



Einfluss des Ressourcenverbrauches im Bauwesen auf die Umwelt und das Klima

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

B.Sc. Bauingenieurwesen

an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.

Betreut von

Iryna Takser

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von

Valeria Io Muzio

Pfarrer-Sickinger-Weg 38

85579 Neubiberg

+49 175 82 16929

Eingereicht am

Neubiberg, den 23.03.2024

Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,
Arcisstraße 21, 80333 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Frau Valeria lo Muzio, Pfarrer-Sickinger-Weg 38, Neubiberg, 85579

– nachfolgend Autorin/Autor –

Die Autorin / der Autor wünscht, dass die von ihr/ihm an der TUM erstellte Bachelorarbeit mit dem Titel Einfluss des Ressourcenverbrauches im Bauwesen auf die Umwelt und das Klima

auf mediaTUM und der Webseite des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen mit dem Namen der Verfasserin / des Verfassers, dem Titel der Arbeit, den Betreuer:innen und dem Erscheinungsjahr genannt werden darf.

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und die Präsenzbibliothek des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studierenden und Besucher:innen zugänglich gemacht und veröffentlicht werden darf. Dies schließt auch Inhalte von Abschlusspräsentationen ein.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin / der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nichtausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Bachelorarbeit.

Die Autorin / der Autor versichert, dass sie/er alleinige(r) Inhaber(in) aller Rechte an der Bachelorarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Bachelorarbeit. Die Autorin / der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Bachelorarbeit als pdf-Datei hat die Autorin / der Autor dieser Vereinbarung beigelegt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Die Autorin / der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten der Autorin / des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Bachelorarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und die Autorin / der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den

, den 23.03.2024

.....



(TUM)

(Autor:in)

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Neuberg, 23.03.2024, Valeria G. Nizio

Ort, Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Vereinbarung	I
Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	V
Kurzfassung	1
Summary	3
Abkürzungsverzeichnis	4
1 Einleitung	5
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	5
1.2 Forschungsfrage und Zielsetzung	6
1.3 Methodische Vorgehensweise	6
2 Grundlagen	7
2.1 Begriffsdefinitionen	7
2.2 Unterscheidung Klima- und Umweltschutz	8
2.3 Eingrenzung des Themas	9
2.3.1 Direkte und indirekte Auswirkungen	9
2.3.2 Betrachtete Systemgrenzen	9
2.3.3 Auswahl der Ressourcen	10
3 Ressourcenverbrauch im Bauwesen	12
3.1 Sand- und Kiesverbrauch.....	13
3.2 Eisenerzverbrauch	14
3.3 Kalksteinverbrauch.....	15
3.4 Holzverbrauch	16
3.5 Wasserverbrauch	17
3.6 Flächenverbrauch.....	19
3.7 Energieträgerverbrauch.....	21
4 Einfluss auf die Umwelt und das Klima	22
4.1 Einfluss auf die Umwelt	22
4.1.1 Küsten- und Meeresbodenmorphologie	22
4.1.2 Flussmorphologie.....	25
4.1.3 Hydrologie	26

4.1.4	Boden	29
4.1.5	Atmosphäre	31
4.1.6	Flora und Fauna	31
4.2	Einfluss auf das Klima	37
4.2.1	Energiebedingte und prozessbedingte Emissionen	37
4.2.1.1	Abbau von Rohstoffen für das Bauwesen	40
4.2.1.2	Industrielle Materialienherstellung	41
4.2.1.3	Entsorgungsphase.....	42
4.2.2	Emissionen durch die Zerstörung natürlicher Kohlenstoffspeicher	42
4.2.2.1	Emissionen durch die Bodendegradation	43
4.2.2.2	Emissionen durch die Zerstörung der Vegetation.....	44
5	Indirekter Einfluss auf die Umwelt.....	47
6	Regularien.....	48
6.1	Auf globaler Ebene.....	48
6.2	Auf EU-Ebene.....	49
6.3	Auf Bundesebene	49
7	Fazit und Ausblick	51
7.1	Fazit.....	51
7.2	Ausblick	52
	Literaturverzeichnis.....	54
	Abbildungsverzeichnis.....	68
	Tabellenverzeichnis.....	71
	Anhang	72

Kurzfassung

Einfluss des Ressourcenverbrauches im Bauwesen auf die Umwelt und das Klima

Bei der Betrachtung des globalen Ressourcenkonsums von Energie, Fläche, Wasser und Rohstoffen wird deutlich, dass die Baubranche zu den ressourcenintensivsten Industrien der Welt gehört. In den letzten Jahrzehnten wurde in Zusammenhang mit Faktoren wie der wachsenden Bevölkerungsanzahl, dem steigenden Bruttoinlandsprodukt und der wachsenden Urbanisierungsrate eine proportionell steigende Bauaktivität beobachtet. Wissenschaftler betonen die Rolle des Bausektors, insbesondere bei der Minimierung des globalen Ressourcenverbrauchs, zur Erhaltung der Ökosysteme und zur Erreichung der Klimaziele (UNEP, 2022, S. 72; IPCC, 2022).

