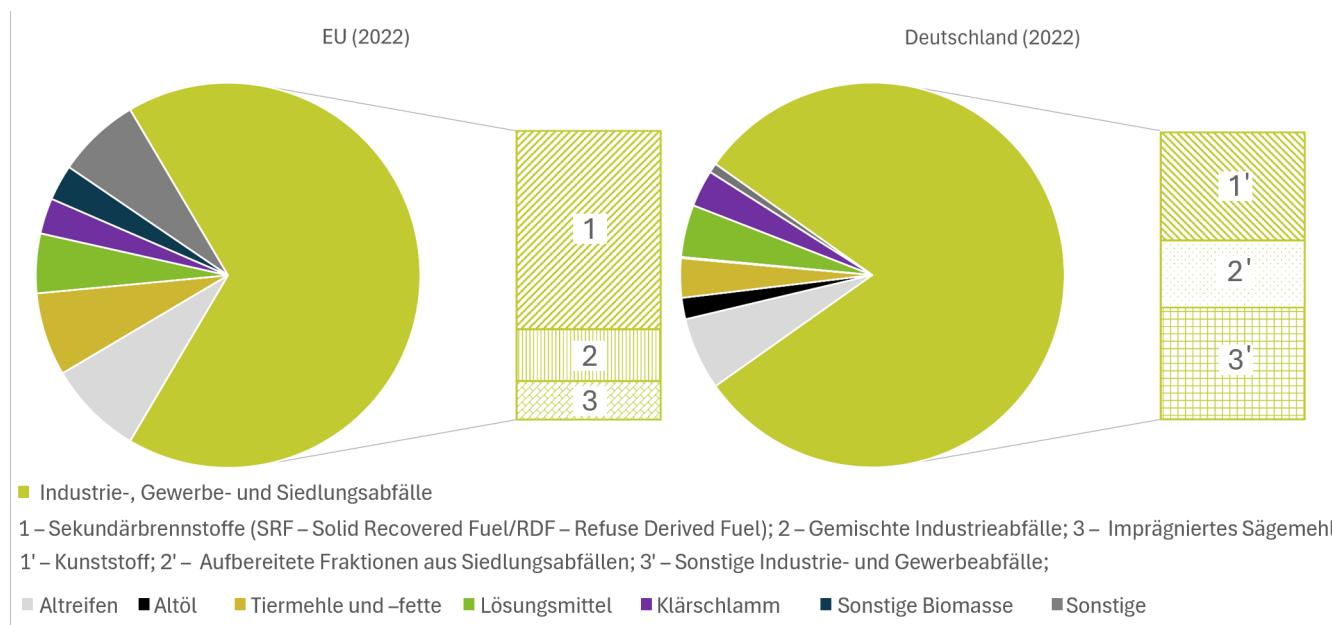
## 2.3. Brennstoffportfolio der Gegenwart

Der Brennstoffeinsatz setzt sich aus einem Mix fossiler Energieträger und alternativer Brennstoffe zusammen. Die konkrete Brennstoffnutzung bei der Zementherstellung in der EU und in Deutschland wird in Abbildung 2.4 dargestellt. Dabei unterscheidet sich der Einsatz in der deutschen Zementindustrie deutlich zu dem des europäischen Durchschnitts. Im Jahr 2022 belief sich der Anteil an fossilen Brennstoffen in Deutschland auf knapp 28 %, wohingegen der Anteil fossiler Brennstoffe im europäischen Durchschnitt etwa 42 % betrug. Der fossile Brennstoffmix in Deutschland wurde im Jahr 2022 hauptsächlich durch Braunkohle und zu geringen Anteilen durch Steinkohle bereitgestellt. In dem Brennstoffportfolio nahmen die Energieträger Petrokoks und sonstige fossile Brennstoffe – darunter Erdgas, Heizöl und Schweröl – eine im Vergleich untergeordnete Rolle ein. Auf europäischer Ebene wurden für die Wärmebereitstellung im Drehofen überwiegend Petrokoks und Steinkohle eingesetzt (37 % des gesamten Brennstoffmixes) [7, 8].

Sowohl in Deutschland als auch im europäischen Durchschnitt wurde ein Großteil des Brennstoffbedarfs durch die sogenannten alternativen Brennstoffe gedeckt. Abbildung 2.5 zeigt die Zusammensetzung des alternativen Brennstoffmixes. Dabei wird deutlich, dass in der EU wie auch in Deutschland in den jeweiligen Referenzzeiträumen über 50 % des alternativen Brennstoffmixes aus Industrie-, Gewerbe- und Siedlungsabfällen bestand. Die in Abbildung 2.5 dargestellte Aufteilung dieser Kategorie alternativer Brennstoffe unterscheidet sich aufgrund der variierenden Datengrundlagen der herangezogenen Quellen. Darüber hinaus machten im Jahr 2022 Altreifen, Tiermehle und fette, Lösungsmittel sowie Klärschlamm einen weiteren wesentlichen Anteil der alternativen Brennstoffe für die Zementindustrie aus – mit insgesamt 23 % in der EU und 17 % in Deutschland.



**Abbildung 2.4.** Gegenüberstellung der verwendeten Brennstoffmixe bei der Zementherstellung in der EU und in Deutschland im Jahr 2022. Eigene Darstellung auf Basis von [7, 8].



**Abbildung 2.5.** Gegenüberstellung der verwendeten alternativen Brennstoffe bei der Zementherstellung in der EU und in Deutschland. Eigene Darstellung auf Basis der Daten aus [7, 8].

## 2.4. Transportinfrastruktur der deutschen Zementindustrie

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland 230 Mio. Tonnen mineralische und fossile Primärrohstoffe für die Produktion von Zement und Beton eingesetzt. Dies entspricht einem Fünftel der gesamten Rohstoffentnahmen der deutschen Wirtschaft und nimmt damit einen relevanten Platz im gesamteuropäischen Warenhandel ein [9]. Nachfolgend werden die aktuell verfügbaren Transportinfrastrukturanschlüsse deutscher Zementwerke dargestellt und die möglichen Auswirkungen auf die perspektivischen Abtransporte von abgeschiedenen CO<sub>2</sub> (s. Kapitel *CO<sub>2</sub>-Management*) knapp eingegordnet.

Über einen Gleisanschluss verfügen 80 % (27 von 33) der deutschen Zementwerke. Hauptsächlich dient die Anbindung der Belieferung von Brennstoffen für den Klinkerbrennprozess und in geringen Maßen dem Versand von Zement. Um perspektivisch CO<sub>2</sub> über das Schienennetz abzutransportieren, sind insbesondere neue Rangier- und Ladegleise notwendig, was eine Kapazitätserweiterung am Umschlagsbahnhof und den darauf folgenden ersten Streckenkilometern erfordert [10].

Vier der deutschen Zementwerke mit Klinkerproduktion weisen einen Anschluss an eine Binnenwasserstraße auf. Der Warenhandel per Binnenschiff bringt die Herausforderung mit sich zeitweise von Hoch- und Niedrigwasserereignissen abhängig zu sein, sowie sich an Schleusenöffnungszeiten orientieren zu müssen. Ein perspektivischer Abtransport von abgeschiedenen CO<sub>2</sub> mit dem Binnenschiff bedarf demnach einer standortspezifischen Analyse [10].

Sämtliche Zementwerkstandorte verfügen über Straßenverkehrsanbindungen für LKW, worüber auch überwiegend der Zementversand erfolgt. Als potenzieller CO<sub>2</sub>-Transportvektor wird der LKW angesichts der begrenzten Kapazitäten im Vergleich zu den immensen CO<sub>2</sub>-Emissionen keine relevante Rolle spielen [10].

Aufgrund der hohen anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementherstellung, sind die Produktionsstandorte auf eine zuverlässige Möglichkeit der Verwertung oder des Abtransports des CO<sub>2</sub> angewiesen. Im Kapitel *CO<sub>2</sub>-Management* werden unterschiedliche Optionen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung vorgestellt. Des Weiteren wird die Notwendigkeit des Anschlusses der Zementwerke an eine zuverlässige CO<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur herausgearbeitet. Im Kapitel *Übersicht zu aktuellen CO<sub>2</sub>-Infrastrukturstudien* werden unterschiedliche Konzepte für CO<sub>2</sub>-Transportinfrastrukturen vorgestellt.

# 3

## Szenario 2050 – Wege zur Transformation

Angesichts der unvermeidbaren prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen und des hohen Energiebedarfs steht die Zementindustrie vor erheblichen Herausforderungen beim Erreichen der Klimaziele. Die wichtigsten Anpassungsbereiche sind Ressourcenschonung und Materialeffizienz, das Brennstoffportfolio sowie die Anwendung von CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien in Verbindung mit dem Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur.

Im durchgeführten Unterauftrag des VDZ wurde der Status-Quo der europäischen Zementindustrie einer standortbasierten Prognose gegenübergestellt. Betrachtet wurden dabei die gesamte Produktion, die Energiebedarfe, sowie das Rohstoff- und Brennstoffportfolio der Zementwerke für den in der Einleitung eingeführten geographischen Betrachtungsrahmen. Als Grundlage dienten im Wesentlichen europäische Durchschnittswerte, sodass länderspezifische Abweichungen möglich sind. Die Ergebnisse der Analysen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

