

Materialflüsse und Wertschöpfungskette der Stahl- und Zementindustrie in Nordrhein- Westfalen

Ein Ergebnis des Themenfeldes 2 - Produkte und Wertschöpfungsketten - des Forschungsprojektes SCI4climate.NRW

SCI4climate.NRW ist ein vom Land Nordrhein-Westfalen unterstütztes Forschungsprojekt zur Entwicklung einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Industrie im Jahr 2050. Das Projekt ist innerhalb der Initiative IN4climate.NRW verankert und repräsentiert die Seite der Wissenschaft. Das Projekt erforscht die technologischen, ökologischen, ökonomischen, institutionellen und (infra)-strukturellen Systemherausforderungen für produzierende Unternehmen in Nordrhein-Westfalen. Ein transdisziplinärer Prozess mit den Partnerinnen und Partnern aus der Industrie und Wissenschaft erarbeitet gemeinsam mögliche Pfade und deren Auswirkungen hin zu einer klimaneutralen Industrie.

Bibliographische Angaben

Herausgeber: SCI4climate.NRW
Veröffentlicht: 31. Mai 2020
AutorIn/nen: Ali Abdelshafy, Lehrstuhl für Operations Management, RWTH Aachen
Julia Schleier, Lehrstuhl für technische Thermodynamik, RWTH Aachen
Balint Simon, Lehrstuhl für technische Thermodynamik, RWTH Aachen
Grit Walther, Lehrstuhl für technische Thermodynamik, RWTH Aachen
Kontakt: balint.simon@om.rwth-aachen.de
Bitte zitieren als: SCI4climate.NRW 2020: *Materialflüsse und Wertschöpfungskette der Stahl- und Zementindustrie in Nordrhein-Westfalen, Aachen*

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildungs- und Tabellenverzeichnis..... | 3 |
| 1 Eisen und Stahl | 4 |
| 1.1 Die Wertschöpfungskette von Stahl in NRW..... | 4 |
| 1.1.1 Rohstahlerzeugung im Hochofenverfahren | 4 |
| 1.1.2 Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen | 5 |
| 1.1.3 Gießereiindustrie..... | 5 |
| 1.1.4 Produkte und Erzeugnisse aus Stahl..... | 6 |
| 1.2 Energiebedarf und CO ₂ -Emissionen | 6 |
| 1.3 Transformationen entlang der Wertschöpfungskette | 7 |
| 2 Zement | 9 |
| 2.1 Wertschöpfungskette Zement, Beton, Baugewerbe..... | 9 |
| 2.1.1 Zementherstellung | 9 |
| 2.1.2 Verarbeitung von Zement in Beton..... | 10 |
| 2.1.3 Einsatz von Beton im Bausektor | 10 |
| 2.1.4 Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen..... | 10 |
| 2.2 Energiebedarf..... | 12 |
| 2.3 CO ₂ -Emissionen entlang der Produktion von Beton | 12 |
| Literaturverzeichnis..... | 15 |
| Anhang | 19 |

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Standorte der Stahlindustrie in NRW (EC, 2020; WV Stahl, 2019) | 4 |
| Abbildung 2: Material- und Energieflüsse der Stahlindustrie in NRW | 8 |
| Abbildung 3: Standorte der Zementindustrie in NRW (EC, 2020; VDZ, 2019) | 9 |
| Abbildung 4: Recycelte und natürliche Gesteinskörnung (NRW vs. Deutschland) | 11 |
| Abbildung 5: Mobile und stationäre Recyclinganlagen in Deutschland und NRW | 12 |
| Abbildung 6: Material- und Energieflüsse der Zementindustrie in NRW..... | 14 |
| Abbildung 7: Brennstoffbedarf der deutschen Zementindustrie (VDZ, 2005 - 2018)..... | 19 |
| Abbildung 8: Verbrauch alternativer Kraftstoffe der deutschen Zementindustrie (VDZ, 2005 - 2018) | 19 |
| Abbildung 9: Deutsche Zementproduktion (VDZ, 2005 - 2018)..... | 20 |
| Abbildung 10: Zementproduktion in NRW 2008-2018 (IT NRW, 2020) | 20 |
| Abbildung 11: Zementexporte 2008-2018 (NRW vs. Deutschland) (DESTATIS, 2020; IT NRW, 2020). | 21 |
| Abbildung 12: Transportbetonproduktion in NRW 2009-2018 (BTB, 2017 - 2019; IT NRW, 2020)..... | 21 |
| Abbildung 13: Gebäudebestand in NRW (DESTATIS, 2020) | 22 |
| Abbildung 14: Durchschnittliche Kapazität der Recyclinganlagen (NRW vs. Deutschland) (DESTATIS, 2020; IT NRW, 2020) | 22 |
| Abbildung 15: Durchschnittliche Kapazität stationärer und mobiler Recyclinganlagen (NRW vs. Deutschland) (DESTATIS, 2020; IT NRW, 2020)..... | 23 |
| Abbildung 16: Produktion und Verbrauch von Hüttensand (Deutschland & NRW) (BBS, 2013, 2016; VDZ, 2005 - 2018)..... | 23 |
| Abbildung 17: Produktion von Steinkohleflugaschen (Deutschland & NRW) (BBS, 2013, 2016) | 24 |
| | |
| Tabelle 1: Emissionsintensität der wichtigsten Prozesse der Primärstahlherstellung..... | 6 |
| Tabelle 2: Durchschnittlicher Wert der (Vor-)Produkte der Wertschöpfungskette von Zement | 10 |

1 Eisen und Stahl

Die Eisen- und Stahlindustrie ist der größte industrielle Treibhausgas-Emittent und für etwa ein Drittel der weltweiten Industrieemissionen verantwortlich (Lesson et al., 2017). Die globale Produktion von Rohstahl ist in den letzten 10 Jahren deutlich von 1.200 auf 1.800 Millionen Tonnen gestiegen. Dabei wurden 72% der Nachfrage durch Primärstahl und 28% durch Sekundärstahl gedeckt (WSA, 2019).

Nordrhein-Westfalen (NRW) ist als Produktionsstandort von Stahl nicht nur für die deutsche, sondern auch für die europäische Wirtschaft von zentraler Bedeutung. Nachdem sich die Industrie ursprünglich aufgrund günstiger Standortfaktoren in der Region angesiedelt hat, haben mehrere wirtschaftliche, technologische und politische Umbrüche das heutige industrielle Profil geprägt (Hospers, 2004) (Keil & Wetterau, 2012).

1.1 Die Wertschöpfungskette von Stahl in NRW

Grundsätzlich wird bei der Produktion von Stahl zwischen zwei Verfahrensrouten unterschieden, die beide in NRW vertreten sind. Während bei der konventionellen Verfahrensrouten Roheisen im Hochofen aus Eisenerz reduziert und im integrierten Stahlwerk zu Rohstahl weiterverarbeitet wird (Hochofenverfahren), beruht die andere Verfahrensrouten auf der Wiedergewinnung von Stahl aus Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen (Elektrolichtbogenofenverfahren). Wie in Abbildung 1 dargestellt, sind die Standorte der Wertschöpfungskette von Eisen und Stahl zentral in Nordrhein-Westfalen und damit weitgehend von kurzen Transportwegen gekennzeichnet. In Bezug auf Mengen, alle relevanten Material- und Energieflüsse entlang der Wertschöpfungskette sind in Abbildung 2 für NRW quantifiziert.

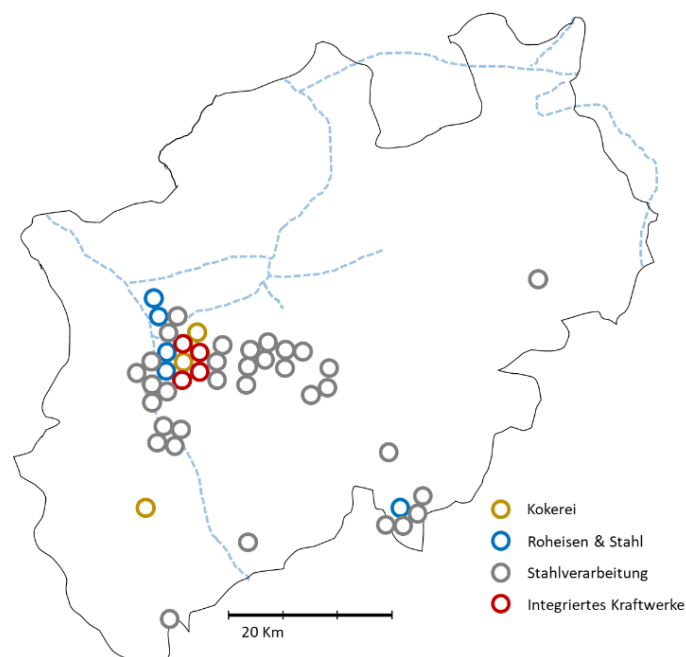


Abbildung 1: Standorte der Stahlindustrie in NRW (EC, 2020; WV Stahl, 2019)

1.1.1 Rohstahlerzeugung im Hochofenverfahren

Bei der Produktion von Primärstahl im Hochofenverfahren findet zunächst die Reduktion von Eisenerz zu Roheisen unter Zugabe von Koks und Kohle statt. Koks und Kohle werden hierbei auch als Energieträger eingesetzt. Das Roheisen wird in einem nachgeschalteten Prozess in einem Konverter zu Rohstahl weiterverarbeitet.

Eisenerz steht somit am Anfang der Wertschöpfungskette. Deutschland ist aufgrund geringer Vorkommen weitestgehend auf den Import von Eisenerz angewiesen (bspw. aus Brasilien). In NRW wurde im Jahr 2018 mit 20,1 Mt die Hälfte des deutschen Bedarfs an Eisenerz verbraucht.

Außerdem wird Koks als Reduktionsmittel bei der Gewinnung von Roheisen aus Eisenerz eingesetzt. In NRW werden in drei Kokereien durchschnittlich 4,7 Mt Koks aus 6,1 Mt Steinkohle hergestellt. Dabei besteht ein hoher Importbedarf an Steinkohle, da die regionale Förderung im Zeitverlauf stark reduziert wurde. Etwa die Hälfte der nordrhein-westfälischen Kokskohleproduktion entfällt auf die Pruna Betreiber GmbH in Schwelgern/Duisburg.

In NRW wird Roheisen in zwei integrierten Hüttenwerken in Duisburg (Krupp Mannesmann und Thyssenkrupp) hergestellt. Das Eisenerz wird dabei nach Durchlaufen der Sinteranlage, im Hochofen unter Zugabe von Koks und Kohle zu flüssigem Roheisen reduziert. Das Roheisen wird im Anschluss in einem Konverter zu Rohstahl umgewandelt. So werden in beiden Werken jährlich insgesamt 13,5 Mt Rohstahl, ein Drittel der deutschen Produktionsmenge, gewonnen. Daneben betreibt ArcelorMittal einen Konverter in Duisburg, in dem zusätzlich etwa 1 Mt Rohstahl jährlich produziert werden.