Durch eine Literaturrecherche wurden in dieser Arbeit die Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Umwelt und das Klima untersucht, mit dem Ziel, diese schematisch und tabellarisch zusammenzufassen und darzustellen. Diese Arbeit konzentriert sich auf den Verbrauch von Bausand und -kies, Eisenerz, Kalkstein, Holz, Wasser, Fläche und Energieträgern während des gesamten Lebenszyklus von Bauwerken, mit Ausnahme der Nutzungsphase.

Erstens bietet diese Arbeit einen Überblick über die verfügbaren Daten und Schätzungen zum globalen Ressourcenverbrauch im Bauwesen. Zweitens beschreibt diese Arbeit die vielfältigen Weisen, wie sich der Ressourcenverbrauch unmittelbar auf die verschiedenen Ökosysteme auswirkt. Die genaue und vollständige Identifizierung und Quantifizierung des Einflusses des Ressourcenverbrauchs auf die Ökosysteme erwies sich jedoch als schwierig. Drittens werden die THG-Emissionen analysiert, die durch den Ressourcenverbrauch im Bauwesen in die Atmosphäre freigesetzt werden. Dabei werden sowohl die grauen Emissionen des Bausektors als auch die Emissionen, die durch die Zerstörung der natürlichen Kohlenstoffspeicher (Boden und Vegetation) entstehen, behandelt. Die Arbeit analysiert und vergleicht die wichtigsten Literaturquellen, die sich mit dem Thema der grauen Emissionen des Bausektors auf globaler Ebene auseinandersetzen. Dazu werden auch die Probleme in der Berechnung der globalen grauen Emissionen beleuchtet, die dazu führen, dass die globalen grauen Emissionen des Bausektors unterschätzt werden. Die Emissionen, die der Ressourcenverbrauch im Bauwesen durch die Zerstörung der natürlichen Kohlenstoffspeicher Boden und Vegetation freisetzt, sind durch die Literatur nicht genau quantifizierbar, tragen jedoch signifikant zum Klimawandel bei. Die Arbeit erläutert auch, wie der Ressourcenverbrauch im Bauwesen zu indirekten Auswirkungen auf die Ökosysteme führt, indem er mit dem Ausstoß von THG-Emissionen zum Klimawandel beiträgt. Das Klima ist ein Bestandteil der Umwelt und beeinflusst alle Ökosysteme. Abschließend werden Politiken auf globaler, EU- und nationaler Ebene erwähnt, die darauf abzielen, die negativen Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Umwelt und das Klima zu minimieren oder zu kompensieren.

Zusammenfassend liefert diese Arbeit einen umfassenden Überblick der Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Umwelt und das Klima. Sie unterstreicht die Notwendigkeit der Einführung internationaler Regularien, um die negativen Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen zu bekämpfen. Darüber hinaus betont sie die Wichtigkeit nachhaltiger Baupraktiken, die eine möglichst

lange Lebensdauer der Bauwerke garantieren und den Übergang zu einer zirkulären Bauwirtschaft fördern.

Summary

The Impact of Resource Consumption in Construction on the Environment and the Climate

When considering the global consumption of resources like energy, land, water, and raw materials, the construction industry ranks among the most resource-demanding industries worldwide. Given the rising construction activities of recent decades, driven by factors such as population growth, rising gross domestic product, and increasing urbanization rates, scientists emphasize the importance of the construction sector in preserving the environment and achieving the international climate goals (UNEP, 2022, S. 72; IPCC, 2022). Scientists especially warn about the impacts of resource consumption construction on the environment and the climate (UNEP, 2022, S. 72; IPCC, 2022).

Through a literature review, this paper examines the impacts of the resource consumption of the construction industry on the environment and the climate. The aim of this paper is to create schemes and tables to summarize the results and provide the reader with an overview of the topic. This paper focuses on the consumption of sand and gravel, iron ore, limestone, wood, water, land, and fossil fuels during the whole life cycle of buildings and infrastructure, except the use phase.