### 3.1. Ressourcenschonung und Materialeinsatz

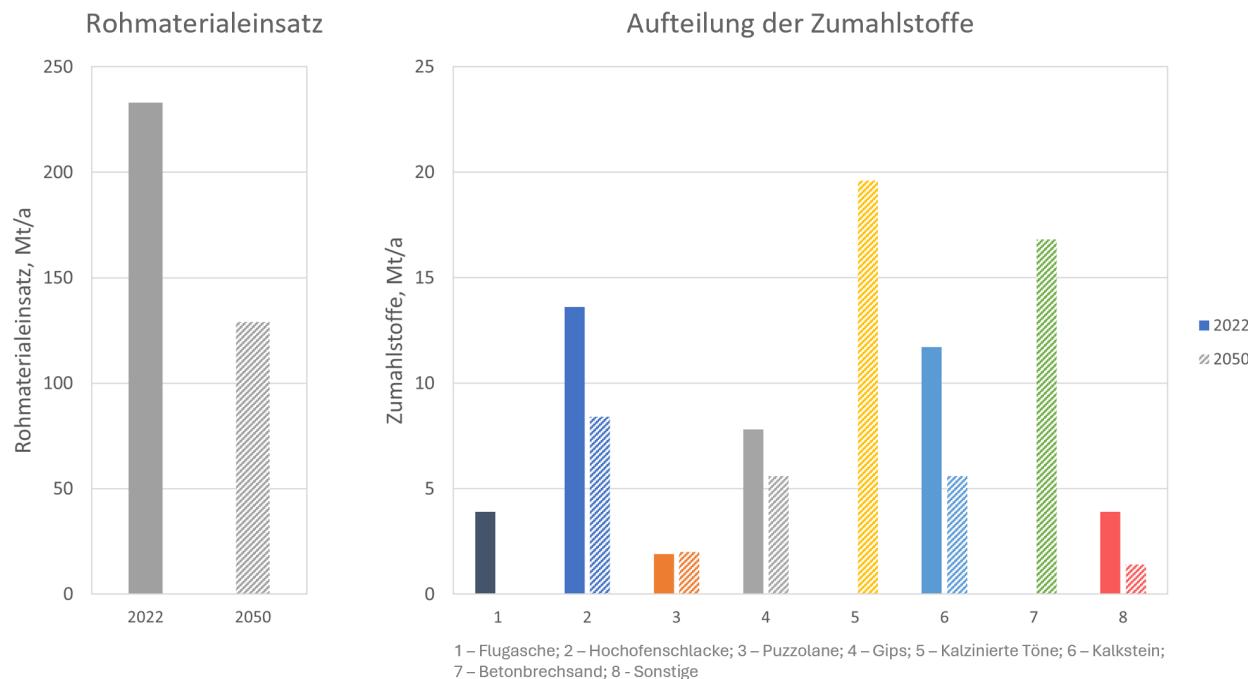
Eine wesentliche Maßnahme zur Dekarbonisierung der Zementindustrie, ist die effiziente Ressourcenanwendung und zunehmende Kreislaufwirtschaft. Das zeigt sich einerseits in Maßnahmen für eine ressourcenschonende Beton-Bauweise, andererseits kann es auch dazu beitragen, die Nutzungsdauer von Bauwerken zu verlängern sowie die verwendeten Gesteinskörnungen nach dem Rückbau wieder in den Produktionskreislauf zurückzuführen. Als maßgeblicher Treiber gelten zielorientierte politische Vorgaben. Laut VDZ könnte außerdem ein Rückgang der Baunachfrage von 5 % bis 2050 möglich sein und einen

wesentlichen Faktor zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen [9]. Prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich durch die Senkung des Klinker-Zement-Faktors und den verstärkten Einsatz von Zumahlstoffen reduzieren. Hierdurch ist ein geringerer Einsatz von Zementklinker und der damit verbundenen Entsäuerung des Kalksteins notwendig.

Die im Unterauftrag durchgeföhrte Datenanalyse des VDZ zeigt, dass der Rohstoffeinsatz in der europäischen Zementindustrie bis 2050 deutlich sinken wird – von geschätzten 233 Mio. Tonnen im Jahr 2022 auf 129 Mio. Tonnen im Jahr 2050 (vgl. Abbildung 3.1). Dabei wird angenommen, dass die Klinkerproduktion in einem Szenario zur Klimaneutralität bis 2050 von 151 Mio. Tonnen im Jahr 2022 auf 83 Mio. Tonnen reduziert wird. Die Zementproduktion weist in diesen Prognosen denselben Trend auf und geht in diesen um fast 30 % zurück – von 197 Mio. Tonnen im Jahr 2022 auf 140 Mio. Tonnen im Jahr 2050 [6].

Die Zusammensetzungen von Zement im Jahr 2021 und im Jahr 2050 werden in Tabelle 3.1 gegenübergestellt. Zielwert hierbei ist das Erreichen eines Klinker-Zement-Faktors von 0,60 Tonnen Klinker pro Tonne Zement im Jahr 2050 (vgl.: 0,77 Tonnen Klinker pro Tonne Zement im Jahr 2021). Im Wesentlichen wird eine Erhöhung der verwendeten Zumahlstoffe wie kalzinierte Tone und Betonbrechsand erwartet, sowie ein Wegfall von Flugasche aufgrund des zunehmenden Ausstiegs aus der Stromerzeugung mit Steinkohle. Die geschätzten Bedarfe an Zumahlstoffen in den betrachteten europäischen Ländern im Jahr 2022 und die prognostizierten Bedarfe für das Jahr 2050 sind in Abbildung 3.1 auf der rechten Seite gegenübergestellt.

Eine exakt definierte Rohmaterialzusammensetzung ist essenziell, um den vorgegebenen Qualitätsanforderungen gerecht zu werden. Dies gilt auch für die Produktzusammensetzung und



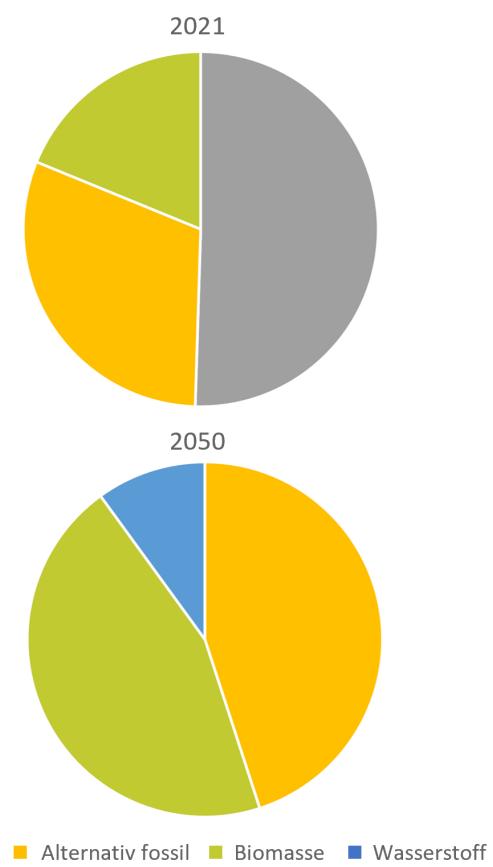
**Abbildung 3.1.** Geschätzter Rohmaterialbedarf in europäischen Ländern sowie Aufteilung der Zumahlststoffe in den Jahren 2022 und 2050. Eigene Darstellung auf Basis von [1, 11–13].

-herstellung. Hohe Anforderungen an die Produktqualität führen hierbei z. T. zu langwierigen Zertifizierungsprozessen neuartiger Betone mit angepassten Bindemittelsystemen [9, 11, 12, 14].

**Tabelle 3.1.** Einschätzung der Zusammensetzung von Zement im Referenzjahr 2021 und im Jahr 2050 [9, 11, 12].

	2021	2050
<b>Klinker</b>	77 %	60 %
<b>Zumahlststoffe</b>	23 %	40 %
Flugasche	2 %	0 %
Kalzinierte Tone	0 %	14 %
Hochofenschlacke	7 %	6 %
Kalkstein	6 %	4 %
Puzzolane	1 %	0 %
Betonbrechsand	0 %	12 %
Gips	4 %	4 %
Sonstige	2 %	1 %

Nutzung alternativer Brennstoffe gegenüber grünem Wasserstoff ist ihr Beitrag zur Abfallverwertung bei gleichzeitigem Anstieg der biogenen CO<sub>2</sub>-Mengen. Die Maßnahmen sollen den biogenen CO<sub>2</sub>-Anteil von 10 % auf 12 % erhöhen und können im Zusammenspiel mit geplanter CO<sub>2</sub>-Abscheidung durch negative Emissionen die Treibhausgasbilanz der Zementindustrie verbessern oder zu deren Finanzierung beitragen [1].



## 3.2. Brennstoffportfolio der Zukunft

Aus der Roadmap der europäischen Zementindustrie von 2020 geht hervor, dass nachhaltige Biomasse aus Abfällen auch im Jahr 2050 in hoher Verfügbarkeit vorliegen wird und ihr prozentualer Anteil als Brennstoff im Drehofen signifikant gesteigert werden kann [13]. Es wird prognostiziert, dass Biomasse und alternative Brennstoffe zusammen 90 % des europäischen Brennstoffportfolios ausmachen werden, wobei die tatsächliche Nutzung regional und standortspezifisch variiert (vgl. Abbildung 3.2). Der thermische Energiebedarf der verbleibenden 10 % soll durch Wasserstoff gedeckt werden [13]. Damit bleibt der Einsatz von grünem Wasserstoff in der Zementindustrie begrenzt – vor allem aufgrund der voraussichtlich hohen Kosten und der eingeschränkten Verfügbarkeit. Ein weiterer Vorteil einer verstärkten

**Abbildung 3.2.** Brennstoffportfolio der europäischen Zementindustrie. Eigene Darstellung auf Basis von [13, 15].

### 3.3. CO<sub>2</sub>-Management

Die Emissionen der Zementindustrie in den betrachteten europäischen Ländern lagen im Jahr 2022 bei etwa 119 Mio. Tonnen fossilem CO<sub>2</sub>. Trotz der zuvor dargestellten CO<sub>2</sub>-Reduzierungsmaßnahmen werden laut Schätzungen des VDZ durch Anwendung europäischer Durchschnittswerte bei der Entsäuerung von Kalkstein auch im Szenario 2050 rund 58 Mio. Tonnen fossiles CO<sub>2</sub> pro Jahr als nicht vermeidbare Emissionen anfallen [6].

In Deutschland wird ein analoger Emissionsrückgang von etwa 20 Mio. Tonnen fossilem CO<sub>2</sub> im Jahr 2022 auf ca. 10 Mio. Tonnen im Jahr 2050 prognostiziert. Um die Freisetzung von Prozessemissionen in die Atmosphäre zu minimieren, kommt der Abscheidung von CO<sub>2</sub> und der anschließenden Speicherung (engl. Carbon Capture and Storage, CCS) bzw. Nutzung (engl. Carbon Capture and Utilization, CCU) eine zentrale Rolle zu. CO<sub>2</sub>-Abscheidungsprojekte sind bis 2030 in bis zu 10 von 33 deutschen Zementwerken mit Klinkerproduktion geplant [16]. Auf europäischer Ebene dokumentiert die Roadmap der europäischen Zementindustrie über 30 CCUS-bezogene Projekte (engl. Carbon Capture and Utilization/Storage, CCUS) [17]. Viele weitere Projekte beziehen sich auf die Erprobung der verschiedenen Verfahren, mit dem Ziel eine schnelle technische Reife zu erreichen.