Energieträger und Hochofenschlacke (Hüttensand) fallen entlang der gesamten Prozesskette der Primärstahlherstellung als Beiprodukte an. Koksofengas und Hochofengas werden zur Erzeugung von Elektrizität, Dampf oder Wärme verwendet. In Duisburg werden in vier Kraftwerksblöcken (3 Thyssenkrupp, 1 HKM) die Hochofengase als Brennstoffe zur Energiegewinnung verwendet (ungefähr 43,5 Mio. GJ). Hochofenschlacke ist aufgrund ihrer zementähnlichen Eigenschaften ein wertvoller Input für die Zementindustrie zur Herstellung von CEM II und III (NRW produziert etwa 4 Mt Hüttensand).

1.1.2 Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen

Da Stahl zu 100% wiederverwertbar ist, wird Stahlschrott als wertvoller Rohstoff zur Wiedergewinnung von Stahl entlang einer komplexen Wertschöpfungskette eingesetzt. Aufgrund der zunehmenden Nachfrage sind die Preise für Stahlschrott in den letzten zehn Jahren von 127-205 €/t (2009) auf 191-244 €/t (2019) in Deutschland gestiegen (BDSV, 2009, 2019). Ein Fünftel des in NRW gesammelten Stahlschrotts (1,1 Mt) wird in drei Werken als Sekundärrohstahl dem Recycling weiterverarbeitet (Produktion: 1 Mt).

Insgesamt werden in NRW knapp 16 Mt Rohstahl produziert. Das entspricht ca. 40% der deutschen und 10% der europäischen Produktionsmenge. Trotz der hohen Verfügbarkeit von Stahlschrott liegt der Anteil von Sekundärstahl in NRW mit 6,4% weit unter dem von Deutschland (~30%) und der Europäischen Union (~40%) (WSA, 2019; WV Stahl, 2019)

1.1.3 Gießereiindustrie

Neben der Herstellung von Stahlerzeugnissen in den o.g. Prozessen, werden in der Gießereiindustrie Gusseisen- und Gussstahlprodukte in NRW hergestellt. Obwohl die Produktionsmenge mit 1 Mt im Verhältnis zu Roh- und Walzstahl gering ist, ist die Gießereiindustrie für die deutsche und nordrhein-westfälische Wirtschaft wichtig. Etwa 25% der deutschen Produktion stammt aus NRW (CAEF, 2019; IT NRW, 2020). Eisen- und Stahlgussprodukte sind kundenspezifisch, weshalb die Produktionsanlagen für Gusserzeugnisse über vergleichsweise geringe Kapazitäten verfügen. Für jede Tonne Gussprodukt werden etwa 1,3 Tonnen Stahlschrott und 120 kg Roheisen eingesetzt. Im Produktionsprozess fällt eine beträchtliche Menge Abfall an, der als Rohstoff dem Prozess wieder zugeführt wird.

1.1.4 Produkte und Erzeugnisse aus Stahl

Im Allgemeinen liegen die Stahlpreise je nach Produkt, z.B. Rohstahl, Walzstahl, Betonstahl, und Anwendung entsprechend der Zusammensetzung und Eigenschaften zwischen 400-1.000 €/t. Der Preis spezieller Stahlerzeugnisse übersteigt 2.500 €/t (z.B. rostfreier Stahl, Edelstahl). Die deutsche Handelsbilanz für Eisen und Stahl ist ausgeglichen. Die Hälfte der Handelsaktivitäten findet in NRW statt (jeweils etwa 10 Mt Importe und Exporte). Es bestehen deutliche Unterschiede zwischen den Handelsaktivitäten der verschiedenen Produktkategorien.

Gießereiprodukte werden vornehmlich in anderen Industriezweigen wie bspw. der Automobilindustrie oder dem Maschinenbau eingesetzt. (Eisenguss: 2.000 – 5.500€/t, Stahlguss: 8.000 – 10.000€/t¹).

1.2 Energiebedarf und CO₂-Emissionen

Der spezifische Wärmeverbrauch von Primärstahl (Hochofenroute) liegt zwischen 13-19 GJ/Tonne Rohstahl, dies hängt im Wesentlichen von der Energierückgewinnung in der Anlage ab (z.B. Nutzung von Hochofengas) (Fruehan et al., 2000; Pardo et al., 2012; Song et al., 2019).

Demgegenüber hängt der Lichtbogenofen auf der Recyclingstahlroute von elektrischer Energie ab. Darüber hinaus ist seine spezifische Energie relativ gering, er ist deutlich von 630 kWh/t (1960) auf aktuell etwa 350 kWh/t gesunken (Domaschk & Popescu, 2014; Fleuriault et al., 2019; MacRosty & Swartz, 2007; Madias, 2014). Im Vergleich zu Sekundärstahl hat die Produktion von Eisen- und Stahlguss in der Gießerei einen verhältnismäßig hohen Bedarf spezifischer Energie von 2 MWh/t. Der Energiebedarf wird zu 50% über elektrische Energie, zu 30% über Gießereikoks und zu 20% durch Erdgas gedeckt (BDGUSS, 2020) (Salonitis et al., 2019).

Der Großteil der CO₂-Emissionen der Stahlindustrie wird dem Primärstahl zugeschrieben, die entlang des Produktionsprozesses an verschiedenen Emissionsquellen mit unterschiedlichen Intensitäten entstehen (siehe

Tabelle 1). Der größte Teil des CO₂ fällt bei der Roheisenerzeugung an, ein Teil dieser Emissionen sind Prozessemissionen der Reduktionsreaktion. Die Zuteilung der Emissionen ist kompliziert, da das Hochofengas und das Koksofengas zu den Kraftwerken umgeleitet werden. Die in der Stoffstrommodellierung verwendete Zuteilung entspricht der Vorgehensweise des europäischen Emissionshandelssystems.

Die zwei integrierten Hüttenwerke emittieren bei der Herstellung von Roheisen rund 13 Millionen Tonnen CO₂. Bei der Verbrennung von Hochofen- und Koksgasen in den Kraftwerksblöcken zur Bereitstellung von Energie für den Hochofen entstehen Gesamtemissionen i.H.v. 11,3 Mt CO₂. Der Rest der (geringfügigen) Prozessemissionen entsteht während des Kohlenstoffabscheidungsprozesses im LD-Konverter (Herstellung von Rohstahl) (Remus et al., 2013). Mit der Herstellung von Koks in NRW werden jährlich weitere 2,9 Mt CO₂ emittiert, wovon mehr als 72% auf einen einzigen Betreiber in Duisburg entfallen. Daneben wird der CO₂-Fußabdruck von Sekundärstahl hauptsächlich dem Stromverbrauch zugeschrieben (0,3 t CO₂/t Stahl). Da im Stoffstrommodell nur die Emissionen des Scope 1 berücksichtigt werden, sind diese Emissionen nicht abgebildet.

Tabelle 1: Emissionsintensität der wichtigsten Prozesse der Primärstahlherstellung

¹ Durchschnittswerte entsprechen Preisen ohne Steuern und Transport.

| Prozess | Sintern | Kokerei | Hochofen | Konverter |
|---|---------|---------|----------|-----------|
| Emissionsintensität ($\frac{CO_2}{Rohstahl}$) | 0,2 | 0,3 | 1,3 | 0,1 |

1.3 Transformationen entlang der Wertschöpfungskette

Die Prognose der zukünftigen Produktions-, Ressourcenbedarfs- und Emissionsstruktur der Stahlindustrie ist stark davon abhängig, welcher Technologiepfad verfolgt wird. Unterschiedliche Einstellungen bezüglich der Entwicklung und Vorteilhaftigkeit unterschiedlicher Technologiepfade, wie den Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel im Hochofen gegenüber des verstärkten Recyclings urbaner Stahlbestände im Lichtbogenofen oder dem Einsatz von CCUS-Technologien² bei konventioneller Produktion, erschweren die Prognose (ETC, 2019; IRENA, 2017; Material Economics, 2019; Wörtler et al., 2013). In Deutschland werden in zwei Pilotprojekte: Carbon2Chem (ThyssenKrupp) und SALCOS (Salzgitter AG) neue Technologien erprobt (Bataille, 2019). Eine Vielzahl technisch-ökonomischer Faktoren wird den Übergang der Industrie beeinflussen (z.B. Kosten, TRLs, etc.). Dies wird auch auf die Gliederung der Wertschöpfungskette von Eisen und Stahl Auswirkung haben.

² CCUS: Carbon Capture and Utilization/Storage (CO₂-Abscheidung und Verwendung/Speicherung)

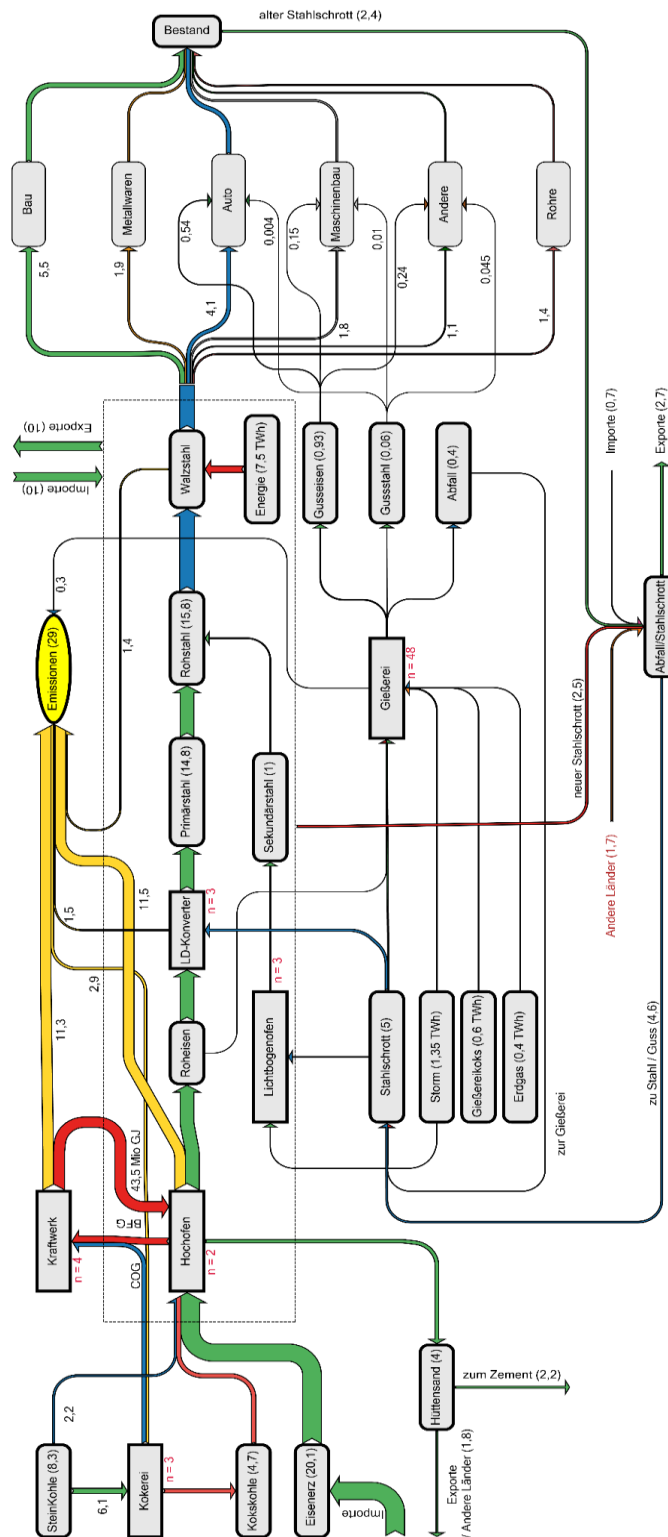


Abbildung 2: Material- und Energieflüsse der Stahlindustrie in NRW

Das Modell wurde durch Zusammenführung unterschiedlicher Quellen entwickelt, insbesondere (IT NRW, 2020) (DESTATIS, 2020) (EC, 2020) (WV Stahl, 2019) (AGEB, 2017) (BEIS, 2019) (Domaschk & Popescu, 2014) (Fleuriault et al., 2019) (Fruehan et al., 2000) (IPCC, 2006) (Kermeli et al., 2016) (MacRosty & Swartz, 2007) (Madias, 2014) (Otto et al., 2017) (Pardo et al., 2012) (Remus et al., 2013) (Salonitis et al., 2019) (Ubiato, 2012) (Song et al., 2019) (Xu et al., 2015)