Firstly, this paper analyses and summarizes the available information and estimations about the global resource consumption of the construction industry. Secondly, it describes how the consumption of resources directly affects the various ecosystems. However, an accurate quantification of the impacts of resource consumption in construction on the environment proved to be difficult for multiple reasons. Thirdly, this paper analyses the greenhouse emissions released because of resource consumption in construction in the atmosphere. It analyses both the grey emissions of the global construction industry sector as well as the emissions caused through the destruction of vegetation and the degradation of soil, since these elements act as carbon sinks. This paper provides an overview of the results of the most important reports that document the grey emissions of the global construction industry. It also highlights the issues in the calculation of global grey emissions of construction which leads to the underestimation of global grey emissions caused by the construction sector. The emissions resulting from the destruction of vegetation and the degradation of soils are not quantifiable through a literature review, but definitely contribute significantly to climate change. This paper also explains how the construction industry indirectly impacts the environment through the contribution to climate change, which has various consequences for the ecosystems. In conclusion, this paper discusses some international, European, and national policies that aim to mitigate or compensate for the negative impacts of climate change on the environment and climate.

In conclusion, this study provides a comprehensive overview of the impacts of resource consumption for the construction industry on the environment and the climate. It emphasizes the necessity of implementing global regulations to minimize or compensate for the negative impacts, avoid the destruction of ecosystems, and achieve the international climate goals. It also highlights of the importance of sustainable building practices that ensure a longer lifespan of the buildings or infrastructure and apply the principles of a circular construction economy.

Abkürzungsverzeichnis

BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
EU	Europäische Union
EEA	European Environment Agency
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FFI	Fossil Fuel and Industry
Gt	Gigatonne
IEA	International Energy Agency
IUCN	International Union for Conservation of Nature
LPI	Living Planet Index
Mio. t	Millionen Tonnen
N ₂ O	Lachgas
THG	Treibhausgas
UN	United Nations
UNEP	United Nations Environment Programme
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Zwischen den Jahren 1970 und 2010 hat sich die globale Bevölkerung von 3,7 auf 6,99 Milliarden Menschen nahezu verdoppelt (Roser et al., o. J.). Immer mehr Menschen müssen mit einer Unterkunft versorgt werden. Infrastrukturen müssen entsprechend angepasst oder neugebaut werden, um die Bedürfnisse der steigenden Bevölkerung zu erfüllen.

Global betrachtet ist zwischen 1970 und 2010 auch der materielle Wohlstand der Weltbevölkerung gestiegen, was Ausdruck für eine wachsende Wirtschaft und eine leistungsfähige Industrie ist. Das Bruttoinlandsprodukt ist ein Indikator für die wirtschaftliche Leistung und summiert die Werte aller hergestellten Waren und erbrachten Dienstleistungen (Statistisches Bundesamt, o. J.). Das globale Bruttoinlandsprodukt ist zwischen 1970 und 2010 von 18,09 auf 64,82 Trillionen US-Dollar gestiegen (Our World in Data, o. J. a.). Das widerspiegelt sich in der Nachfrage nach Infrastrukturen, guten Vernetzungswegen und Immobilien wieder.

Zwischen 1970 und 2010 ist der Anteil der Weltbevölkerung, die in urbanen Gebieten wohnt, von 36,59% auf 51,66% gestiegen (Our world in Data, o. J.b). Im Jahre 2010 lebten 2,257 Billionen mehr Menschen in urbanen Räume im Vergleich zum Jahre 1970 (Roser et al., o. J.) (Our world in Data, o. J.b). Städte mussten ausgebaut werden, um die Bevölkerungskapazitäten zu erhöhen und die großen Zuwanderungsflüssen zu ermöglichen.

Diese drei Faktoren haben dazu geführt, dass sich die Bautätigkeit erhöht hat. Das ist direkt mit einem größeren Verbrauch verbunden: von Baumaterialien, Energie, Wasser und Fläche. Die Baubranche gehört zu den ressourcenintensivsten Industrien der Welt. Global verbraucht das Bauwesen 37% des Endenergieverbrauchs (IEA, o. J.). Global ist es nicht möglich, eine genaue Aussage über den gesamten Rohstoff- und Flächenverbrauch des Bauwesens zu treffen. In Deutschland sind jedoch 550 Millionen Tonnen, also 75% der national abgebauten Rohstoffe, Baumineralien (Umweltbundesamt, 2022a, S. 15), und 14,5% der nationalen Fläche ist Siedlungs- und Verkehrsfläche.

Wissenschaftler warnen vor den Auswirkungen des globalen Ressourcenverbrauchs auf die Ökosysteme. Durch Vorfälle wie in Corrêgo do Feijao, wo im Jahr 2019 der Damm, der zur Lagerung von Rückständen aus dem Eisenerzabbau verwendet wurde, den Druck nicht standhalten konnte und mit irreversiblen Schäden für die Umwelt, zusammenbrach, erreichte die Thematik des Einflusses des Ressourcenverbrauches im Bauwesen auf die Umwelt auch die Medien (Quintarelli et al., 2023). Ein hoher Ressourcenverbrauch impliziert teilweise auch hohe Emissionen. Im IPCC-Bericht wird die Wichtigkeit des Gebäudesektors betont, um die internationale Klimaziele zu erreichen. Die Arten, wie sich der Ressourcenverbrauch im Bauwesen auf die Umwelt und das Klima auswirkt, sind vielfältig. Die zu verstehen, ist wichtig, um die negativen

Konsequenzen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Umwelt und das Klima zu minimieren.