#### 3.3.1. Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung

CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien werden meist als „integrierte Verfahren“ oder „Post-Combustion“ klassifiziert. Bei integrierten Verfahren führt die bereits im Klinkerherstellungsprozess erfolgende Aufkonzentrierung des CO<sub>2</sub> zu einer besonders effizienten Abtrennung. Post-Combustion-Verfahren hingegen trennen das CO<sub>2</sub> nachträglich ab – in der Regel mit hohem thermischem Energieaufwand durch chemische oder physikalische Bindung an ein Sorptionsmittel [10]. Die European Cement Research Academy (ECRA) bietet eine tiefgehende Übersicht zum Produktpotfolio verschiedener Abscheidetechnologien inklusive Abscheidegrade, Investitionskosten und dem technologischen Reifegrade (Technological Readiness Level, TRL) [12].

#### Fokus – Aminwäsche und Oxyfuel im Vergleich

Aufgrund des hohen TRL und einer damit möglichen einhergehenden zeitnahen industriellen Realisierung liegt der Anwendungsfokus bei den Post-Combustion Verfahren aktuell auf der Aminwäsche [12, 18]. Erfahrungswerte für das Verfahren werden derzeit in einer Pilotanlage in einem Zementwerk in Brevik (Norwegen) gesammelt. Die Anlage kann jährlich etwa 400.000 Tonnen CO<sub>2</sub> auffangen, was ungefähr der Hälfte der Gesamtemissionen des Werks entspricht [19].

Bei den integrierten Verfahren wird der Oxyfuel-Technologie u. a. wegen der erhöhten Abscheiderate eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet [12, 20]. Dieses Verfahren wird erstmalig in einer Pilotanlage im Zementwerk Mergelstetten (Deutschland) im Projekt CI4C durch ein Konsortium aus vier Zementunternehmen großtechnisch erprobt [21]. Beide Verfahren werden in Tabelle 3.2 hinsichtlich der wichtigsten Parameter und Eigenschaften gegenübergestellt.

#### Synergiepotential – Sauerstoff als Nebenprodukt der Elektrolyse

Neben Luftzerlegungsanlagen könnten bei einer Wasserstoffnachfrage zusätzlich der bei der Wasserelektrolyse entstehen-

**Tabelle 3.2.** Gegenüberstellung des Oxyfuel-Verfahrens und der Aminwäsche mit Monoethanolamin für die Abscheidung von CO<sub>2</sub> im Klinkerherstellungsprozess [12].

Oxyfuel-Verfahren	Aminwäsche mit Monoethanolamin
Maximiert den CO <sub>2</sub> -Gehalt im Abgas durch Nutzung von reinem Sauerstoff bei der Feuerung. CO <sub>2</sub> -Abscheidung nach anfänglicher Aufkonzentrierung des Rauchgases auf über 80 % CO <sub>2</sub>	Trennt CO <sub>2</sub> aus dem Rauchgas eines Zementwerks (15-30 % CO <sub>2</sub> ) durch chemische Absorption an Amine und Regeneration von diesen
Hoher Abscheidegrad von über 90 % CO <sub>2</sub> aus dem Rauchgas	Abscheidegrad von 90 % bei geringem CO <sub>2</sub> -Gehalt von 20 % im Abgas
Mehr als verdoppelter elektrischer Energiebedarf bezogen auf die Klinkerproduktion, u.a. durch O <sub>2</sub> -Produktion mit einer Luftzerlegungseinheit	Geringere, dennoch signifikante Steigerung des elektrischen Energiebedarfs
Niedriger zusätzlicher thermischer Energiebedarf	Sehr hoher zusätzlicher thermischer Energiebedarf für Regeneration der Amine
Kosten für CO <sub>2</sub> -Abscheidung: 40-60 Euro pro Tonne CO <sub>2</sub>	Kosten für CO <sub>2</sub> -Abscheidung: 80-90 Euro pro Tonne CO <sub>2</sub>
Technologiereifegrad 6-7, CI4C-Projekt: 8	Technologiereifegrad > 8
Einsatz vermehrt bei Neubauprojekten aufgrund von hohen Umrüstungsbedarf	Priorisiert für erste Transformationsphase aufgrund modularer Nachrüstungsmöglichkeit

de Sauerstoff für die Oxyfuel-Abscheidung zur Verfügung gestellt werden, sofern die Produktion nahe am Abnahmestandort stattfindet. Nachfolgende Schätzrechnung (s. Tabelle 3.3) zeigt, dass bei einem Einsatz von 10 % Wasserstoff am Brennstoffmix der anfallende Sauerstoff etwa 8,5 % des Bedarfes der Oxyfuel-Abscheidung decken könnte. Aus der Rechnung wird die Notwendigkeit einer zu integrierenden separaten Luftzerlegungseinheit deutlich, um die restlichen 91,5 % Sauerstoff für den Prozess zur Verfügung zu stellen. Als weiterer Synergieeffekt resultiert aus der Sauerstoffatmosphäre des Verfahrens eine erhöhte Flammmtemperatur, die möglicherweise den Einsatz von (abfallbasierten) Brennstoffen mit niedrigem Heizwert begünstigt [22]. Die Entwicklung der Oxyfuel-Technologie für Zementwerke durch die ECRA sieht für die Temperaturregulierung allerdings eine CO<sub>2</sub>-Rezyklierung vor [23].

#### 3.3.2. Zukünftiger Energiebedarf der CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Aus den getroffenen Annahmen und den Berechnungen des VDZ geht hervor, dass sowohl der thermische als auch der elektrische Energiebedarf der Klinkerproduktion und der Zementmahlung bis 2050 sinken wird. Dies ist zum einen auf die angenommene geringere Produktion und zum anderen auf die prognostizierte Reduktion der Energiebedarfsfaktoren zurückzuführen (siehe Tabelle A.2). Allerdings ergeben sich erhebliche Steigerungen der

**Tabelle 3.3.** Überschlagsrechnung\* Sauerstoffbereitstellung durch Wasserelektrolyse für das Jahr 2050.

Klinkerproduktion <sub>2050</sub> : 83 Mio. Tonnen Klinker	
Ermittlung Sauerstoffbedarf für Oxyfuel-Verfahren in der Zementindustrie 2050	Ermittlung Sauerstoffproduktion durch Elektrolyse für Brennstoffmix der Zementindustrie 2050
Sauerstoffbedarf: 0,2 Nm <sup>3</sup> /kg Klinker [24] Massenäquivalent: 1 Nm <sup>3</sup> O <sub>2</sub> = 1,337 kg [25] ⇒ 0,2674 kg O <sub>2</sub> / kg Klinker Klinkerproduktion <sub>2050</sub> : 83 Mio. Tonnen Klinker [6] ⇒ 22.200 Tsd. Tonnen O <sub>2</sub>	Therm. Energiebedarf <sub>2050</sub> : 3.409 MJ/t Klinker [6] Klinkerproduktion <sub>2050</sub> : 83 Mio. Tonnen Klinker [6] ⇒ Therm. Energiebedarf <sub>10%</sub> : 7,9 TWh/a Heizwert H <sub>2</sub> : 33,33 kWh/kg ⇒ Wasserstoffbedarf: 237 Tsd. Tonnen H <sub>2</sub> Stöchiometrie: Pro hergestellten kg H <sub>2</sub> entstehen 8 kg O <sub>2</sub> ⇒ Menge O <sub>2</sub> = 1.896 Tsd. Tonnen O <sub>2</sub>
Anteil Nebenprodukt-Sauerstoff am Gesamtbedarf:	
$\frac{1.896 \text{ Tsd. Tonnen O}_2}{22.200 \text{ Tsd. Tonnen O}_2} = 8,5\%$	

\*Eine Schätzrechnung der DECHEMA e.V.

Energiebedarfe aus der Anwendung von Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Der elektrische Energiebedarf der europäischen Zementproduktion lag im Jahr 2022 geschätzt bei jeweils 12 TWh sowohl für Klinkerproduktion als auch die Zementmahlung; bis 2050 wird ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung eine Reduktion um 42 % auf jeweils etwa 7 TWh erwartet. Der thermische Energiebedarf geht sogar um rund 49 % zurück – von etwa 556 PJ im Jahr 2022 auf etwa 285 PJ im Jahr 2050. Eine Gegenüberstellung der errechneten Energiebedarfe der Zementherstellung auf Basis der Datenanalyse des VDZ im Rahmen des Unterauftrags ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Diese zeigt auch wie die Anwendung von CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien den zukünftigen Energiebedarf der Zementindustrie erhöhen könnte. Zur vereinfachten Einschätzung des potenziellen Energiebedarfs für den Einsatz von CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien in der Zementindustrie nimmt der VDZ im Rahmen des Unterauftrags ein Rechenbeispiel an, in dem bis zum Jahr 2050 rund 80 % des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> durch die Oxyfuel-Technologie und etwa 20 % durch die Aminwäsche erfasst werden. Grundlage bilden die in Tabelle 3.4 dargestellten spezifischen europäischen Energiebedarfsfaktoren. Länderspezifische Abweichungen durch individuelle Energiebedarfsfaktoren sind möglich.

**Tabelle 3.4.** Europäische Energiebedarfsfaktoren für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung mittels Oxyfuel-Technologie und Aminwäsche auf Basis von [10, 12].