2 Zement

Beton ist nach Wasser das am meisten verbrauchte Material der Erde (Gagg, 2014). Für den Bau von Gebäuden und Infrastruktur ist Beton unverzichtbar. Zement ist als Bindemittel der wichtigste Bestandteil bei der Betonherstellung. Die weltweite Produktion von Zement liegt aktuell bei über 4.100 Millionen Tonnen³ (IEA, 2019). Die Zementindustrie ist dabei für etwa ein Viertel der weltweiten industriellen CO₂-Emissionen verantwortlich (Lesson et al., 2017).

2.1 Wertschöpfungskette Zement, Beton, Baugewerbe

2.1.1 Zementherstellung

Der Herstellungsprozess von Zement besteht aus drei Hauptschritten (IEA, 2018; Schenck, 2015):

- (A) Mahlen und Mischen der Rohmaterialien (vorwiegend Kalkstein)
- (B) Brennen der Mischung bei 1.450 °C (Zementklinkerproduktion)
- (C) Mahlen des Zementklinkers mit anderen Zusatzstoffen (Zementherstellung).

Die Zementklinkerproduktion ist immer in der Nähe von Vorkommen des benötigten Rohstoffes Kalkstein angesiedelt, der verfügbar und reichlich vorhanden ist (Abbildung 3). In NRW gibt es elf Zementwerke, in denen 7,1 Mt Zementklinker produziert werden.⁴ Da es sich um integrierte Werke handelt, wird im Anschluss an die Herstellung von Zementklinker die Zementproduktion im selben Werk abgeschlossen. Darüber hinaus gibt es fünf zusätzliche Werke, die nur Mahlprozesse (C) durchführen. Diese sechzehn Werke produzieren in NRW insgesamt 9,7 Mt Zement, was etwa einem Drittel der deutschen Produktion entspricht⁵ (VDZ, 2019).

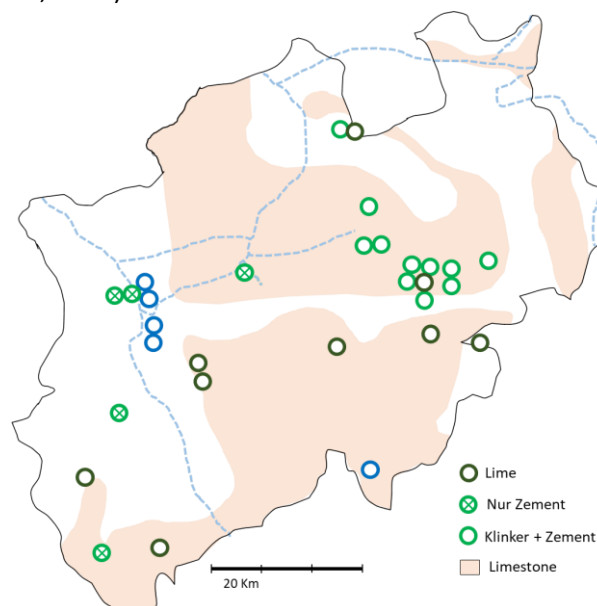


Abbildung 3: Standorte der Zementindustrie in NRW (EC, 2020; VDZ, 2019)

Aufgrund der Tatsache, dass Zement einen niedrigen spezifischen Preis [€/t] hat, erfolgt die Produktion vornehmlich regionale (d.h. die Produktionsanlagen befinden sich in der Nähe der Verbrauchsgebiete).

³ Seit 2013 bereits über 4.000 Mt

⁴ Das entspricht 29% der deutschen Produktion (24,5 Mt), welche in 34 Werken stattfindet.

⁵ Zementproduktion Deutschland: 33,7 Mt in 53 Werken

NRW stellt hinsichtlich der Handelsstruktur von Zement eine Ausnahme dar. Das Land exportiert etwa ein Drittel der Produktion (3,4 Mt)⁶, vornehmlich in die Nachbarländer Niederlande und Belgien (zusammen 3 Mt).

2.1.2 Verarbeitung von Zement in Beton

In NRW werden 6,3 Mt Zement zur Herstellung von Beton in vier Produktkategorien verwendet: Transportbeton (3,6 Mt), Betonfertigteile (1,4 Mt), sowie Baustellenbeton und andere Produkte, wie Mörtel (zusammen 1,4 Mt).

8,7 Mio. m³ Transportbeton werden in NRW in 160 Werken hergestellt. Das entspricht 16% der gesamtdeutschen Produktion. Der durchschnittliche Wert von Transportbeton liegt bei 67,5 €/m³. Im Gegensatz zu Zement beeinflussen Kosten logistischer Vorgänge den Verkaufspreis stark, so dass dieser bei über 100 €/t (inkl. Steuern) liegt (Elskes, 2020; Holcim, 2018a).

Unter der Voraussetzung, dass jeder m³ Beton zwischen 0,11 und 0,38 Tonnen Zement verbraucht (Tait & Cheung, 2016), zeigt Tabelle 2 deutlich auf, wie der Materialwert in diesem Sektor signifikant entlang der Wertschöpfungskette zunimmt. Auch die Zahl der Unternehmen, Beschäftigten und Begünstigten steigt entlang der Wertschöpfungskette.

Tabelle 2: Durchschnittlicher Wert der (Vor-)Produkte der Wertschöpfungskette von Zement

| | Zementklinker | Zement | Transportbeton | Transportbeton (Verkaufspreis) |
|-------------|---------------|---------|------------------------|-----------------------------------|
| Wert | 40 €/t | 60,3€/t | 67,5 €/ m ³ | 100 €/ m ³ |

2.1.3 Einsatz von Beton im Bausektor

Das Baugewerbe (Hoch- & Tiefbau) ist der Endverbraucher von Zementprodukten. Rund zwei Drittel der Zementproduktion werden im Hoch- und Tiefbau in Gebäuden verbraucht, der Rest im Bau von Infrastruktur. Jährlich werden in NRW rund 20.000 neue Gebäude errichtet und 10.000 Gebäude mit Gesamtkosten von 11 Milliarden Euro saniert oder umgebaut. 44% des Wohnungsbestandes in NRW wurde nach dem Zweiten Weltkrieg errichtet. Geht man von einer durchschnittlichen Lebensdauer der Gebäude von 100 Jahren aus, so ist ab dem Jahr 2050 mit einem deutlichen Anstieg des Zementbedarfs für Sanierungsarbeiten zu rechnen. Zudem steigen dadurch anfallende Mengen an Bau- und Abbruchabfällen.

2.1.4 Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen

Abfälle aus Bau- und Abbruchaktivitäten stellen in vielen Ländern den größten Anteil des Abfallaufkommens dar (Li et al., 2013). In Deutschland bestehen 60% des Gesamtabfallaufkommen (etwa 350 Mt) aus Bau- und Abbruchabfällen (BMU, 2018). Mineralische Bau- und Abbruchabfälle setzen sich aus Boden und Steinen, Bauschutt, Straßenaufbruch, Baustellenabfällen und Bauabfällen auf Gipsbasis zusammen.

Jährlich werden in NRW rund 4.000 Häuser abgerissen, wodurch 10 Mt Bauschutt anfallen. 80% des anfallenden Bauschutts werden als sekundäre Gesteinskörnungen recycelt.⁷ Diese Recyclingraten sind höher als in vielen EU-Ländern und entsprechen zudem der europäischen Zielsetzung von 70% (EC,

⁶ Das entspricht der Hälfte der deutschen Zementexporte (6,8 Mt).

⁷ Das entspricht etwa dem bundesweiten Durchschnitt (78%) KB (2019).

2008, 2011) . Nichtsdestotrotz substituieren die meisten dieser recycelten Baustoffe Gesteinskörnung in geringwertigeren Anwendungsbereichen, wie bspw. im Straßen-, Erd oder Deponiebau. Die recycelten Baustoffe reduzieren so den Verbrauch natürlicher Ressourcen als Gesteinskörnungen. Das Verhältnis von rezyklierten zu natürlichen Gesteinskörnungen liegt in NRW bei 0,17 und übersteigt damit knapp den deutschen Durchschnitt von 0,14 (siehe Abbildung 4).