1.2 Forschungsfrage und Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist, folgende Forschungsfragen zu beantworten:

- Welche Auswirkungen hat der Ressourcenverbrauch im Bauwesen auf die Umwelt?
- Welche Auswirkungen hat der Ressourcenverbrauch im Bauwesen auf das Klima?
- Was sind die Wechselwirkungen zwischen den Auswirkungen auf die Umwelt und den Auswirkungen auf das Klima?

Die Ergebnisse werden schematisch und tabellarisch zusammengefasst und dargestellt.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Als Literaturquellen wurden beispielweise Berichte von nationalen Institutionen wie dem Umweltbundesamt, der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, dem Statistischen Bundesamt, usw. benutzt. Dazu wurden auch Daten und Berichte von internationalen Organisationen wie der International Energy Agency (IEA), International Panel on Climate Change (IPCC), United Nations Environment Program (UNEP) usw. verwendet. Für spezifische Informationen und Fallbeispiele wurden wissenschaftliche Arbeiten aus Plattformen wie ResearchGate, SpringerLink und ScienceDirect usw. herangezogen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden Begriffe definiert und Konzepte erläutert, die für das Verständnis der Arbeit wichtig sind.

2.1 Begriffsdefinitionen

Rohstoffe:

Unverarbeitete Materialien, die als Eingabe in den Produktionsprozess eingesetzt werden und in das hergestellte Produkt eingehen (Gabler Wirtschaftslexikon, 2018a). Rohstoffe bilden den materiellen Kernbestandteil der Produkte (Gabler Wirtschaftslexikon, 2018a).

Ressource:

Rohstoffe sind als Ressourcen zu verstehen, jedoch ist das Konzept von Ressourcen breiter gefasst als das von Rohstoffen. Es beschränkt sich nicht nur auf Materialien, sondern umfasst auch andere Faktoren, wie z.B. Wissen, Arbeitskräfte, finanzielle Ressourcen, Maschinen, Raum und Fläche und viele weitere. Im Allgemeinen sind Ressourcen Mittel oder Bestände, die als Eingabe in den Produktionsprozess eingesetzt werden und in das hergestellte Produkt oder in die erbrachte Dienstleistung eingehen (Gabler Wirtschaftslexikon, 2018b).

Rohstoffe im Bauwesen:

In dieser Arbeit werden unter Rohstoffen im Bauwesen alle unverarbeiteten Materialien verstanden, die als Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Bauteilen dienen. Darunter gehören z.B. Sand, Kies, Eisenerz, Holz, usw.

Ressourcen im Bauwesen:

Für diese Arbeit werden ausschließlich natürliche Ressourcen berücksichtigt. Menschliche, finanzielle oder weitere Arten von Ressourcen werden nicht betrachtet. In dieser Arbeit werden unter Ressourcen im Bauwesen sowohl Rohstoffe im Bauwesen (Sand, Kies, Holz, usw.) als auch weitere Ressourcen verstanden, die während der Herstellungs-, Errichtungs- und Entsorgungsphase von Gebäuden und Infrastrukturen verbraucht werden (Fläche, Wasser, Energie in Form von Strom und Wärme).

Hochbau:

Bau von Gebäuden.

Infrastrukturen:

Kommt aus dem lateinischen Begriff „infra“, was so viel wie „unten“ bedeutet (DWDS, 2021). „Infrastruktur“ kann also wortwörtlich als „Unterbau“ übersetzt werden (DWDS, 2021). Im Kontext dieser Arbeit werden damit allgemein alle Bauwerke bezeichnet, die nicht dem Hochbau zugeordnet sind.

Bauwerke:

Unter Bauwerken werden sowohl Gebäude als auch Infrastrukturen gemeint.

Umwelt:

In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff „Umwelt“ auf die natürliche Umwelt. „Natürlich“ bedeutet dabei, dass sie unabhängig vom menschlichen Handeln existiert, jedoch trotzdem durch menschliche Aktivitäten beeinflusst werden kann. Die natürliche Umwelt setzt sich aus allen Ökosystemen zusammen, die sowohl lebenden (Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen) als auch unbelebte (Luft, Wasser, Boden, usw.) Bestandteile umfassen (Gabler Wirtschaftslexikon, 2018c).

Klima:

Beschreibt den durchschnittlichen Zustand der meteorologischen Bedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, Niederschlag an einem bestimmten Ort oder in einer Region über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren (Umweltbundesamt, 2021a).