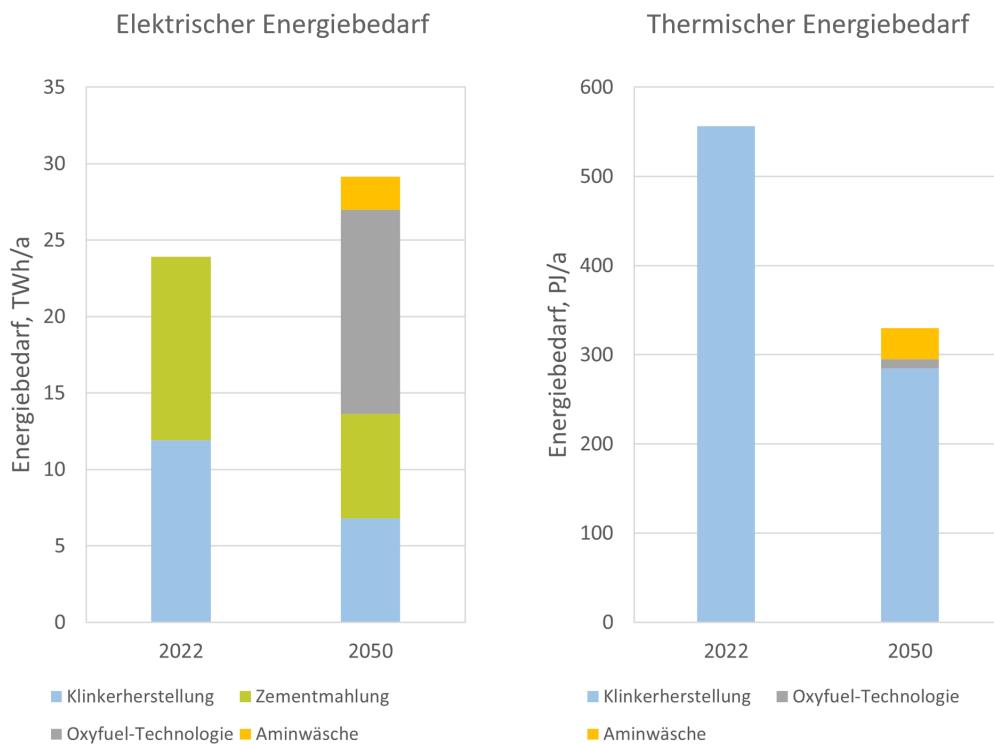
	Thermische Energie	Elektrische Energie
Einheit	GJ pro Tonne CO <sub>2</sub>	kWh pro Tonne CO <sub>2</sub>
Oxyfuel	0,265	340
Aminwäsche	3,000	190

In der Berechnung wird berücksichtigt, dass beim Oxyfuel-Verfahren zusätzlicher Strom benötigt wird, um den für den Prozess erforderlichen Sauerstoff aus der Luft zu gewinnen. Zudem entstehen bei der Aminwäsche durch den Energieeinsatz zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in der Rechnung mit 15 % in der abgeschiedenen CO<sub>2</sub>-Gesamtmenge berücksichtigt werden. Unter Anwendung dieser Annahmen auf den zu erwartenden europäischen Produktionsumfang von rund 83 Mio. Tonnen Klinker, ergibt sich für das Jahr 2050 ein zusätzlicher thermischer Energiebedarf von etwa 45 PJ pro Jahr, was einer moderaten

Erhöhung um 6,3 % gegenüber dem erwarteten thermischen Energieeinsatz der Zementproduktion im Jahr 2050 entspricht. Unter bestimmten Bedingungen kann ein Teil dieses Bedarfs durch die Nutzung verbleibender Abwärme aus Hauptprozessen gedeckt werden.

Deutlich stärker ins Gewicht fällt der zusätzliche elektrische Energiebedarf, der sich auf etwa 16 TWh pro Jahr beläuft und damit mehr als einer Verdopplung des elektrischen Energieeinsatzes der Zementproduktion im Jahr 2050 entspricht (Faktor 2,16). Durch die kombinierte Anwendung beider Abscheideverfahren wird angenommen, dass insgesamt rund 50 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> von jährlich anfallenden 57 Mio. Tonnen fossilem CO<sub>2</sub> abgeschieden werden können. Eine vollständige Abscheidung ist technologisch nicht möglich, da sowohl bei der Verbrennung als auch bei der Prozessführung stets Restemissionen entstehen, etwa durch Leckagen, unvollständige Abscheidung in den Anlagen und energetische Effizienzgrenzen der Verfahren.

Die angenommene Energiebilanz verdeutlicht, dass insbesondere der steigende Strombedarf künftig einen entscheidenden Faktor für die Transformation der Zementindustrie darstellen wird. Höhere Abscheideraten würden den Energiebedarf weiter erhöhen. Ein breites und verlässliches Angebot an erneuerbarem Strom ist daher eine zentrale Voraussetzung, um die CO<sub>2</sub>-Abscheidung in großem Maßstab umsetzen und die Emissionen der Branche langfristig reduzieren zu können.



**Abbildung 3.3.** Geschätzter elektrischer und thermischer Energieeinsatz im Jahr 2022 und prognostiziert für das Jahr 2050 für die Zementherstellung in den betrachteten europäischen Ländern. Eigene Darstellung der im Unterauftrag durchgeföhrten VDZ-Rechnung auf Basis von Daten aus [9,12,26]. Die ermittelten Bedarfe beziehen sich auf angenommene europäische Durchschnittswerte.

## 3.4. Übersicht zu aktuellen CO<sub>2</sub>-Infrastrukturstudien

Aus der Roadmap der europäischen Zementindustrie geht hervor, dass CCUS bis 2050 für 42 % der Emissionsreduzierung der Zementindustrie verantwortlich sein könnte [13]. Langfristig wird zum Abtransport abgeschiedener CO<sub>2</sub>-Mengen in Europa ein CO<sub>2</sub>-Pipelinetz als einzige umfänglich skalierbare und kostengünstigste Transportlösung angesehen [27]. In Deutschland steht das Umweltbundesamt einer kurzfristigen Realisierung jedoch aufgrund rechtlicher und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen kritisch gegenüber. Zudem wird von einer planungs-technischen Unsicherheit bezüglich der räumlichen Zusammenhänge von CO<sub>2</sub>-Quellen und Abnehmern ausgegangen [28]. In der Hochlaufphase könnte standortabhängig der Abtransport des CO<sub>2</sub> über Binnenschiffe und die Schiene erfolgen. Im Gegensatz zu Pipelines erfordert dieser diskontinuierliche Transport eine Nachverdichtung und Zwischenspeicherung, was zusätzliche Energie und Kosten mit sich bringt. LKW-Transporte sind aufgrund begrenzter Kapazitäten meist ungeeignet [10].

Für die Entwicklung einer zukunftsfähigen CO<sub>2</sub>-Infrastruktur liegen derzeit unterschiedliche Strategien und Analysen vor, die von verschiedenen Akteuren mit jeweils spezifischem Fokus erarbeitet wurden. Der VDZ bezieht in seiner Ausgestaltung einer CO<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur die Perspektive industrieller Punktquellen, insbesondere der Zementindustrie, mit ein, während die Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft (vbw) unter Durchführung der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft GmbH (FfE) regionale Rahmenbedingungen in den Vordergrund stellt.

Das Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission verfolgt hingegen einen wissenschaftlich-modellbasierten Ansatz auf europäischer Ebene. Auch das TransHyDE-Projekt Systemanalyse analysiert die CO<sub>2</sub>-Infrastruktur im Zusammenhang mit der Wasserstoffwirtschaft sowie dem geplanten Wasserstoff-Kernnetz und untersucht mögliche Synergien und Parallelen zwischen beiden Netzen.

Die methodischen Ansätze dieser Studien unterscheiden sich grundlegend. Die Studien des VDZ und der vbw setzen auf anwendungsorientierte Analysen, bei denen reale Projektvorhaben von Gasnetzbetreibern berücksichtigt werden. Demgegenüber verfolgen JRC und das TransHyDE-Projekt Systemanalyse simulationsbasierte Verfahren, die ausgehend von Quellen- und Senkeninformationen kostenoptimierte Netzverläufe modellieren und damit einem Ansatz aus Akteurs- und Systemperspektive folgen. Die folgenden Abschnitte stellen Ergebnisse ausgewählter Veröffentlichungen zu CO<sub>2</sub>-Infrastrukturen in Deutschland vor.

### 3.4.1. Anwendungsbasierte CO<sub>2</sub>-Infrastrukturanalyse

#### „Anforderungen an eine CO<sub>2</sub>-Infrastruktur in Deutschland“ – VDZ

Der VDZ hat einen Infrastrukturentwurf für das Jahr 2040 in Zusammenarbeit mit der BV Kalk<sup>6</sup>, ITAD<sup>7</sup>, OGE<sup>8</sup>, bayernets<sup>9</sup> und CapTransCO<sub>2</sub><sup>10</sup> erstellt, welcher in Abbildung 3.4 dargestellt wird. Der Entwurf fasst im Wesentlichen die Bestrebungen dreier regionaler CO<sub>2</sub>-Pipeline-Konzepte zusammen und kompletiert

<sup>6</sup> Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie

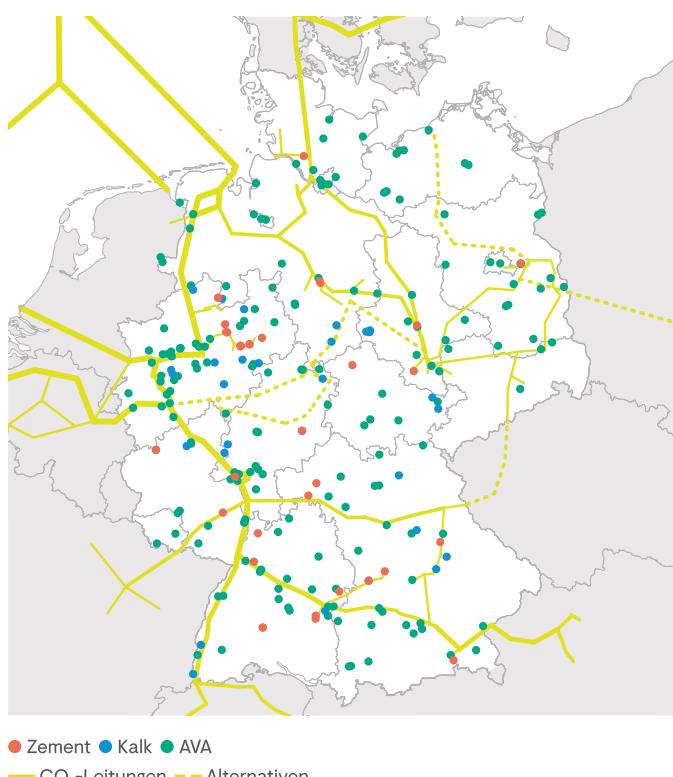
<sup>7</sup> Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland

<sup>8</sup> Open Grid Europe GmbH (Fernleitungsnetzbetreiber)

<sup>9</sup> Bayernets GmbH (Gasversorgungsunternehmen)

<sup>10</sup> Verbundprojekt, das die Machbarkeit einer klimaneutralen Industrie in Mitteldeutschland untersucht.

es mit dem Standortnetz der Zement- und Kalkindustrie sowie den Abfallverbrennungsanlagen. Fast alle berücksichtigten CO<sub>2</sub>-Quellen liegen in bis zu 50 km von dem vorgeschlagenen CO<sub>2</sub>-Pipelineverlauf entfernt, wobei der mögliche Anschluss für den Transport von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> jeweils individuell geprüft werden muss.