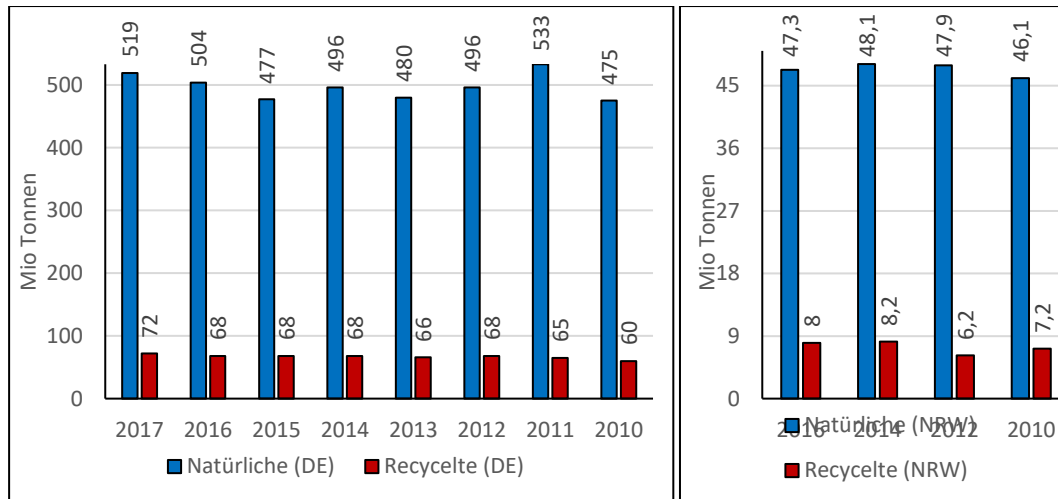


Abbildung 4: Recycelte und natürliche Gesteinskörnung (NRW vs. Deutschland)

Das Recyclingsystem für Bau- und Abbruchabfälle in NRW weist ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen mobilen und stationären Anlagen auf. Die Struktur unterscheidet sich damit deutlich von der deutschen, die bei 2,5 mobilen zu 1 stationären Anlage liegt (siehe Abbildung 5)⁸. Das Verhältnis spiegelt sich auch in der Menge der Bauabfälle, die auf eine Verwertungsanlagen in NRW kommen wider. Diese Menge ist mit 37.000 t/Anlage deutlich höher als in Deutschland (24.000 t/Anlage). Der signifikante Unterschied wird auf die Kapazitäten der stationären Verwertungsanlagen zurückgeführt (NRW:

⁸ Weitere kontrastierende Darstellung können dem Anhang entnommen werden. (Abbildung 7 - Abbildung 17)

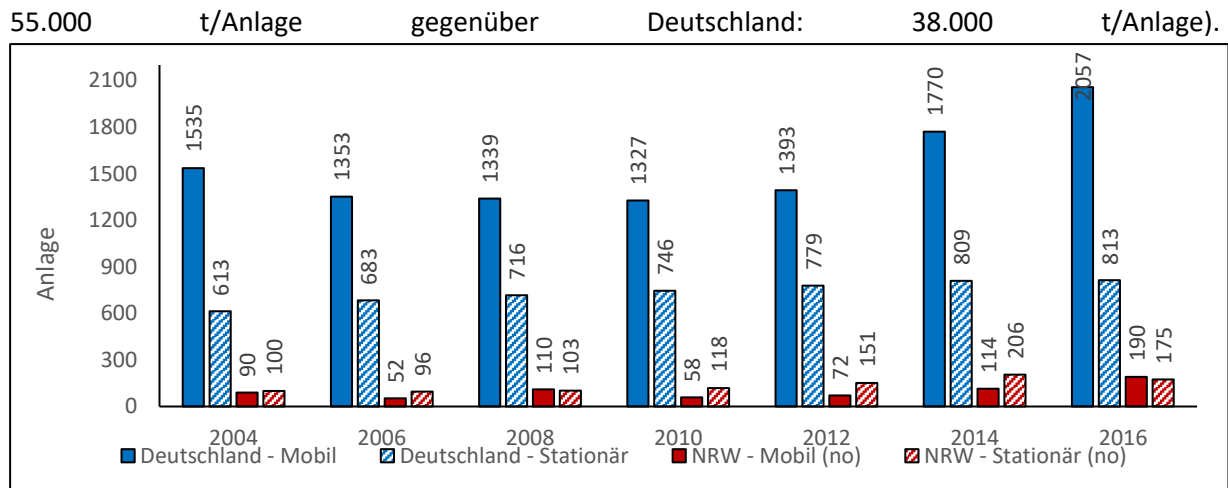


Abbildung 5: Mobile und stationäre Recyclinganlagen in Deutschland und NRW

2.2 Energiebedarf

Die Herstellungsprozesse von Zement führen zu hohen Energiebedarfen in Form von Wärmeenergie. Im Jahr 2018 verbrauchte jede in Deutschland produzierte Tonne Zement 2,85 GJ (3,9 GJ/Tonne Klinker) (VDZ, 2018). Die Zementindustrie hat entlang der Produktionskette außerdem einen hohen Bedarf an elektrischer Energie (insbesondere für die Mahlprozesse). In Deutschland liegt der spezifische Energiebedarf bei 111 [kWh/t]. 60% davon entfallen auf die Produktion von Zementklinker, der Rest wird in der Zementproduktion benötigt (Atmaca & Kanoglu, 2012; Schneider et al., 2011).

Die Zementindustrie ist weiterhin stark von Braunkohle abhängig. Braunkohle ist in NRW regional verfügbar. Die Industrie verbrauchte im Jahr 2018 bundesweit rund 2,2 Mt (19,2 Mio. GJ) (VDZ, 2019). Das entspricht 20% der gesamten thermischen Energie (und 60% der verbrauchten fossilen Energieträger). Um den CO₂-Fußabdruck der Wärmeenergie zu verringern, muss die deutsche Zementindustrie eine andere saubere Energiequelle zu einem vernünftigen Preis finden.

Auf der anderen Seite werden alternative Brennstoffe eingesetzt. Wie aus Abbildung 7 hervorgeht, ist die Nutzung alternativer Brennstoffe in Deutschland in den letzten 15 Jahren um 29 Prozentpunkte gestiegen. Mit 67% liegt der Anteil alternativer Brennstoffe deutlich über dem der EU (41%) und der globalen (5-10%) (De Beer et al., 2017; IEA, 2018; Sarc et al., 2013; Sarc et al., 2014). Als alternative Brennstoffe werden zu etwa zwei Drittel RDF- und Kunststoffabfälle eingesetzt. Die durchschnittliche Substitutionsrate in NRW liegt schätzungsgemäß im Bereich der deutschen.⁹ Sollte eine Zunahme kreislaufwirtschaftlicher Maßnahmen in der Chemieindustrie dazu führen, dass weniger Kunststoffabfälle als alternative Brennstoffe in Zementwerken zur Verfügung stehen, ist eine negative Auswirkung auf die Zementindustrie zu erwarten, wenn der Energiebedarf wieder durch fossile Brennstoffe gedeckt wird.

2.3 CO₂-Emissionen entlang der Produktion von Beton

Fast die Gesamtheit der CO₂ Emissionen der Betonherstellung sind der Produktion von Zementklinker zuzuschreiben. Der CO₂-Fußabdruck von Beton beträgt 100-300 kg CO₂/m³ Beton (abhängig von der

⁹ Fünf Klinkerwerke (von insgesamt 12) geben ihre Substitutionsraten im Jahr 2018 an (78,5, 61%, 61%, 71% und 48,5%) Dyckerhoff (2020); Holcim (2018b); Spenner (2018). Im Durchschnitt liegt die Substitutionsrate damit bei 64%.

verwendeten Zementart) (NRMCA, 2012; Tait & Cheung, 2016). Bei der Zementklinkerproduktion wurden im Jahr 2018 5,3 Mt CO₂ emittiert. Bei der Kalzinierung von Kalkstein entstehen zwei Drittel des Kohlenstoff-Fußabdrucks von Zementklinker durch die Freisetzung von CO₂ (IPCC, 1996). Neben diesen Prozessemissionen resultieren weitere Emissionen durch den Einsatz emissionsintensiver Energieträger zur Erbringung der hohen Prozesstemperaturen bei der Kalzinierung.

Selbst wenn es gelingt, energieseitige Emissionen vollständig zu neutralisieren (bspw. durch den Einsatz erneuerbarer Energien) bleibt ein erheblicher Anteil prozesseitiger Emissionen bestehen. Eine Vielzahl von Studien und Roadmaps (vgl. (Cembureau, 2013; CHR, 2018; Favier et al., 2018; IEA, 2018; Material Economics, 2019)) verweist daher darauf, dass zur Neutralisierung der Prozessemissionen der Einsatz von Technologien zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung oder -verwertung erforderlich sein wird.

Portlandzement (CEM I) macht mehr als 50% Prozent der Zementproduktion in NRW aus. Der Anteil ist gegenüber dem gesamtdeutschen Anteil (30%) relativ hoch. Der Marktanteil von CEM I ist in Deutschland in den letzten 15 Jahren von 58% auf 28% gefallen (siehe Abbildung 9). Würde der Anteil von CEM II und III in NRW steigen, könnten Einsparungen beim Einsatz von Klinker erzielt werden und damit zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen führen.

Die Umsetzung ist allerdings von der zukünftigen Verfügbarkeit von Hüttensand abhängig. Diese ist wiederum davon abhängig, welchen Transformationspfad die Stahlindustrie einschlagen wird. Wie Abbildung 16 zeigt, stammt etwa die Hälfte des in Deutschland produzierten Hüttensandes aus NRW. Abhängig von den Szenarien wird die verfügbare Menge Hüttensand zwischen 4 und 0 Mt liegen.¹⁰ Würde die gesamte Stahlproduktion in NRW auf die Elektrolichtbogenofenroute umgestellt, könnte das derzeitige Niveau der CEM II- und CEM III-Produktion ohne Schlackenimport nicht gehalten werden. Alternativ müsste die Zementindustrie mehr Klinker produzieren, was wiederum mehr CO₂-Emissionen zur Folge hätte.

Derselbe Zusammenhang ergibt sich auch für Flugasche aus Kraftwerken. Da Flugasche aufgrund des Ausstiegs aus der Kohleverstromung in Zukunft knapp werden wird, ist zu erwarten, dass es bis 2038 keine heimischen Bezugsquellen mehr geben wird. 71% der in NRW produzierten Menge an Flugasche (1 Mt) wird bei der Betonherstellung verwendet (BBS, 2013). Auch diese müssten durch andere Materialien (z.B. Zement, Chemikalien, etc.) substituiert werden, wodurch die CO₂-Emissionen erwartungsgemäß steigen würde.

¹⁰ Szenarien BAU und 100%ige Elektrifizierung

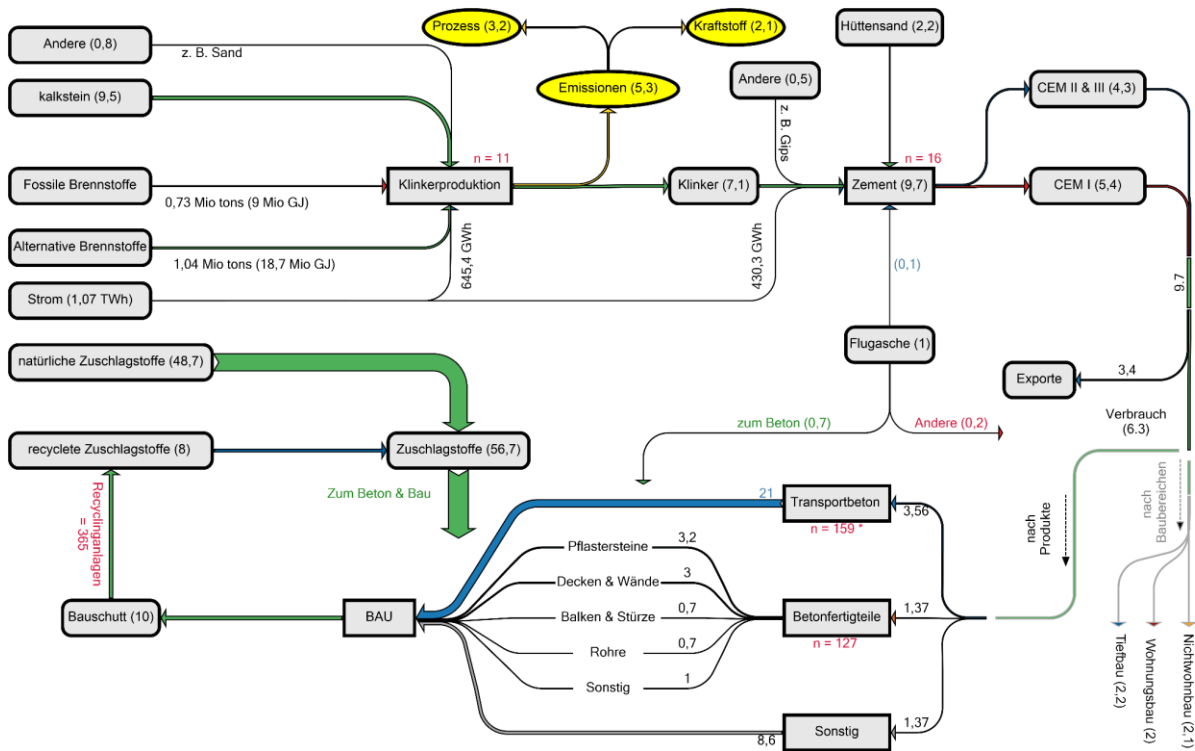


Abbildung 6: Material- und Energieflüsse der Zementindustrie in NRW

Das Modell wurde durch Zusammenführung unterschiedlicher Quellen entwickelt, insbesondere (IT NRW, 2020) (DESTATIS, 2020) (EC, 2020) (VDZ, 2019) (VDZ, 2005 - 2018) (Schneider et al., 2011) (BBS, 2016) (KB, 2019) (CHR, 2018) (Atmaca & Kanoglu, 2012) (Fang et al., 2012) (ETSAP, 2010) (Fang et al., 2012) (Gao et al., 2016) (Gagg, 2014)