2.2 Unterscheidung Klima- und Umweltschutz

Die Begriffe „Umwelt“- und „Klimaschutz“ sind nicht miteinander zu verwechseln oder als Synonyme zu betrachten. Es ist wichtig für das Verständnis dieser Arbeit, diese zwei Begriffe zu unterscheiden.

Klimaschutz bezieht sich auf die Reduktion oder Kompensation der negativen Einflüsse menschlicher Aktivitäten auf das Klima. Hierbei stehen vor allem Treibhausgasemissionen im Fokus, die zum Klimawandel beitragen. Die Rolle des Bausektors im Klimaschutz besteht sowohl in der Minimierung von Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger und industrieller Prozesse als auch im Schutz natürlicher Kohlenstoffspeicher wie Boden und Vegetation.

Umweltschutz bezieht sich auf die Reduktion oder Kompensation der negativen Einflüsse menschlicher Aktivitäten auf die Ökosysteme. Umweltschutz umfasst sich mit einem deutlich breiteren Spektrum an Themen als Klimaschutz; von Umweltverschmutzung zu Artensterben und Klimawandel. Die Rolle des Bausektors im Klimaschutz besteht darin, durch nachhaltige Praktiken die Zerstörung der Umwelt zu minimieren.

Klimaschutz ist ein Teilbereich des Umweltschutzes aus zwei Gründen: Erstens gibt es keine Faktoren, die das Klima schädigen, ohne gleichzeitig direkt auch die Umwelt zu schädigen. Treibhausgasemissionen sind ein Beispiel: Sie führen nicht nur zu Klimawandel, sondern verunreinigen auch unmittelbar die Atmosphäre und tragen zur Versauerung der Ozeane bei. Zweitens ist Klima ein Bestandteil der Umwelt. Klimatische Bedingungen wie Temperaturen, Niederschläge und Strahlungen beeinflussen die Ökosysteme und die Lebensbedingungen aller Organismen auf der Erde. Bereits heute wird beobachtet, wie der Klimawandel Phänomene wie Desertifikation vorantreibt, die Ökosysteme radikal verändern können.

Somit impliziert Klimaschutz auch direkt Umweltschutz. Das Umgekehrte trifft aber nicht zu. Eine negative Auswirkung auf die Umwelt kann für das Klima komplett irrelevant sein. Beispielsweise die Plastikverschmutzung der Meere oder das Absterben einer Tierart haben keine Auswirkungen auf das Klima.

2.3 Eingrenzung des Themas

2.3.1 Direkte und indirekte Auswirkungen

In dieser Arbeit wird das Thema in folgender Reihenfolge behandelt: Zunächst wird der Ressourcenverbrauch im Bauwesen analysiert. Anschließend werden die direkten Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs auf die Umwelt behandelt, die in sechs Wirkungsebenen unterteilt werden: Auswirkungen auf die Küsten- und Meeresbodenmorphologie, auf die Flussmorphologie, auf die Hydrologie, auf die Böden, auf die Atmosphäre und auf die Flora und Fauna. Dabei bezieht sich der Begriff „Umwelt“ auf die verschiedenen Ökosysteme, die vom Ressourcenverbrauch im Bauwesen direkt beeinflusst werden. Danach werden die THG-Emissionen im Bauwesen analysiert, die zum Klimawandel beitragen. Abschließend wird erläutert, wie sich der Klimawandel auf die Umwelt bzw. die Ökosysteme auswirkt. Dabei werden einige Auswirkungen des Klimawandels auf die Umwelt genannt. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Umwelt werden als indirekte Folgen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen betrachtet.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den direkten Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Umwelt bzw. auf die Ökosysteme, unterteilt in den sechs verschiedenen Wirkungsebenen, und auf der Analyse der THG-Emissionen, die durch den Ressourcenverbrauch im Bauwesen entstehen und zum Klimawandel beitragen. Eine ausführliche Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Umwelt findet in dieser Arbeit nicht statt.