**Abbildung 3.4.** Entwurf des CO<sub>2</sub>-Leitungsnetzes für Deutschland aus der VDZ Veröffentlichung „Anforderungen an eine CO<sub>2</sub>-Infrastruktur in Deutschland“ [10]. Neben den Standorten der Zementproduktion, werden in der Abbildung auch Kalkwerke und Abfallverbrennungsanlagen (AVA) als unvermeidbare CO<sub>2</sub>-Quellen berücksichtigt.

Das CO<sub>2</sub>-Pipelinetz konzentriert sich vor allem auf eine ausgeprägte Westpassage entlang der industriellen Zentren am Rhein – von Ludwigshafen über das Ruhrgebiet bis hin zur unterirdischen Speicherung in geologischen Formationen der Nordsee. Auch das bayerische und das mitteldeutsche Chemiedreieck weisen eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Leitungsnachfrage auf. Das dadurch in Deutschland neu aufzubauende Leitungsnetz hat eine Länge von 4.800 km, wofür VDZ rund 14 Mrd. Euro Investitionskosten anschlägt. Dabei gilt es, die Wasserstoffinfrastruktur parallel zu planen, um gegebenenfalls anfallende Synergien bei der Planung und dem Aufbau der Infrastrukturen und verbundene Prozesse wie beispielsweise die Methanolsynthese mitzudenken [10].

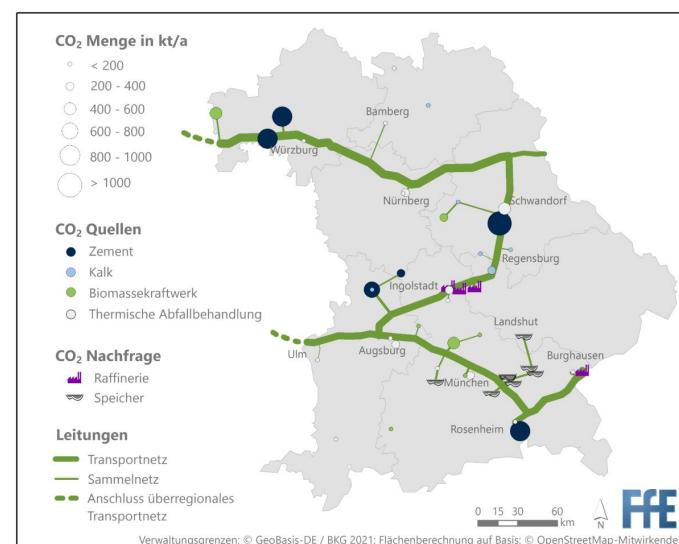
Vor allem während der Hochlaufphase von CCUS, in der die Verhältnisse zwischen CO<sub>2</sub>-Quelle und Abnehmer noch unsicher sind, wird den Transportvarianten Zug und Binnenschiff eine relevante Rolle zugeschrieben. Aufgrund infrastruktureller Gegebenheiten wird in der Zementindustrie zunächst vor allem der Zug als priorisierte CO<sub>2</sub>-Transportmittelwahl angesehen. Für den Abtransport des in der deutschen Zementindustrie abgeschiedenen CO<sub>2</sub> via Schiene ermittelte der VDZ eine notwendige Transportleistung von 5 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr, was einem Anteil von etwa 2 % des gesamten Schienengüterverkehrs 2022 entspräche (20 Ganzzüge<sup>11</sup>, mit 30 Waggons; mit 3.000 Fahrten). Das Transportmittel LKW spielt im CO<sub>2</sub>-Management aufgrund

der geringen Transportkapazitäten keine Rolle. Die Nutzung aller drei Transportoptionen bedarf einer standortspezifischen Bewertung, sodass die Schaffung notwendiger technischer Voraussetzungen auch hinsichtlich der infrastrukturellen Gegebenheiten abgewogen werden müssen [10].

### „Analyse CO<sub>2</sub>-Infrastrukturbedarf in Bayern“ – vbw

Im Auftrag der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V. (vbw) analysierte die FFE den Bedarf für ein CO<sub>2</sub>-Kernnetz in Bayern, um die für das Erreichen der Klimaziele erforderliche Abscheidung unvermeidbarer Emissionen zu ermöglichen [29]. Zieljahr der Analysen ist das Jahr 2040.

Die vbw-Studie orientiert sich ähnlich der VDZ-Studie bei der zu Grunde liegenden Analysemethode an standortscharfen Daten (wie z. B. realer Trassenverlauf bestehender Erdgasleitungen oder tatsächliche CO<sub>2</sub>-Emissionsmengen) und offiziellen Ausbauplänen der Netzbetreiber, welche schließlich zu einem Gesamtsystem aggregiert werden. Unter Berücksichtigung der fortgeschrittenen Leitungskonzeptionen der bayernets und der Open Grid Europe (OGE) sowie dem CO<sub>2</sub>-Angebot für 2040 auf Basis des Szenario E.Plan aus „Bayernplan Energie 2040 – Wege zur Treibhausgasneutralität“ [30] wurden zwei verschiedene Nachfrageszenarien untersucht, welche in ein drittes auf Akteurs-Befragungen basierendes Szenario – das Hochlauf-Szenario – eingehen.



**Abbildung 3.5.** Zukünftiges CO<sub>2</sub>-Leitungsnetz in Bayern 2040 aus [29].

Nachfolgend ein Überblick der betrachteten Szenarien:

1. Speicher-Szenario, langfristige Speicherung des CO<sub>2</sub> unter der Erde (CCS)
2. Kreislauf-Szenario, Rohstoffanwendung in der Grundstoffchemie (CCU)
3. Hochlauf-Szenario, praxisnahe Abschätzung auf Basis von Akteursaussagen

Die Szenarien berücksichtigen nachfrageseitig nicht nur die Speicherung von Kohlenstoffdioxid im Meeresboden und in bayrischen Speicherkapazitäten (Speicher-Szenario), sondern nehmen neben den heute bereits vorhandenen CO<sub>2</sub>-Nachfragen

<sup>11</sup> Güterzug, der als geschlossene, unveränderte Einheit für eine einzige Sendung/Relation fährt – ohne Zwischenrangieren oder Umladung zwischen Abgangs- und Zielbahnhof.

auch zusätzlich Raffinerien zur Produktion synthetischer Kohlenwasserstoffe als potenzielle Standorte mit CO<sub>2</sub>-Nachfrage mit in Betracht (Kreislauf-Szenario). Die Notwendigkeit alternativer Transportwege wie Zug und Schiff werden für die Hochlaufphase identifiziert, solange Bayern noch nicht an ein überregionales Leitungsnetz angeschlossen ist. Abbildung 3.5 zeigt das Infrastruktur-Zielbild 2040, welches unabhängig vom Szenario ähnlich ausgeprägt vorliegt. Unterschiede ergeben sich lediglich durch unterschiedliche Transportkapazitäten aufgrund variierender CO<sub>2</sub>-Nachfrage in den Raffinerien. Für das Hochlauf-Szenario wurden Stakeholderworkshops durchgeführt, sodass u. a. notwendige Meilensteine für die Umsetzung von CCUS zeitlich eingeordnet werden konnten.

Die ermittelte Pipelinelänge entspricht etwa 1.100 km für das Bundesland Bayern. Investitionskosten sowie laufende Kosten werden für die beiden Nachfrage-Szenarien gegenübergestellt. Der Bau eines bayerischen CO<sub>2</sub>-Transportnetzes würde demnach mindestens 1 Mrd. Euro beanspruchen. Die Studie weist auf die Dringlichkeit hin, die dafür erforderlichen Infrastrukturelemente (Abscheidetechnologie, Transport- und Speicherlösungen) rechtzeitig verfügbar zu machen. Eine aktualisierte Potenzialabschätzung bayerischer Speicherkapazitäten empfiehlt die FfE, was als Forderung im Aktionsplan CCU/CCS des bayerischen Wirtschaftsministeriums aufgenommen worden ist [31].

### 3.4.2. Simulationsbasierte CO<sub>2</sub>-Infrastrukturanalyse

#### “Shaping the future CO<sub>2</sub> transport network for Europe” – JRC

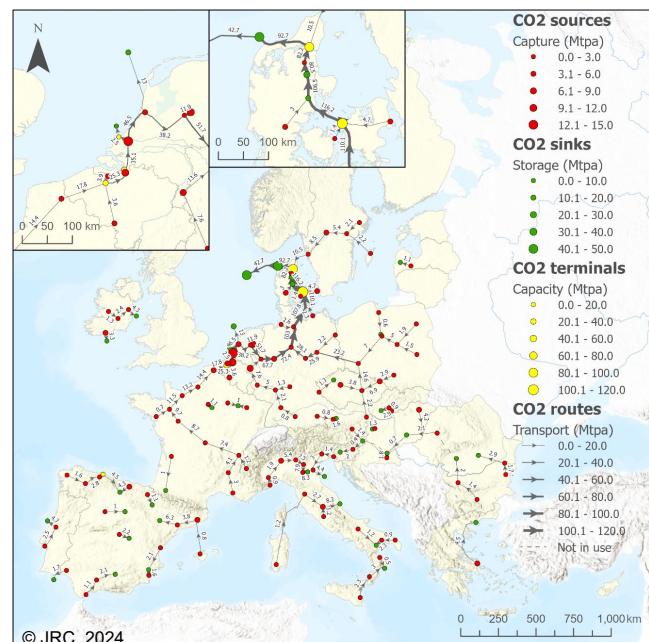
Das JRC fungiert als wissenschaftlicher Dienst der Europäischen Kommission. Im Jahr 2024 veröffentlicht diese eine modelbasierte mögliche Gestaltung des künftigen CO<sub>2</sub>-Transportnetzwerks für die EU [32]<sup>12</sup>.