Literaturverzeichnis

- AGEB (2017). Heizwerte der Energieträger und Faktoren für die Umrechnung von natürlichen Einheiten in Energieeinheiten zur Energiebilanz 2015. AG-Energiebilanzen e.V.
- Atmaca, A., & Kanoglu, M. (2012). Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry.
- Bataille, C. (2019). Low and zero emissions in the steel and cement industries.
- BBS (2013). Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V.
- BBS (2016). Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V.
- BDGUSS (2020). Internal data. Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie.
- BDSV (2009). Durchschnittliche Lagerverkaufspreise Bundesvereinigung für bestimmte Stahlschrottsorten in Deutschland - 2009 - Bundesweit. Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V.
- BDSV (2019). Durchschnittliche Lagerverkaufspreise Bundesvereinigung für bestimmte Stahlschrottsorten in Deutschland - 2009 - Bundesweit. Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V.
- BEIS (2019). Estimated average calorific values of fuels (DUKES A.1-A3) – Digest of UK Energy Statistics (DUKES): Calorific values. Department for Business, Energy & Industrial Strategy.
- BMU (2018). Abfallwirtschaft in Deutschland 2018 - Fakten, Daten, Grafiken. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- BTB (2017 - 2019). Jahresbericht. Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V.
- CAEF (2019). The European foundry industry 2018 - Annual statistics and national reports. The European Foundry Association.
- Cembureau (2013). The role of cement in the 2050 low carbon economy. The European Cement Association.
- CHR (2018). Making concrete change - Innovation in low-carbon cement and concrete. Chatham House Report.
- De Beer, J., Cihlar, J., Hensing, I., & Zabeti, M. (2017). Status and prospects of co-processing of waste in EU cement plants.
- DESTATIS (2020). Genesis-online. Die Datenbank des Statistischen Bundesamtes. Statistisches Bundesamt.
- Domaschk, D., & Popescu, F. (2014). Variable Scheduling of Wind-based Micro-grid for Electric Arc Furnace Steel Production.
- Dyckerhoff (2020). Umweltdaten der Zementwerke.
- EC (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directive. The European Commission.

- EC (2011). Dervice contract on management of construction and demolition waste - SR1 - Final report task 2. The European Commission.
- EC (2020). European Union Transaction Log. The European Commission.
- Elskes (2020). Preisliste.
- ETC (2019). Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century - Sector focus steel. Energy Transitions Commission.
- Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K., & Habert, G. (2018). A sustainable future for the European cement and concrete industry - Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050.
- Fleuriault, C., Grogan, J., & White, J. (2019). Electric Arc Smelting.
- Fruehan, R. J., Fortini, O., Paxton, H. W., & Brindle, R. (2000). Theoretical minimum energies to produce steel for selected conditions.
- Gagg, C. R. (2014). Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis.
- Holcim (2018a). Preisliste 2018. Holcim Beton und Betonwaren GmbH - Region West.
- Holcim (2018b). Umweltdaten 2018 – Holcim Deutschland Gruppe – Umweltdaten Bindemittel.
- Hospers, G. (2004). Restructuring Europe's Rustbelt: The case of the German Ruhrgebiet.
- IEA (2018). Technology Roadmap - Low-carbon Transition in the Cement Industry. International Energy Agency.
- IEA (2019). Tracking Industry - Cement. International Energy Agency.
- IPCC (1996). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories - Volume 2: Energy. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IRENA (2017). Accelerating the energy transition through innovation. International Renewable Energy Agency.
- IT NRW (2020). Landesdatenbank NRW. Information und Technik Nordrhein-Westfalen-Statisches Landesamt.
- KB (2019). Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016. Bericht zum Aufkommen und zum Verlieb mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016. Kreislaufwirtschaft Bau.
- Keil, A., & Wetterau, B. (2012). Metropolis Ruhr - A Regional Study of the New Ruhr.
- Kermeli, K., Deuchler, R., Worrell, E., & Masanet, E. (2016). Energy efficiency and cost saving opportunities for metal casting - An ENERGY STAR guide for energy and plant managers. United States Environmental Protection Agency (EPA).
- Lesson, D., Dowell, N., Shah, N., Petit, C., & Fennell, P. S. (2017). A techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other higher purity sources.

- Li, M., Kühlen, A., Yang, J., & Schultmann, F. (2013). Improvement of the statutory framework for construction and demolition waste management exemplified in Germany and Australia.
- MacRosty, R. D. M., & Swartz, C. L. E. (2007). Dynamic Optimization of Electric Arc Furnace Operation.
- Madias, J. (2014). Electric Furnace Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy.
- Material Economics (2019). Industrial Transformation 2050 – Pathways to net-zero emissions from EU Heavy Industry.
- NRMCA (2012). Concrete CO2 fact sheet. The National Ready Mixed Concrete Association.
- Otto, A., Robinius, M., Grube, T., Schiebahn, S., Praktijnjo, A., & Stolten, D. (2017). Power-to-steel: reducing CO2 through the integration of renewable energy and hydrogen into the German steel industry.
- Pardo, N., Moya, J. A., & Vatopoulos, K. (2012). Prospective scenarios on energy efficiency and CO2 emissions in the EU iron & steel industry.
- Remus, R., Aguado-Monsonet, M. A., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2013). Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production. JRC reference report.
- Salonitis, K., Jolly, M., Pagone, E., & Papanikolaou, M. (2019). Life-cycle and energy assessment of automotive component manufacturing: The dilemma between aluminum and cast iron.
- Sarc, R., Lorber, K. E., Rogetzer, M., & Sippl, E. M. (2014). Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry.
- Sarc, R., Pomberger, R., & Lorber, K. E. (2013). Perspektiven der Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken.
- Schenck (2015). Unshakable – Under the harshest conditions.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production - present and future.
- Song, J., Jiang, Z., Bao, C., & Xu, A. (2019). Comparison of energy consumption and CO2 emissions for three steel production routes - integrated steel plant equipped with blast furnace, oxygen blast furnace or COREX.
- Spenner (2018). Nachhaltigkeitbericht.
- Tait, M. W., & Cheung, W. M. (2016). A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of three concrete mix designs.
- Ubieto, E. (2012). Energy system analysis in the Swedish iron and steel industry.
- VDZ (2005 - 2018). Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Der Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- VDZ (2018). Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Der Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- VDZ (2019). Zementindustrie im Überblick 2019/2020. Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- Wörtler, M., Schuler, F., Voigt, N., Schmidt, T., Dahlmann, P., Lungen, H. B., & Ghenda, J. T. (2013). Steel's contribution to a low carbon Europe 2050.

WSA (2019). Steel Statistical yearbook 2019 – Concise version. World Steel Association.

WV Stahl (2019). Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland. Wirtschaftsvereinigung Stahl.

Xu, W., Cao, W., Zhu, T., Li, Y., & Wan, B. (2015). Material flow analysis of CO2 Emissions from blast furnace and basic oxygen furnace steelmaking systems in China.

Anhang

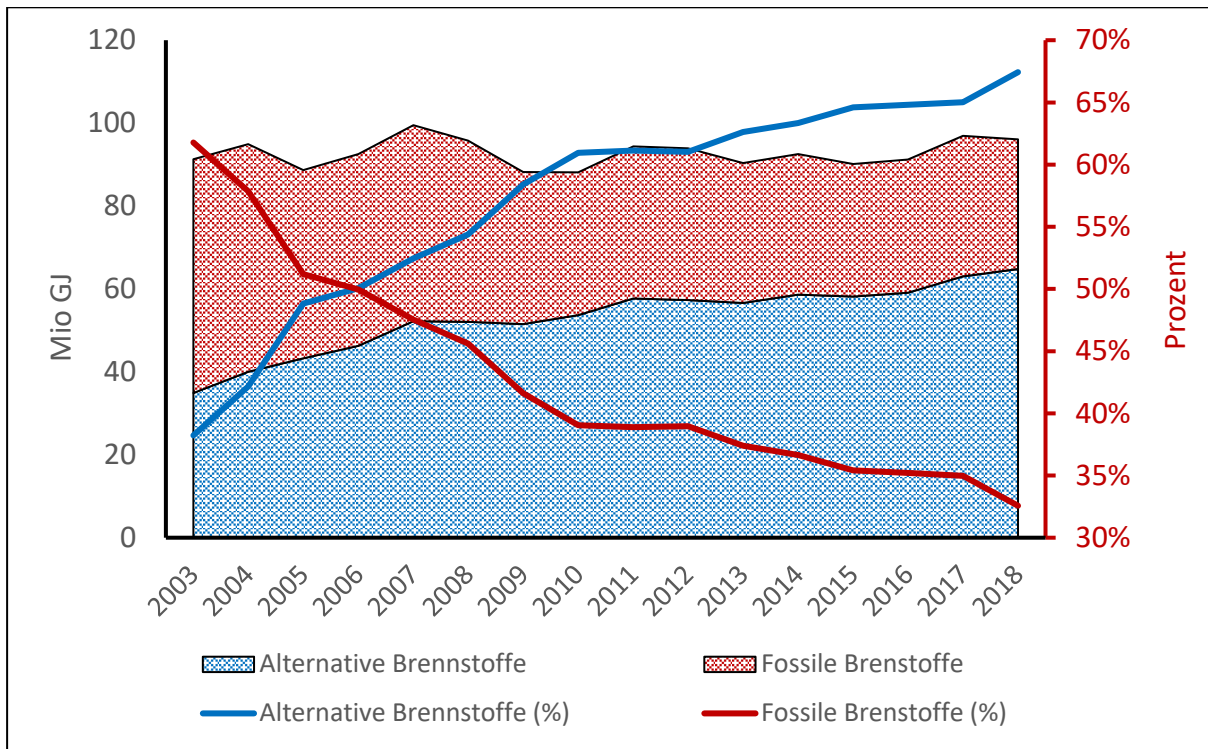


Abbildung 7: Brennstoffbedarf der deutschen Zementindustrie (VDZ, 2005 - 2018)