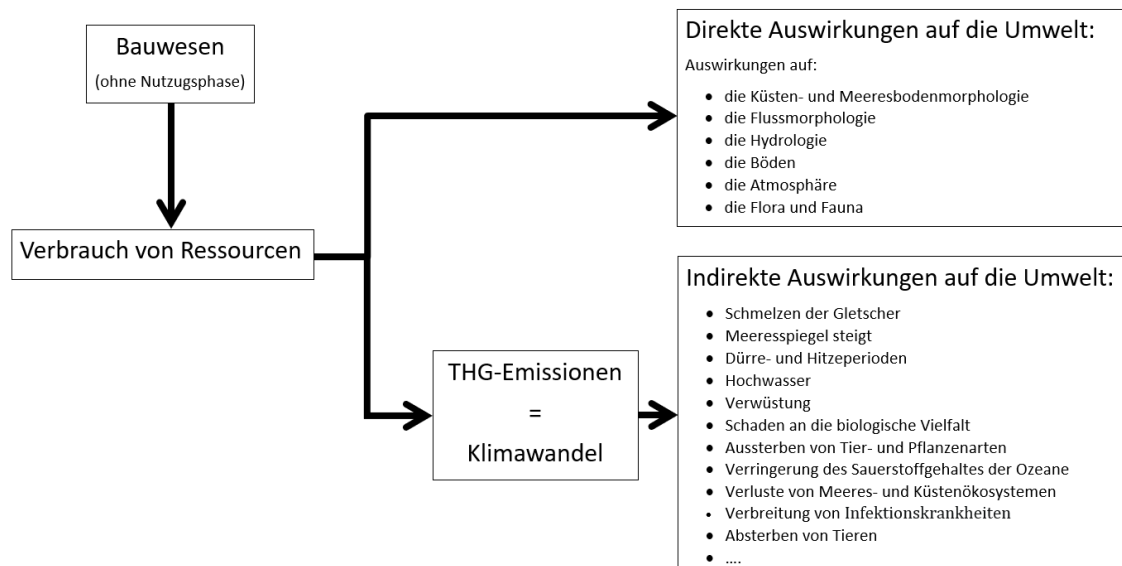


Abbildung 1: Strukturierung der Arbeit (eigene Darstellung)

2.3.2 Betrachtete Systemgrenzen

In dieser Arbeit werden die Ressourcen betrachtet, die während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes oder einer Infrastruktur, mit Ausnahme der Nutzungsphase, verbraucht werden. Die betrachteten Lebenszyklusphasen umfassen die Herstellungsphasen (A1-A3), die Errichtungsphasen (A4-A5) und die Entsorgungsphasen (C1-C4) (Abbildung 22 im Anhang). Jede dieser Phasen ist

wiederum in kleinere Abschnitte unterteilt, wie in der Abbildung 2 dargestellt ist. Ergänzende Informationen außerhalb des Lebenszyklus des Gebäudes oder der Infrastruktur werden nicht berücksichtigt.

2.3.3 Auswahl der Ressourcen

Der Konsum bestimmter ausgewählter Ressourcen im Bauwesen wird in dieser Arbeit eingehend untersucht. Die Auswirkungen auf die Umwelt und das Klima, die im Kapitel 4 erläutert werden, beziehen sich auf die Auswirkungen des Konsums der ausgewählten Ressourcen.

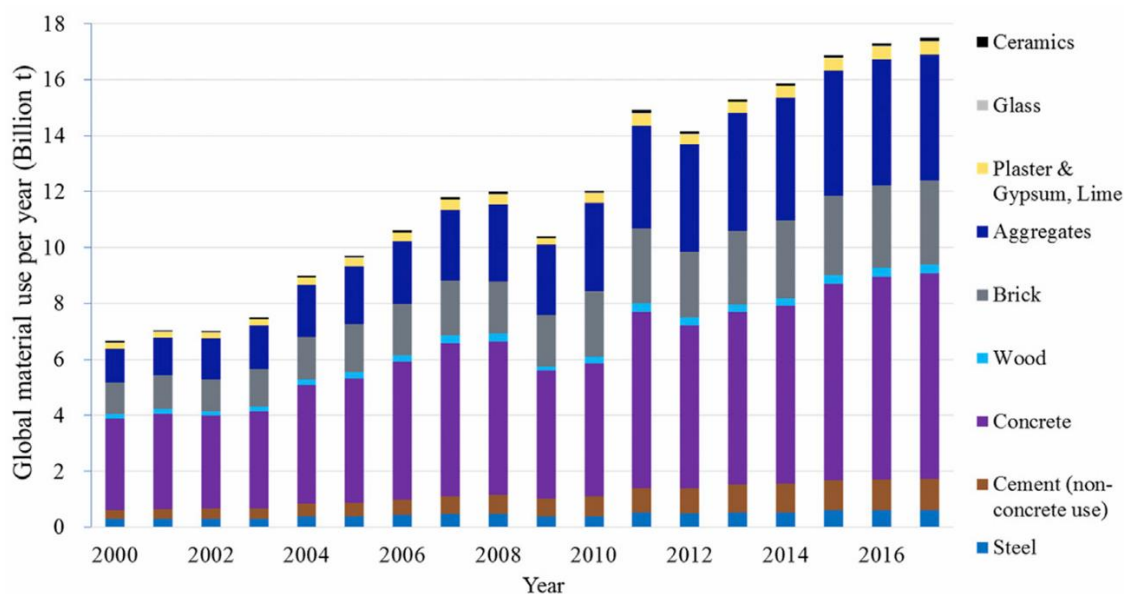


Abbildung 2: Globaler Verbrauch von Baumaterialien nach Materialtyp im Zeitraum von 2000 bis 2017 (Huang et al., 2020, S. 565)