Das Modellierungssystem analysiert acht unterschiedliche Szenarien für den Zeitraum von 2025 bis 2050. Die Szenarien unterscheiden sich vor allem in der Annahme der abgeschiedenen CO<sub>2</sub>-Mengen, den geographischen Betrachtungsrahmen und den vorhandenen Speicherkapazitäten in Europa. Als CO<sub>2</sub>-Quellen unterteilt das JRC die EU in 100 bis 120 Erfassungscluster. Diese setzen sich aus Standorten von Unternehmen zusammen, die konkrete CO<sub>2</sub>-Abscheidungsprojekte angekündigt haben, darunter beispielsweise Zementwerke und Raffinerien. Als Senken vervollständigen etwa 100 CO<sub>2</sub>-Speichermöglichkeiten das Modell. Neben der kostenoptimierten Simulation geeigneter Pipelinetrassen zwischen Quellen und Senken berücksichtigt das eigens entwickelte Modell auch den Transport von CO<sub>2</sub> per Schiff. Abbildung 3.6 zeigt exemplarisch den modellierten Pipelineverlauf für das Szenario C1. Dieses Szenario untersucht die Entwicklung eines CO<sub>2</sub>-Transportnetzes unter Berücksichtigung des im Net-Zero Industry Act [33] vorgeschlagenen Ziels einer Speicherkapazität von 50 Mio. Tonnen pro Jahr in der EU bis 2030.

Bis 2030 zeigen die Modellierungsergebnisse ein potenzielles europäisches Pipelinennetzwerk von 6.700 km bis 7.300 km Länge. Aus der Studie geht hervor, dass das Transportnetzwerk eine Ausweitung auf 15.000 km bis 19.000 km bis 2050 erreichen könnte. Die damit verbundenen Investitionskosten könnten sich bis 2030 zwischen 6,5 Mrd. Euro und 19,5 Mrd. Euro belaufen. Nach erfolgreicher Erweiterung des Netzwerks bis 2050 wird

von einem Kostenanstieg zwischen 9,3 Mrd. Euro und 23,1 Mrd. Euro bis 2050 ausgegangen.

Das JRC verweist darauf, dass eine europaweite kostenoptimierte Infrastruktur nur durch internationale Abstimmung, etwa bei Qualitätsstandards, erreichbar ist. Ein aktualisierter europäischer CO<sub>2</sub>-Speicheratlas wird empfohlen, um das reale Speicherpotenzial gezielt in der Trassenplanung zu berücksichtigen und den Ausbau des Pipelinennetzes auf ein erforderliches Maß zu minimieren. Ergänzend wird die mangelnde Verfügbarkeit betriebsbereiter Speicherstätten als kritischer Faktor für den Hochlauf der CO<sub>2</sub>-Infrastruktur bewertet. Zukunftsblickend kündigt JRC an, die Studie bei Verfügbarkeit neuer Daten zu CO<sub>2</sub>-Abscheidungsprojekten und Speicheroptionen kontinuierlich weiterzuentwickeln.



**Abbildung 3.6.** Pipelineverlauf nach Szenario C1 aus der Studie „Shaping the future CO<sub>2</sub> transport network for Europe“ vom Joint Research Centre für das Jahr 2050 [32].

#### TransHyDE Systemanalyse – FfE

Im Rahmen der Modellierungen des TransHyDE-Projekts Systemanalyse zur Infrastruktur von grünem Wasserstoff wurde auch eine mögliche Transportinfrastruktur für CO<sub>2</sub> modelliert. Die Modellierung umfasst die EU als zusammenhängendes Infrastrukturgeflecht. Eine Zielinfrastruktur für das Jahr 2050 wurde ermittelt. Als CO<sub>2</sub>-Quellen wurden ausschließlich die Industriezweige Zement und Kalk (mit aggregierten CO<sub>2</sub>-Mengen je Landkreis) im Infrastrukturmodell Infralnt berücksichtigt. Exportterminals und Speicherstätten (Speicherprojekte nach der International Association of Oil & Gas Producers, IOGP [34]), sowie Standorte für Methanisierung wurden als CO<sub>2</sub>-Senken in der Modellierung berücksichtigt.

Die Berechnung eines kostenoptimierten Pipelinennetzes erfolgt modellbedingt unter Ausschluss alternativer Transportmethoden, auch wenn die Schiene und der Seeweg in der Praxis sinnvolle Ergänzungen für den Transport kleiner CO<sub>2</sub>-Mengen darstellen. Eine Umwidmung von Erdgaspipelines wird ausgeschlossen, da der (kostengünstigere) flüssige Transport von CO<sub>2</sub>

<sup>12</sup> Die Autor:innen verstehen sich als Unterstützer politischer Entscheidungsträger auf wissenschaftlich fundierten Erkenntnissen und widerspiegeln nicht unbedingt die Meinung der Europäischen Kommission.

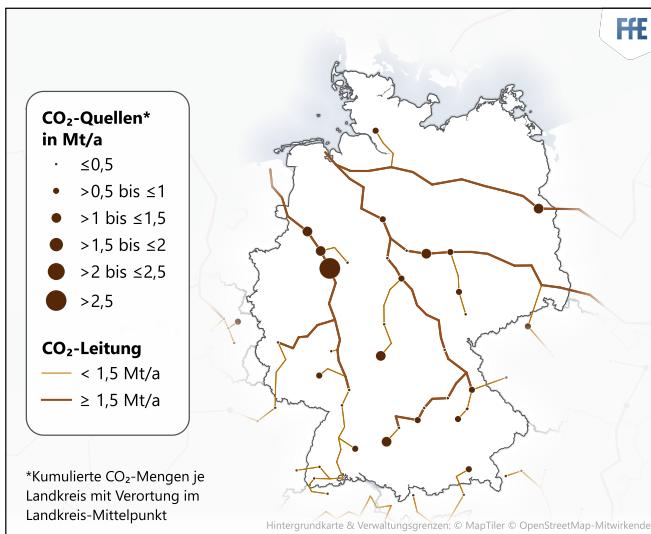


Abbildung 3.7. Ergebnisse der Simulation zur CO<sub>2</sub>-Infrastruktur des TransHyDE-Projekts Systemanalyse für Deutschland.

hohe Drücke (bis 150 bar) erfordert, auf die die meisten Erdgasleitungen nicht ausgelegt sind.

Aus der Modellierung geht für das Jahr 2050 ein 4.800 km langes Pipelinennetz für Deutschland hervor (vgl. Abbildung 3.7). Die geschätzten Investitionskosten für dieses belaufen sich auf etwa 10 Mrd. Euro. Mit zunehmender Menge des gesammelten CO<sub>2</sub> steigt auch die erforderliche Pipelinekapazität für speicher-nahe Leitungsabschnitte. Entsprechend der durchgeföhrten Modellierung des TransHyDE-Projekts Systemanalyse umfasst das europäische Pipelinennetz im Jahr 2050 ein Leitungsnetzwerk von insgesamt 37.000 km Länge (vgl. Abbildung 3.8). Neben geplanten Speicherstätten für CCS, gehen hier wiederum Standorte mit Potenzial für CCU als weitere CO<sub>2</sub>-Senke ein.

Das Potenzial zur Erzeugung von synthetischem Methan auf Basis von CO<sub>2</sub> (CCU) je Land ist dabei Ergebnis einer vorangegangenen Energiesystemanalyse und wird vor allem in Finnland, Estland und Lettland verortet aufgrund der hohen Verfügbarkeit erneuerbarer Energien. Die Nordsee stellt sich als zentrale Senke mit dem größten CO<sub>2</sub>-Speicherpotenzial heraus. Entsprechend orientieren sich die vorgesehenen Transportleitungen aus Mitteleuropa und Nordspanien vorrangig in Richtung Küste. Weiterhin bestehen Speichermöglichkeiten in Südosteuropa, woraus sich separate Infrastrukturen für Süd- und Osteuropa ergeben.

Durch die Vernachlässigung weiterer CO<sub>2</sub>-Quellen, wie thermische Abfallbehandlung und Biomassekraftwerke, stellt die modellierte CO<sub>2</sub>-Infrastruktur nur die Mindestanforderung an ein kostenoptimiertes Netzwerk dar. Zur Erhöhung der Versorgungssicherheit, sollte das kostenoptimierte Netzwerk durch eine Verknüpfung der Transportkorridore untereinander an reale Pipelineinfrastrukturen angenähert werden. Potenzielle regionale Engpässe ließen sich dabei durch eine Sensitivitätsanalyse identifizieren.

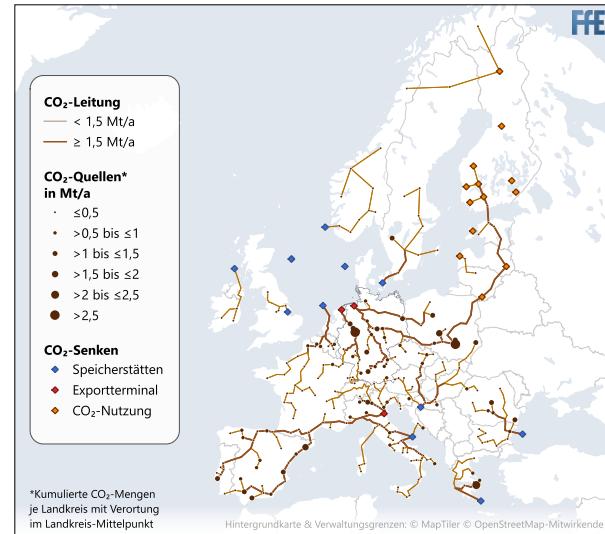


Abbildung 3.8. Ergebnisse der Modellierung einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur des TransHyDE-Projekts Systemanalyse für die EU.

# 4

## Zusammenfassung

Die Zementindustrie ist eine für die Gesellschaft unverzichtbare Grundstoffindustrie, zugleich jedoch eine der energie- und emissionsintensivsten Branchen. Im Unterschied zu anderen Industriezweigen entstehen rund zwei Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht durch den Energieeinsatz, sondern prozessbedingt bei der Entsäuerung von Kalkstein. Diese Emissionen lassen sich auch durch technologische Anpassungen nicht vermeiden. Zwar können Maßnahmen wie die Reduzierung des Klinker-Zementfaktors oder Kreislaufwirtschaft den Emissionsfaktor senken, doch bleibt die Abscheidung von CO<sub>2</sub> der zentrale Ansatz, um die Klimaziele der Branche zu erreichen. Nach Berechnungen des VDZ werden im Jahr 2050 noch etwa 58 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> im europäischen Betrachtungsrahmen anfallen, von denen rund 50 Mio. Tonnen technisch abscheidbar sein könnten.