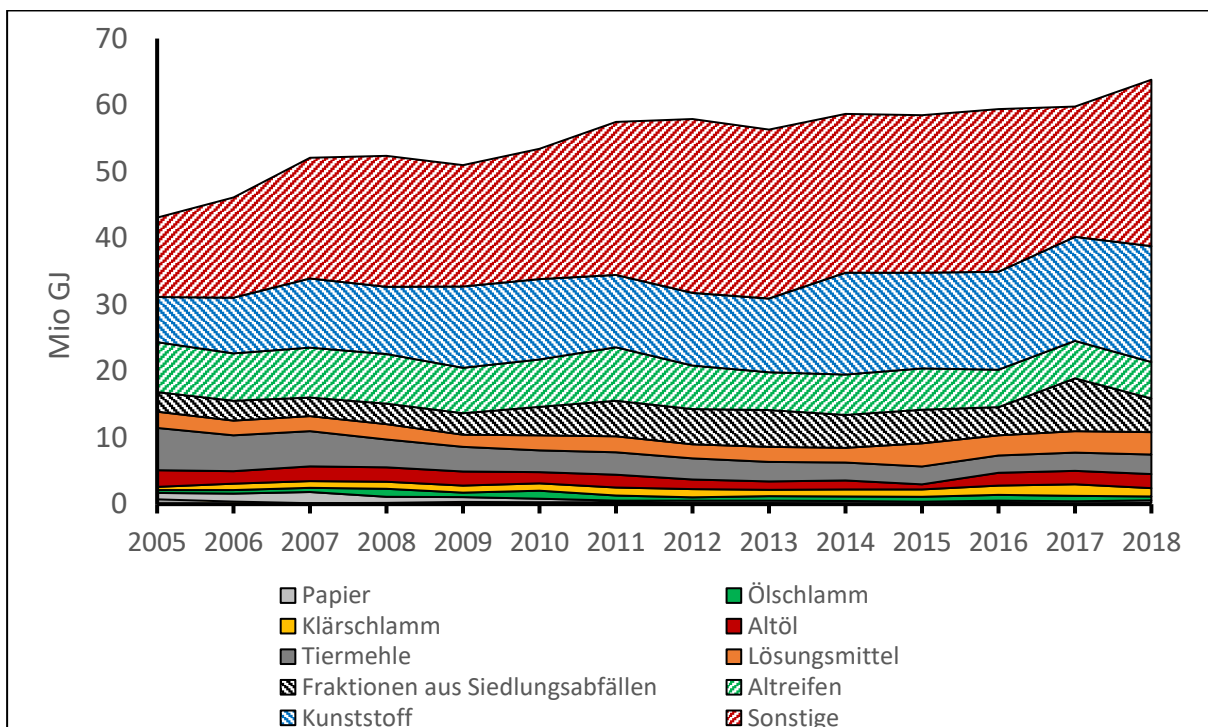


Abbildung 8: Verbrauch alternativer Kraftstoffe der deutschen Zementindustrie (VDZ, 2005 - 2018)

Sonstige: Diese Kategorie ist im Fragebogen des VDZ an die Zementwerke nicht klar, es wird geschätzt, dass sie erhebliche Mengen an RDF enthält.

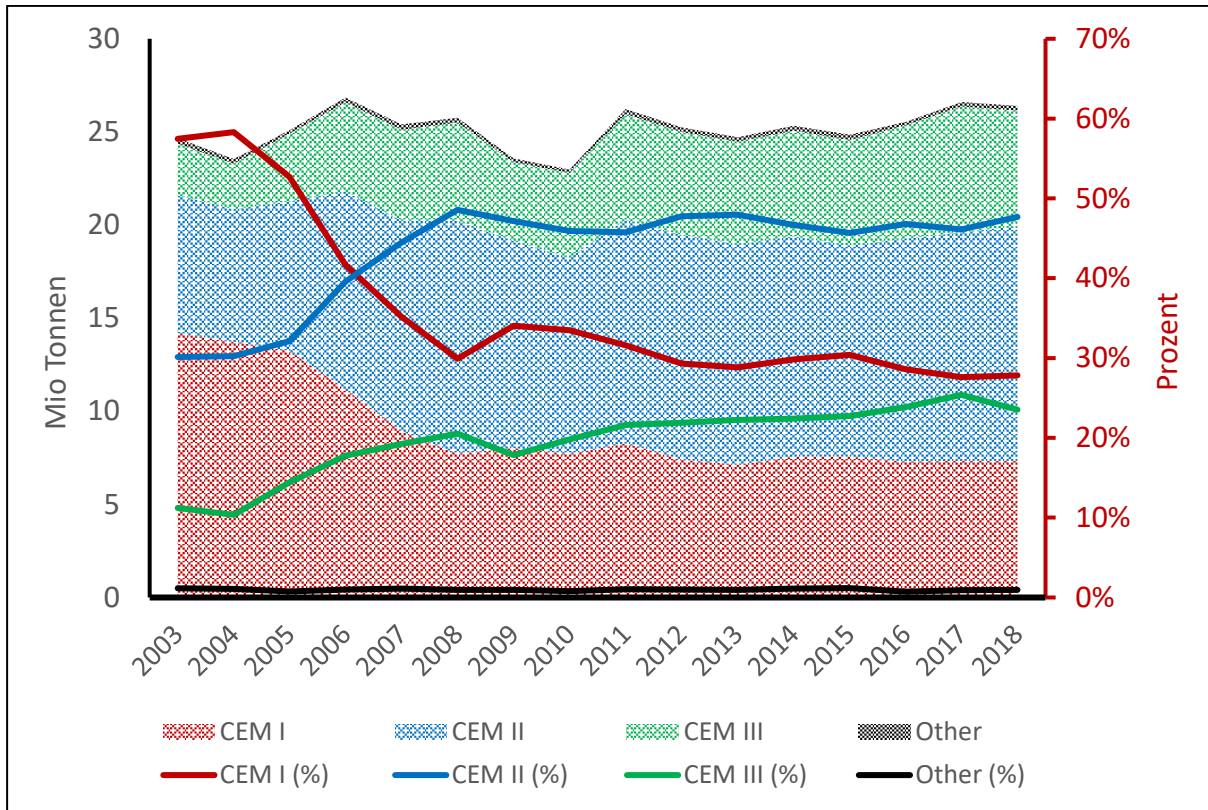


Abbildung 9: Deutsche Zementproduktion (VDZ, 2005 - 2018)

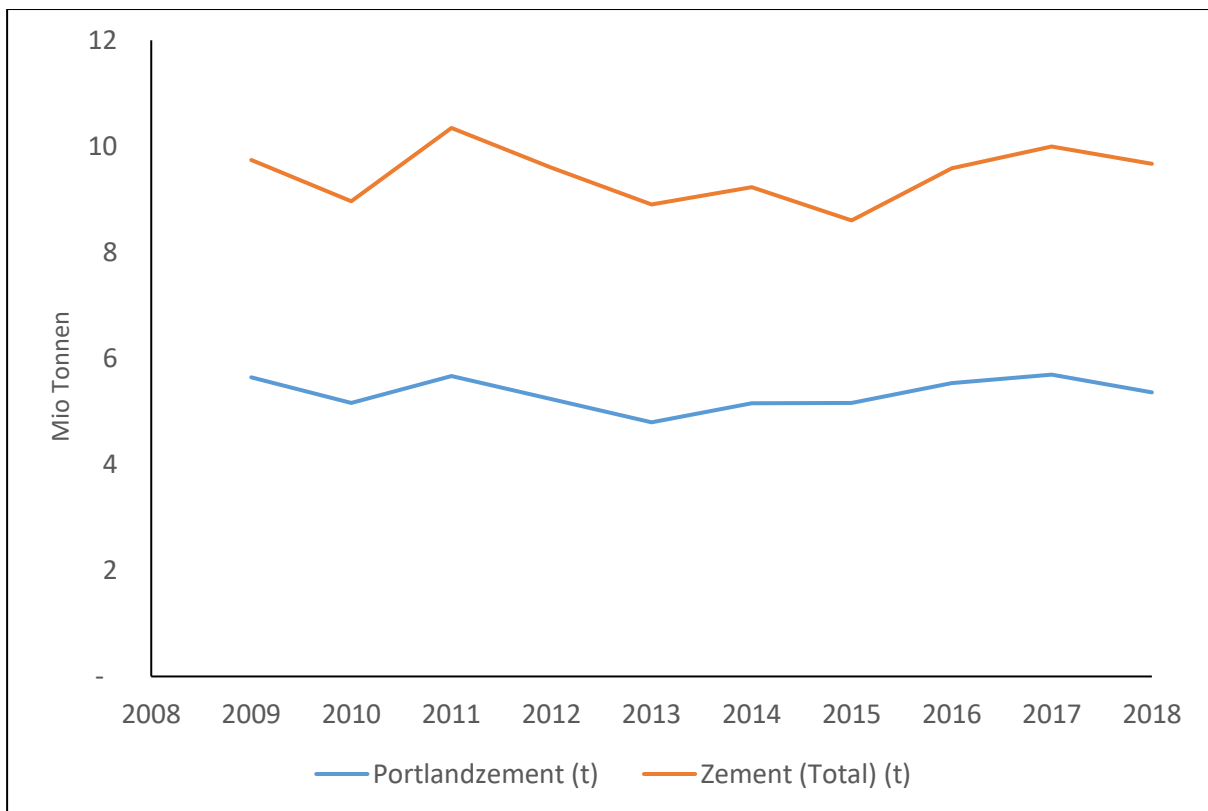


Abbildung 10: Zementproduktion in NRW 2008-2018 (IT NRW, 2020)