Erstens werden Rohstoffe betrachtet, die als Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Baumaterialien dienen. Die Auswahl der betrachteten Rohstoffe im Bauwesen basiert auf folgenden Kriterien:

1. Die Höhe des Rohstoffverbrauchs im Bauwesen
2. Die Bedeutung der mit den Rohstoffen hergestellten Baumaterialien
3. Die Relevanz des Rohstoffes für die Umwelt und das Klima

Beton ist das am weitesten verbreitete Baumaterial (IPCC, 2022, S. 975) (Abbildung 2). Seine hohe Druckfestigkeit, ausgezeichneten thermischen Eigenschaften, Vielseitigkeit und Beständigkeit gegen chemische Angriffe haben Beton zu einem weit verbreiteten Material in allen Bereichen des Bauwesens gemacht (TU Graz, 2022). Die genaue Zusammensetzung von Beton variiert je nach Betonart. In der Regel gehören Sand, Kies, Wasser, Zement und Zusatzstoffe zu den Hauptbestandteilen von Beton. Durchschnittlich besteht Beton zu etwa 75 % aus Sand und Kies (Zeghich, 2006, S. 27), dessen Verbrauch in dieser Arbeit zuerst analysiert wird. Sand und Kies finden auch außerhalb der Betonherstellung vielfältige Anwendungen als Aggregate im Bauwesen (Abbildung 2).

In der Abbildung 2 ist erkennbar, dass Stahl das am häufigsten verwendete metallische Baumaterial ist. Der Verbrauch von Stahl im Bauwesen ist stark mit der Herstellung von Stahlbeton verbunden. Stahl wird industriell aus Eisen hergestellt, das als mineralische Substanz in Eisenerz vorkommt (Earth Sciences Museum, 2013).

Zement ist ein weit verbreitetes Material im Bauwesen und fungiert hauptsächlich als Bindemittel für Beton. Zusätzlich zu seiner Verwendung in der Betonherstellung findet Zement auch weitere Anwendung im Bauwesen, die den Verbrauch außerhalb der Betonherstellung erklären (Abbildung 2). Der Verbrauch von Kalkstein wird in dieser Arbeit näher untersucht, da dieses Material ein wesentlicher Bestandteil von Zement ist und auch eine wichtige Rolle bei der Herstellung von Ziegelsteinen spielt (BVK, o. J.).

Holz gehört zu einer der ältesten Baumaterialien und spielt heutzutage immer noch eine wichtige Rolle in der Baubranche (IPCC, 2022, S. 975). Bauholz wird als umweltfreundlichere Alternative zu anderen Baumaterialien, wie Stahl und Beton, betrachtet (WWF, 2019a). Dennoch ist es wichtig anzumerken, dass Wälder als bedeutende Kohlenstoffsenken fungieren und eine entscheidende Rolle im Kohlenstoffkreislauf der Erde und in der Regulation des Klimas spielen.

Weiterhin wird der Verbrauch der Ressource Wasser im Bauwesen angesprochen. Wasser wird während jeder Phase des Lebenszyklus eines Bauwerkes auf verschiedene Weisen verbraucht.

Im Anschluss wird die Ressource Fläche betrachtet. Die Expansion des Bauwesens erfordert eine verstärkte Nutzung von Flächen. So wie Wälder spielen auch Böden eine entscheidende Rolle in der Regulation des Klimas. Der Flächenverbrauch im Bauwesen führt zu Landnutzungsänderungen, die die Funktion von Böden als Kohlenstoffspeicher beeinflussen.

Zum Schluss erfolgt eine Analyse des Energieverbrauchs im Bauwesen. In dieser Arbeit wird vor allem auf die Emissionen eingegangen, die durch die energetische Nutzung fossiler Brennstoffe entstehen. Die Umweltauswirkungen des Abbaus von Energieträgern werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

3 Ressourcenverbrauch im Bauwesen

Im Jahr 2019 wurden weltweit insgesamt 96,1887 Gt Rohstoffe abgebaut (International Resource Panel, o. J.). Wenn diese Menge durch die damalige weltweite Bevölkerungszahl von 7,76 Milliarden (Roser et al., 2013) geteilt wird, ergibt sich ein Wert von 12,3955 Tonnen Rohstoffen pro Person. Von dieser Gesamtmenge entfielen 43,705 Gt auf nicht-metallische Mineralien, 25,973 Gt auf Biomasse, 15,992 Gt auf fossile Energieträger und 9,573 Gt auf metallische Rohstoffe (International Resource Panel, o. J.) (Abbildung 3).