Für die Handhabung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> wird langfristig ein Pipelinesystem als einzige skalierbare und kosteneffiziente Transportlösung angesehen, sei es zur dauerhaften Speicherung (CCS) oder zur Nutzung in industriellen Prozessen (CCU). Das Whitepaper stellt hierzu vier verschiedene Infrastrukturansätze vor und verdeutlicht, dass die Integration von Abscheidungstechnologien den Energiebedarf der Branche erheblich erhöhen würde. Um Kosten und Umfang eines künftigen Pipelinennetzes zu minimieren, sind präzisere Potenzialabschätzungen zu den CO<sub>2</sub>-Speichermöglichkeiten notwendig. Ebenso sollten mögliche Abnehmer wie die Chemieindustrie frühzeitig in die Planungen einbezogen werden, da sie auch künftig einen Kohlenstoffbedarf haben werden.

Zeitlich wird es als entscheidend erachtet, die notwendige Infrastruktur rechtzeitig bereitzustellen und zugleich europarechtliche Rahmenbedingungen, etwa im Emissionshandelssystem (ETS), so zu gestalten, dass Planungssicherheit für Investitionen entstände. Da die Produktqualität der Zementindustrie

hohen Anforderungen unterliegt, ist darüber hinaus eine enge internationale Abstimmung erforderlich, um eine europaweit kostenoptimierte und grenzüberschreitende CO<sub>2</sub>-Infrastruktur aufzubauen und so die Transformation der gesamten Branche abzusichern.

# A

## Anhang

Alle in der Studie vorgestellten Daten, Kennzahlen und Informationen wurden sorgfältig aus öffentlich zugänglichen Quellen recherchiert und zusammengetragen. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Angaben übernehmen die Autor:innen keine Gewähr. Eine zeitaktuelle eigenständige Prüfung durch die Leserinnen und Leser wird ausdrücklich empfohlen.

### A.1. Methodik & Annahmen

Nachfolgend wird die im Unterauftrag durchgeführte Vorgehensweise zur Analyse der deutschen und europäischen Zementindustrie beschrieben. Darüber hinaus wird die Herleitung der zugrunde liegenden durchschnittlichen europäischen Prozesskennwerte sowie der Energiebedarfsfaktoren erläutert.

#### A.1.1. Datenerhebung

Standortspezifische Produktionsdaten sind aus wettbewerbsrechtlichen Gründen nicht direkt verfügbar. Sie können lediglich aus veröffentlichten Umweltdaten ungefähr eingeschätzt werden, insbesondere anhand von CO<sub>2</sub>-Emissionsdaten aus dem EU-Emissionshandel [5]. Zur Orientierung durchschnittlicher produktionsspezifischer Kennwerte wurden statistische Informationen aus der Zusammenarbeit des VDZ mit dem europäischen Verband der Zementindustrie CEMBUREAU und mit der Global Cement and Concrete Association (GCCA) herangezogen. Ausgangspunkt für die Herleitung der weiteren Kennwerte, wie Rohstoffbedarfe und Energiebedarfe, sind aktuelle statistische Datensätze der Zementindustrie in Europa und eine Technologiebewertung der European Cement Research Academy in den ECRA Technology Papers 2017 [35] und 2022 [12].

Als Grundgesamtheit der für die DECHHEMA e.V. zusammen-

gestellten Excel-Datenbank [6] werden Zementwerksstandorte mit Klinkerproduktion und Zementmahlwerke ohne Klinkerproduktion angesetzt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen und die thermischen Energieeinsätze sich nahezu vollständig (> 97 %) auf die Standorte mit Klinkerproduktion beschränken. Für Zementmahlwerke wurde der elektrische Energiebedarf der Mahlprozesse eingeschätzt. CO<sub>2</sub>-Mengen wurden, der EU-ETS-Datenbank entnommen, wobei Werte für das Vereinigte Königreich von 2020 aus dem ETS entstammen. Emissionswerte von nicht EU-Ländern wurden von (Ourworldindata.org) übernommen.

Auf Basis der CO<sub>2</sub>-Emissionen der jeweiligen Standorte aus dem Jahr 2023 und den gemittelten spezifischen Werten konnten die elektrischen und thermischen Energiemengen für die Klinkerproduktion berechnet werden sowie die elektrischen Energiemengen für die Zementmahlung im Jahr 2022 abgeschätzt werden. Die Datenbank gibt zudem einen Ausblick auf die Energiebedarfe im Jahr 2050 und den zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Abscheidemengen der Zementindustrie. Die mittleren Kennwerte kommen dabei aus verschiedenen Quellen mit branchenspezifischen Statistiken (z. B. CEMBUREAU, Getting-the-Numbers-Right-Projekt der GCCA) [26, 36].

Alle im Rahmen der Zukunftsszenarien angegebenen Werte leiten sich somit lediglich indirekt aus der abgeschätzten Klinkerproduktion und ihrer Fortschreibung für 2050 ab. Als Zukunftskonzept liegen hierbei die Annahmen der Mengenentwicklung und der voraussichtlichen Technologieanwendung, z. B. Zemente mit neuen Hauptbestandteilen oder Carbon Capture Management, nach den Roadmaps der europäischen Zementindustrie zugrunde [11, 13].

## Geographischer Scope im Szenario 2050

Der geographische Scope von dieser Studie umfasste die folgenden europäischen Länder:

**Tabelle A.1.** Auflistung der in diesem Whitepaper betrachteten europäischen Länder.

Albanien	Kosovo	Rumänien
Belarus	Kroatien	Schweden
Belgien	Lettland	Schweiz
Bosnien und Herzegowina	Litauen	Serbien
Bulgarien	Luxemburg	Slowakei
Dänemark	Moldau	Slowenien
Deutschland	Niederlande	Spanien
Finnland	Nordmazedonien	Tschechien
Frankreich	Norwegen	Ukraine
Griechenland	Österreich	Ungarn
Irland	Polen	Vereinigtes Königreich
Italien	Portugal	Zypern

## Annahmen im Szenario 2050

Tabelle A.2 fasst die geschätzten Prozessparameter der europäischen Zementindustrie zusammen, die im Rahmen der Analysen dieser Studie verwendet wurden. Die dargestellten Prozesskennwerte sind als Durchschnittswerte für den Referenzraum Europa (siehe Abschnitt Geographischer Scope im Szenario 2050) zu verstehen.

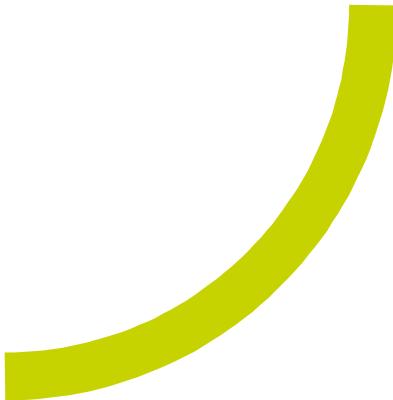
## Beschreibung und Herleitung der Prozessparameter

Die Klinkerproduktion von 151 Mio. Tonnen Klinker im Jahr 2022 in Europa in den betrachteten europäischen Ländern ist verbunden mit 119 Mio. Tonnen anfallenden fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Daraus resultiert ein CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von 0,79 Tonnen fossiles CO<sub>2</sub>/t Klinker. Unter der Annahme verschiedener Emissionseinsparmaßnahmen wie der weiteren Reduzierung des Klinkeranteils im Zement und einer effizienteren Zementnutzung im Bauwesen prognostiziert VDZ im Rahmen des Unterauftrags,

dass bis zum Jahr 2050 nur noch 48 % der heutigen prozessbedingten Emissionen anfallen werden. Mit einer erwartenden europäischen Klinkerproduktion von 83 Mio. Tonnen ergäbe sich in Zukunft ein reduzierter Emissionsfaktor von 0,69 t fossiles CO<sub>2</sub>/t Klinker. Für die Jahre 2022 und 2050 wird der Rohmaterialeinsatz mit einem Faktor von 1,55 t Rohmaterial pro Tonne Klinker angesetzt, basierend auf den Standardfaktoren der Global Cement and Concrete Association. Hieraus ergibt sich ein geschätzter Rohmaterialeinsatz in Europa von 233 Mio. Tonnen im Jahr 2022 und 129 Mio. Tonnen im Jahr 2050. In den Analysen orientiert sich der VDZ an einem elektrischen Energiebedarfsfaktor von 122 kWh/t Zement. Bei einer Energiebedarfsverteilung von 50 % für die Zementmahlung und 50 % für die Klinkerherstellung, ergibt sich ein Energiebedarf von ca. 11.994 GWh/a für die Zementmahlung (61 kWh/t Zement) und ca. 11.924 GWh/a für die Klinkerproduktion (79,2 kWh/t Klinker) unter Berücksichtigung eines Klinker-Zementfaktors von 0,77 t Klinker/t Zement. Weitere Zement-Hauptbestandteile machen im Jahr 2021 23 % aus und setzen sich aus Gips, inertem Kalkstein, Hüttensand, kalzinierten Ton und weiteren Puzzolanen zusammen. Diese sogenannten Zumahlstoffe werden genutzt, um den Klinkerfaktor zukünftig zu senken und eine CO<sub>2</sub>-Reduzierung herbeizuführen. Für das Jahr 2050 wird entsprechend ein niedrigerer Klinker-Zementfaktor von 0,6 t Klinker/t Zement angestrebt (siehe Ressourcenschonung und Materialeinsatz). Damit einher geht eine Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs der Zementmahlung auf 60 % u.a. aufgrund leistungsfähigerer Zemente. Daraus ergibt sich ein prognostizierter elektrischer Energiebedarf von 6.830 GWh/a für die Zementmahlung (73,2 kWh/t Zement) und zunächst 6.786 GWh/a für die Produktion von zu erwartenden 83 Mio. Tonnen Klinker (81,3 kWh/t Klinker) ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Thermische Energie wird für die Sinterung des Rohmehls im Drehofen genutzt. Der angenommene Energiebedarfsfaktor lag im Jahr 2022 bei 3.696 MJ/t Klinker. Ohne Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung fände bei geringer Produktionsmenge eine Reduzierung des absoluten thermischen Energiebedarfs um 49 % bis 2050 im Vergleich zum Referenzjahr 2022 statt. Bei einer erwartenden Produktion von 83 Mio. Tonnen Klinker im Jahr 2050 wird demnach ein relativer thermischer Energiebedarfsfaktor von 3.409 MJ/t Klinker angenommen.