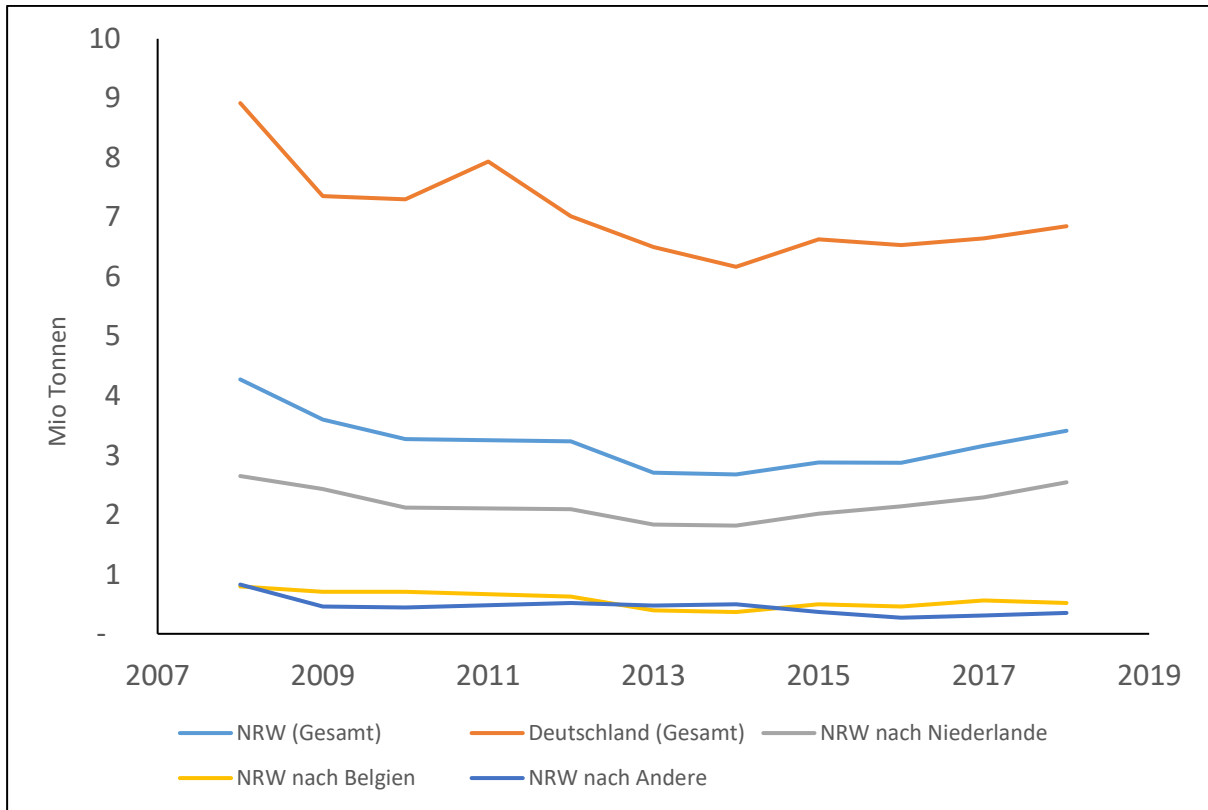


Abbildung 11: Zementexporte 2008-2018 (NRW vs. Deutschland) (DESTATIS, 2020; IT NRW, 2020)

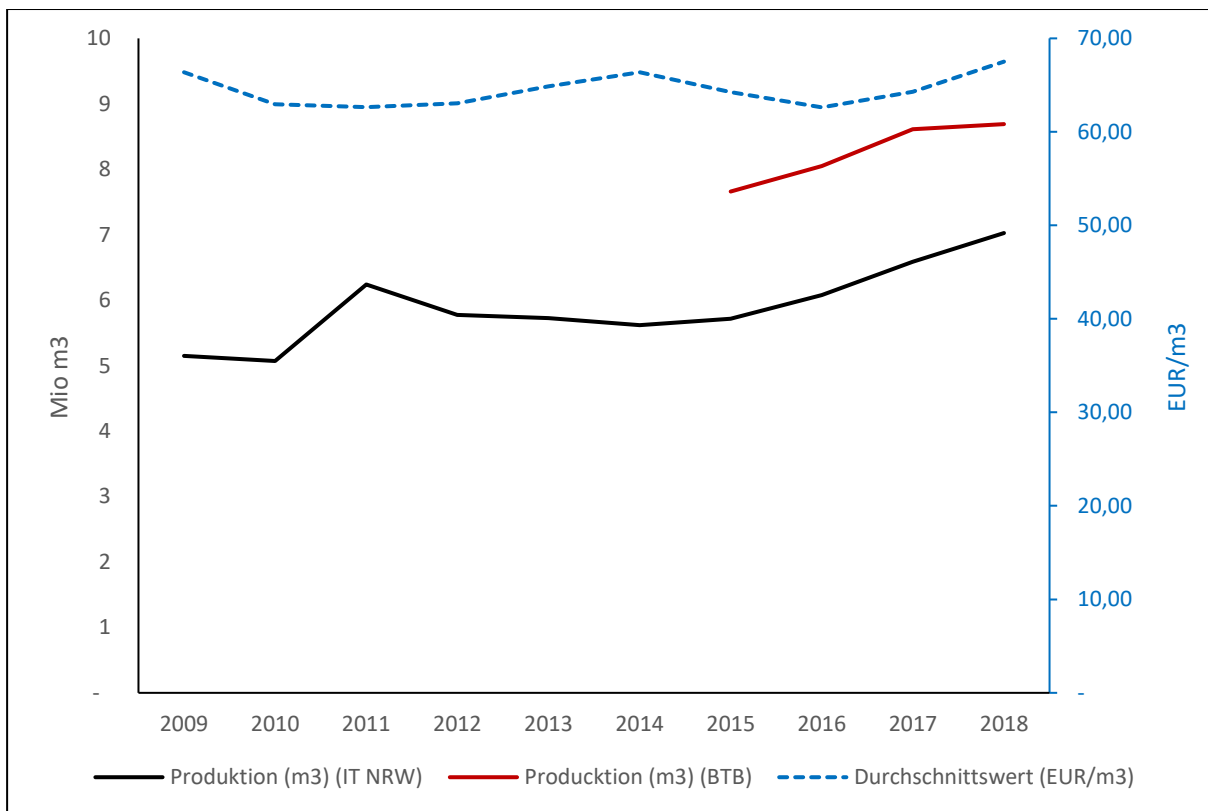


Abbildung 12: Transportbetonproduktion in NRW 2009-2018 (BTB, 2017 - 2019; IT NRW, 2020)

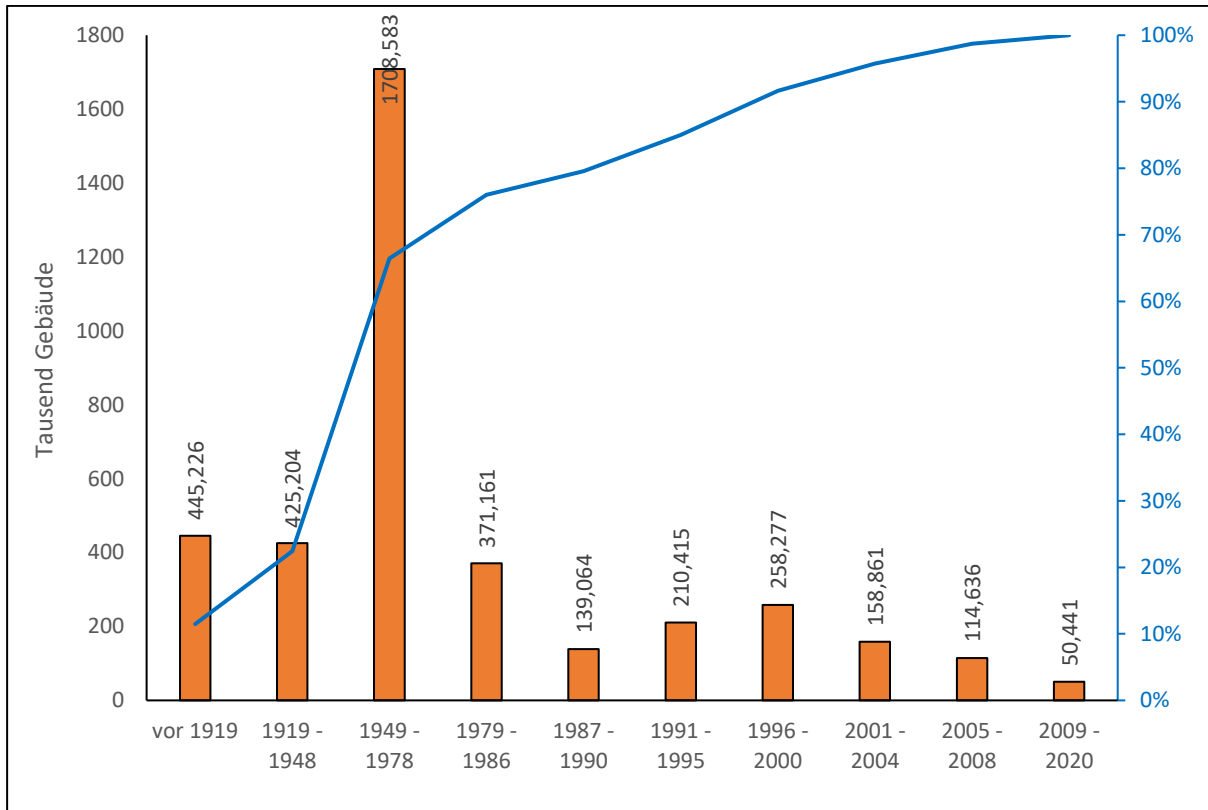


Abbildung 13: Gebäudebestand in NRW (DESTATIS, 2020)

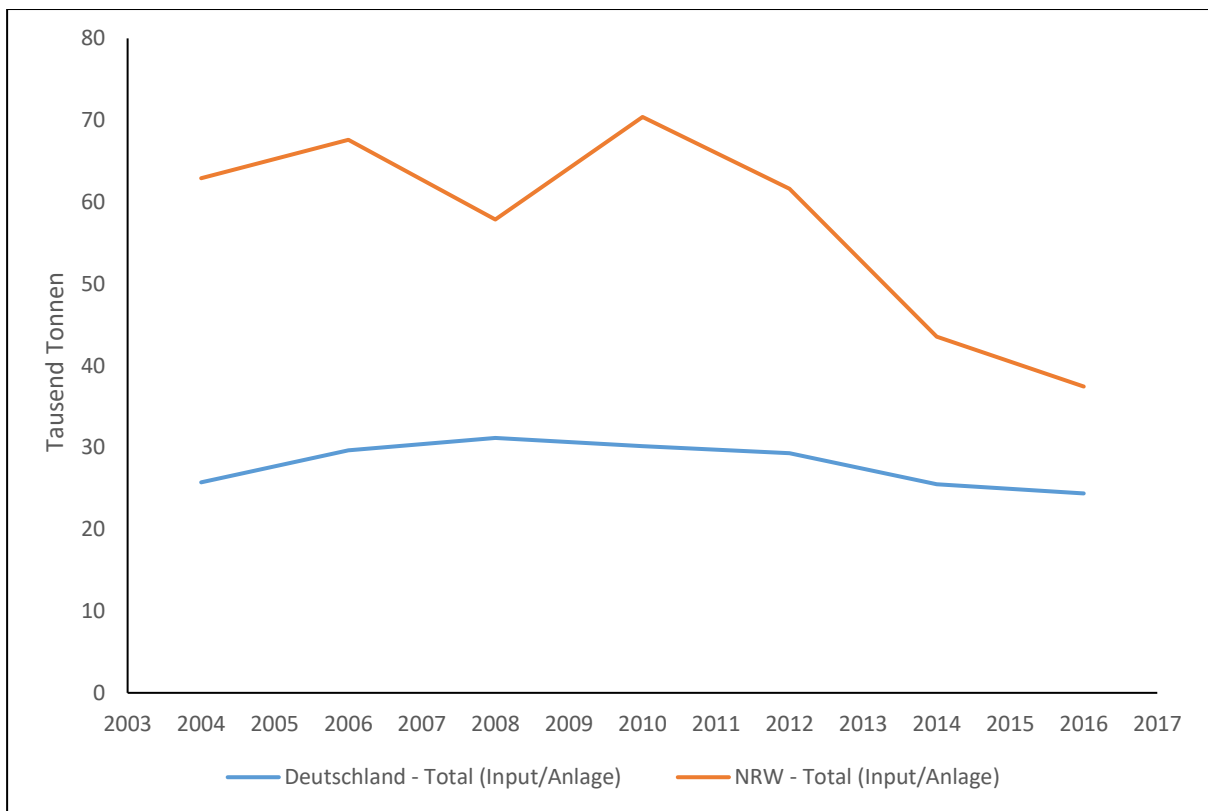


Abbildung 14: Durchschnittliche Kapazität der Recyclinganlagen (NRW vs. Deutschland) (DESTATIS, 2020; IT NRW, 2020)