**Tabelle A.2.** Angenommenen Eckdaten für die europäische Zementindustrie im Jahr 2021 und 2050 (Szenario 2050).

Parameter	2021	2050	Quelle
CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor	0,79 t fossiles CO <sub>2</sub> / t Klinker	0,69 t fossiles CO <sub>2</sub> / t Klinker	[1, 15]
Elektrischer Energiebedarfsfaktor	79,2 kWh/t Klinker 61 kWh/t Zement	81,3 kWh/t Klinker 48,4 kWh/t Zement	[12, 37], VDZ-Expertise
Thermischer Energiebedarfsfaktor	3.696 MJ/t Klinker	3.409 MJ/t Klinker	[9, 15], VDZ-Expertise
Zumahlstoffe	0,23 t Zumahlst./t Zement	0,4 Zumahlst./t Zement	[9, 11, 12]
Alternative Brennstoffe	46 % (Deutschland 70%)	90 %	[13, 15]
Biogener CO <sub>2</sub> -Anteil in DE	10 %	12 %	[1]
Klinker-Rohmaterialeinsatz	1,55 t Rohmaterial / t Klinker	1,55 t Rohmaterial / t Klinker	[38]
Klinker-Zementfaktor	0,77 t Klinker / t Zement	0,60 t Klinker / t Zement	[13], VDZ-Annahme
Klinkerproduktion	151 Mio. t/a	83 Mio. t/a	[6]
Zementproduktion	197 Mio. t/a	140 Mio. t/a	[6]



# Literaturverzeichnis

- [1] Dr. Martin Schneider et. al, "Dekarbonisierung von Zement und Beton," [https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie\\_Dekarbonisierung\\_von\\_Zement\\_und\\_Beton.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_von_Zement_und_Beton.pdf), Nov. 2020, Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ).
- [2] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), "Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2024," Sep.
- [3] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), *Zement-Taschenbuch, 51. Ausgabe*. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2008.
- [4] Heidelberg Materials, "1.2 Zement nach DIN EN 197-1," <https://www.betontechnische-daten.de/de/zement/nach-din-en-197>, zugegriffen: 17. Oktober 2025.
- [5] European Commission, "Union Registry Public Website," <https://union-registry-data.ec.europa.eu/>, zugegriffen: 3. Mai 2025.
- [6] Dr. Johannes Ruppert und Hannah Bruhns, "Zement-Datenbank-VDZ Europaweite Standorte der Zementindustrie Im Auftrag des TransHyDE-Projekts," VDZ Technology gGmbH, Dec. 2023.
- [7] Cembureau, "Cembureau Key Facts & Figures," <https://cembureau.eu/media/ry0n3azn/key-fact-figures-publication-june-2025.pdf>, Jun. 2025.
- [8] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), "Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2022," <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2022>, Jul. 2023.
- [9] Dr. Martin Schneider et. al, "Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton - Potenziale und Handlungsstrategien," <http://www.vdz-online.de/ressourcenschonung>, Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ).
- [10] Dr. Martin Schneider et. al, "Anforderungen an eine CO2-Infrastruktur in Deutschland," <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/klimaschutz/co2-infrastruktur>, Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ).
- [11] Desi Corbett, "GCCA's concrete road to the future," <https://concreteinstitute.com.au/gccas-concrete-road-to-the-future/>, Concrete Institute of Australia, Zugegriffen: 7. Januar 2025.
- [12] European Cement Research Academy GmbH, "The ECRA Technology Papers 2022 - State of the Art Cement Manufacturing Current technologies and their future development," <https://www.ecra-online.org/research/technology-papers>, 2022.
- [13] CEMBUREAU, "Cementing the European Green Deal - Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050," [https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap\\_final-version\\_web.pdf](https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf), zugegriffen: 7. Januar 2025.
- [14] "Deutscher Bundestag, „Technologieabschätzung (TA). Alternative Technologiepfade für die Emissionsreduktion in der Grundstoffindustrie," [https://www.bundestag.de/resource/blob/1005502/126d7ee8674e6769f00e69d5975a14c6/20\\_10556.pdf](https://www.bundestag.de/resource/blob/1005502/126d7ee8674e6769f00e69d5975a14c6/20_10556.pdf), 29.05.2024."
- [15] CEMBUREAU, *Light Report 2021*, Brüssel, 2023. [Online]. URL: <https://gccassociation.org/grn/>

- [16] "Map of Innovation Projects," <https://cembureau.eu/innovation/map-of-innovation-projects/>, zugegriffen: 7. Januar 2025.
- [17] "From Ambition to Deployment - The road travelled, pathways and leversto scale up our Net Zero Ambition," <https://cembureau.eu/media/ulxj5lyh/cembureau-net-zero-roadmap.pdf>, zugegriffen: 7. Januar 2025.
- [18] Deutscher Bundestag - Wissenschaftliche Dienste, "Methoden des Kohlenstoffmanagements," <https://www.bundestag.de/resource/blob/1025894/WD-5-111-24-pdf.pdf>, Sep. 2024, zugegriffen: 3. November 2025.
- [19] "Ein Meilenstein in der Zementindustrie," <https://www.heidelbergmaterials.de/de/nachhaltige-baustoffe/evozero-carbon-captured-net-zero-zement>, Heidelberg Materials, Zugegriffen: 3. November 2025.
- [20] Global Cement and Concrete Association, "Oxyfuel," <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/carbon-capture-and-utilisation/oxyfuel/>, zugegriffen: 3. November 2025.
- [21] "Pressemitteilung: 07.11.2022 Forschungsprojekt ‚catch4climate‘: Bau der CO2-Abscheide-Anlage in Mergelstetten gestartet – CI4C," <https://catch4climate.com/pressemitteilung-07-11-2022-forschungsprojekt-catch4climate-bau-der-co2-abscheide-anlage-in-mergelstetten-gestartet/>, zugegriffen: 11. März 2025.
- [22] P. Viehbein, D. Schüwer, G. Holtz, A. Pastowski, J. Klingen, S. Steger, and A. Aydemir, "Dekarbonisierung der industriellen Produktion (Dekarblnd). AP 1: Ganzheitliches Bewertungsschema für Technologien," Jan. 2024. [Online]. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/05\\_2024\\_cc\\_dekarblnd\\_tb1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/05_2024_cc_dekarblnd_tb1.pdf)
- [23] European Cement Research Academy, „ECRA CCS Project: Report on Phase IV.A“, [https://api.ecra-online.org/fileadmin/files/ECRA\\_Technical\\_Report\\_CCS\\_Phase\\_IV\\_A.pdf](https://api.ecra-online.org/fileadmin/files/ECRA_Technical_Report_CCS_Phase_IV_A.pdf), 2016.
- [24] D. R. Nhuchhen, S. P. Sit, and D. B. Layzell, "Decarbonization of cement production in a hydrogen economy," *Appl. Energy*, vol. 317, p. 119180, Jul. 2022.
- [25] "Linde Gas GmbH - Gaseumrechner," <https://www.linde-gas.at/shop/de/at-ig/gaseumrechner>, zugegriffen: 11. März 2025.
- [26] "GNR 2.0 - GCCA in Numbers," <https://globalabc.org/resources/publications/gcca-gnr-20-gcca-numbers>, GCCA Global Cement and Concrete Association, Zugegriffen: 7. Januar 2025.
- [27] "Pipelines for CO2 transport cheapest option: Heidelberg," <https://www.argusmedia.com/de/news-and-insights/latest-market-news/2683520-pipelines-for-co2-transport-cheapest-option-heidelberg>, zugegriffen: 3. November 2025.
- [28] D. Schüwer, G. Holtz, V. Espert, and P. Warnke, "Dekarbonisierung der industriellen Produktion (Dekarblnd)," [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/07\\_2024\\_cc\\_dekarblnd\\_tb3.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/07_2024_cc_dekarblnd_tb3.pdf), Jul. 2024, Umweltbundesamt.
- [29] A. Pleier, H. Kracht, and Dr.-Ing. Andrej Guminski, "Analyse CO2-Infrastrukturbedarf in Bayern," [https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2024/Downloads/Studienupdate\\_CO2-Infrastrukturbedarf-in-Bayern\\_final.pdf](https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2024/Downloads/Studienupdate_CO2-Infrastrukturbedarf-in-Bayern_final.pdf), Nov. 2024, Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V.
- [30] A. Guminski et. al, "Bayernplan Energie 2040 - Abschlussbericht: Wege zur Treibhausgasneutralität," 2023.
- [31] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, "Aktionsplan CCU/CCS zum Carbon Management in Bayern," [https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user\\_upload/stmwi/publikationen/pdf/2025-07-16\\_AktionsplanCCUCCS\\_Layout.pdf](https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/publikationen/pdf/2025-07-16_AktionsplanCCUCCS_Layout.pdf), 2025.
- [32] D. Tumara, A. Uihlein, and I. Hidalgo, "Shaping the future CO2 transport network for Europe," in EUR, no. 31835, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024.
- [33] European Commission, "Net Zero Industry Act," [https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/net-zero-industry-act\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/net-zero-industry-act_en), Mar. 2023.
- [34] International Association of Oil & Gas Producers, "Map of CO2 storage Projects in Europe," <https://iogpeurope.org/resource/map-of-eu-ccus-projects/>.
- [35] "Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead. CSI/ECRA - Technology Papers 2017," Mar. 2017. [Online]. URL: [https://docs.wbcsd.org/2017/06/CSI\\_ECRA\\_Technology\\_Papers\\_2017.pdf](https://docs.wbcsd.org/2017/06/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf)
- [36] "Cembureau Key Facts & Figures," <https://cembureau.eu/media/lfqjyve5/key-facts-figures-2021.pdf>.
- [37] GCCA Getting the numbers right project (GNR), "Datenberichte zum Jahr 2019."

- [38] World Business Council for Sustainable Development, "CO2 and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry," [https://www.cement-co2-protocol.org/en/Content/Resources/Downloads/WBCSD\\_CO2\\_Protocol\\_En.pdf](https://www.cement-co2-protocol.org/en/Content/Resources/Downloads/WBCSD_CO2_Protocol_En.pdf), Mai 2021, Zugegriffen: 7. Januar 2025.