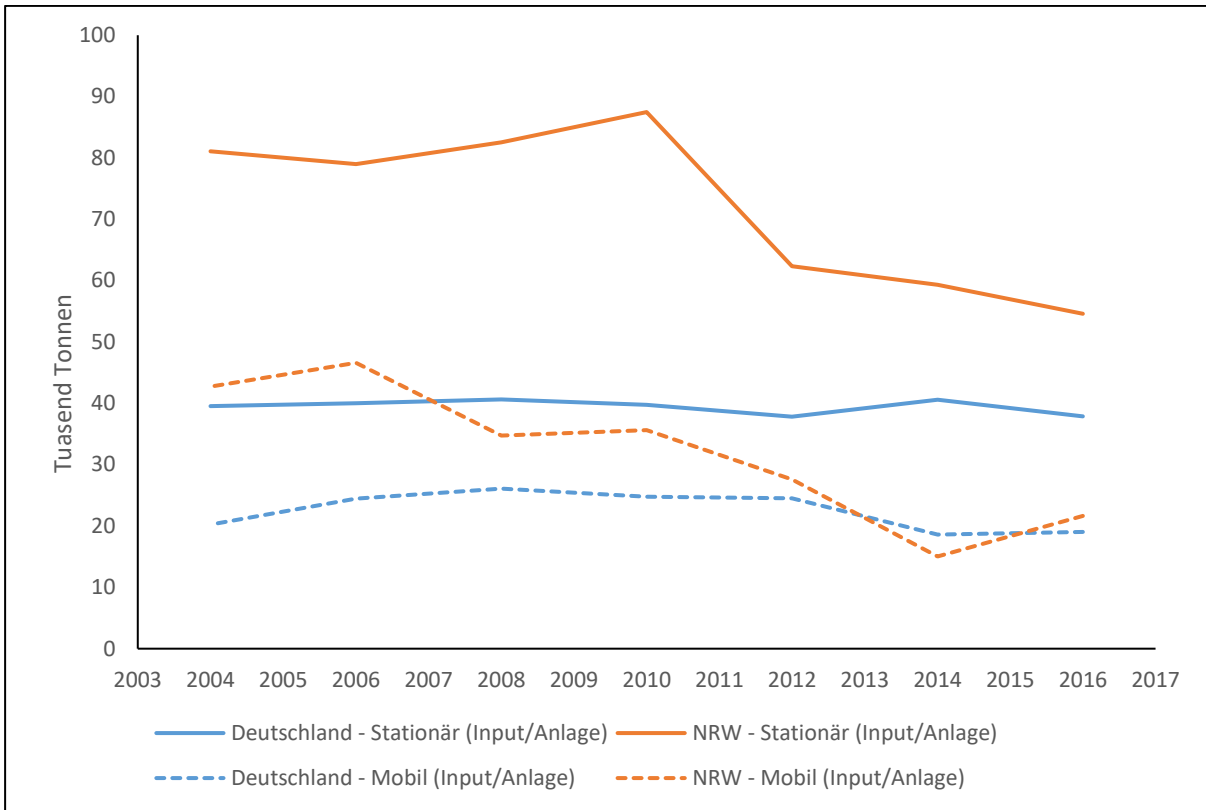


Abbildung 15: Durchschnittliche Kapazität stationärer und mobiler Recyclinganlagen (NRW vs. Deutschland) (DESTATIS, 2020; IT NRW, 2020)

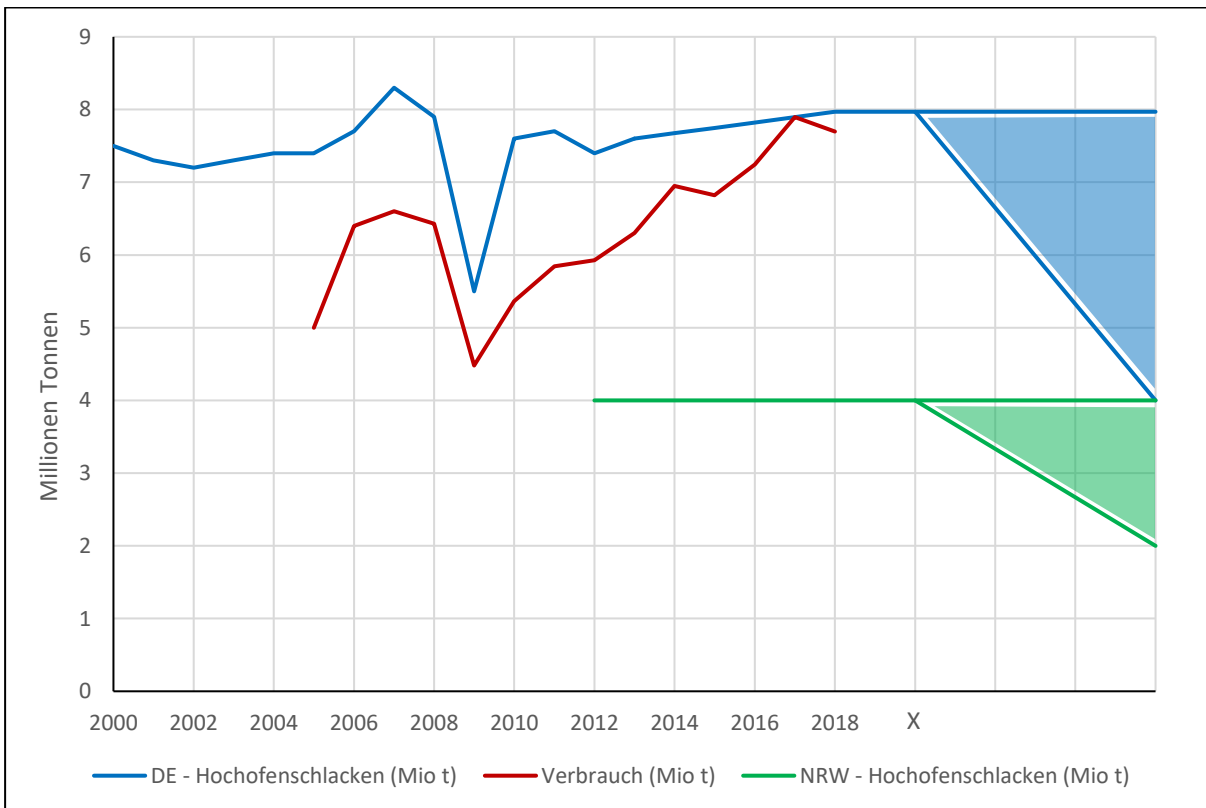


Abbildung 16: Produktion und Verbrauch von Hüttensand (Deutschland & NRW) (BBS, 2013, 2016; VDZ, 2005 - 2018)

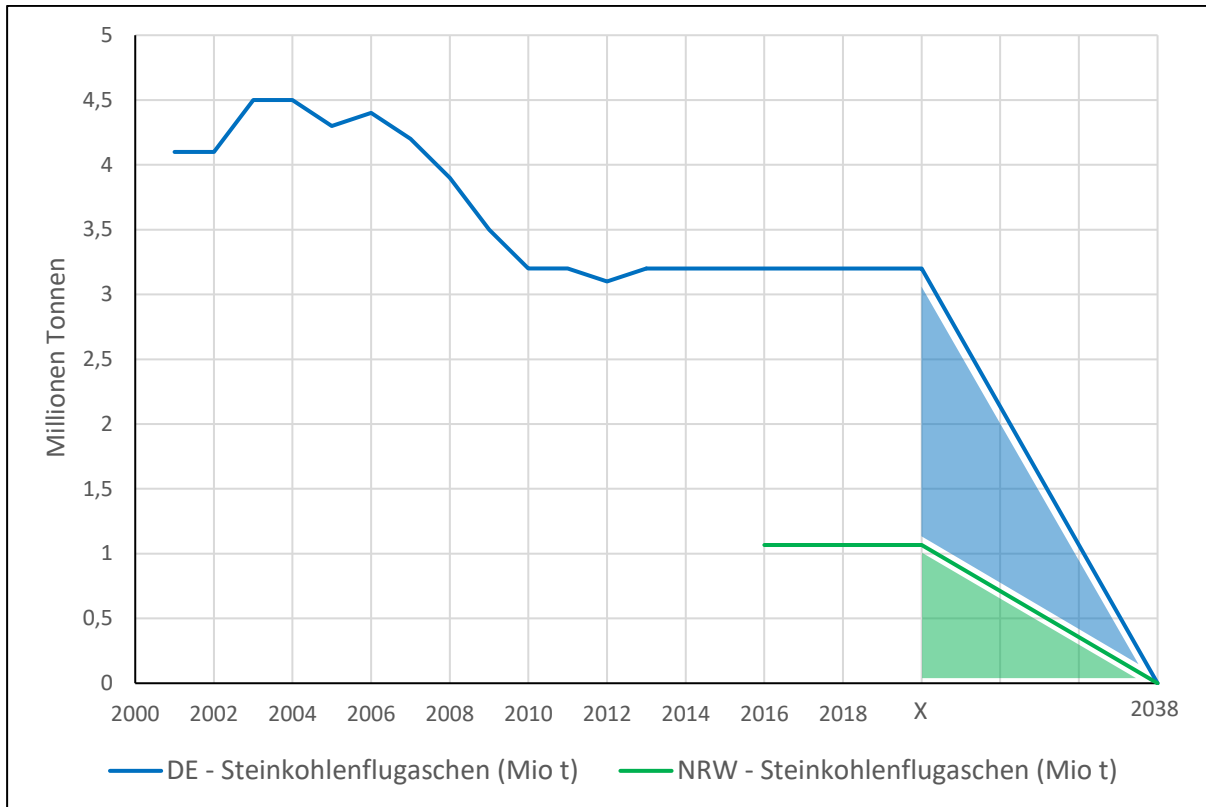


Abbildung 17: Produktion von Steinkohleflugaschen (Deutschland & NRW) (BBS, 2013, 2016)