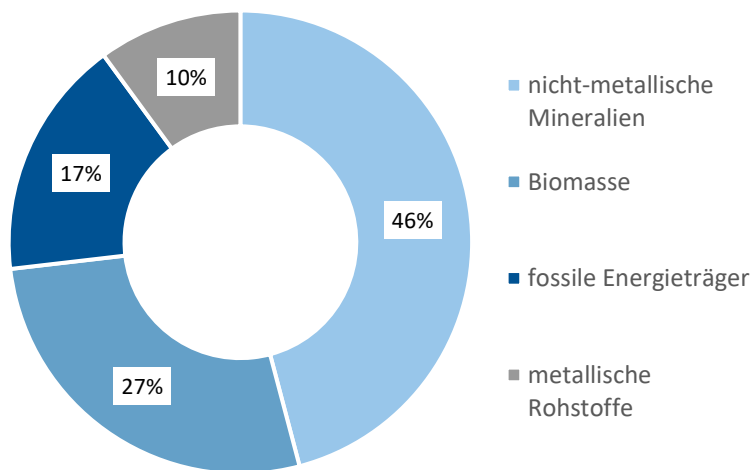


Abbildung 3: Globaler Rohstoffabbau nach Kategorie (eigene Darstellung nach International Resource Panel, o. J.)

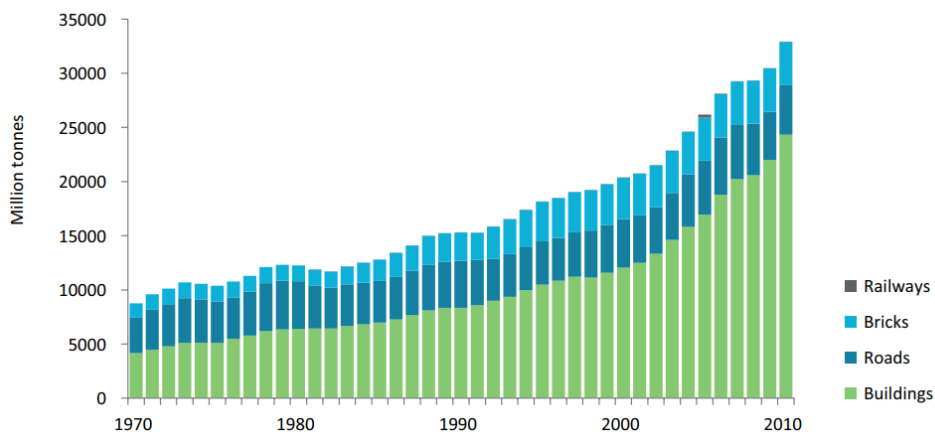


Abbildung 4: Globaler Abbau von nichtmetallischen Mineralien nach Verwendungsbereich (Schandl et al., 2017, S. 159)

Nicht-metallische Mineralien sind die am schnellsten wachsende extrahierte Rohstoffkategorie weltweit (Schandl et al., 2017, S. 33). Die extrahierten nicht-metallischen Rohstoffe werden fast ausschließlich im Bauwesen eingesetzt, sowohl global als auch in Deutschland (Schandl et al., 2017, S. 159) (Umweltbundesamt, 2022a, S. 15) (Abbildung 4). Von den in Deutschland im Jahr 2019 733 Millionen Tonnen

abgebauten Rohstoffen waren 550 Millionen Tonnen Baumineralien, was einem Anteil von 75% entspricht. Zu den abgebauten nicht-metallischen Rohstoffen gehören in erster Linie Kies, gefolgt von Sand, Ton, Kalkstein und Gips (Schandl et al., 2017, S. 158; Umweltbundesamt, 2022a, S. 15).

Es wurden keine Angaben gefunden über den Anteil der abgebauten metallischen Rohstoffe, die im Bauwesen eingesetzt werden, weder global noch national.

3.1 Sand- und Kiesverbrauch

Gemäß der Norm EN ISO 14688:2002 werden Sand und Kies als Sedimentgesteine betrachtet. Sand umfasst mineralische Körper mit einer Korngröße zwischen 0,063 und 2,0 mm, während Kies mineralische Körper mit einer Korngröße zwischen 2,0 und 63 mm einschließt (EN ISO 14688, 2002, S. 11). Sand und Kies sind weltweit die am häufigsten genutzten Ressourcen nach Wasser, gemessen am Volumen (Peduzzi, 2014, S. 10). Die Gewinnung von Sand erfolgt in der Regel lokal, um lange Transportwege zu vermeiden und die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten (UNEP, 2019, S. 3). Dies bedeutet auch, dass die Auswirkungen des Sand- und Kiesabbaus lokal variieren können.

Zuverlässige Dokumentationen über den Sand- und Kieskonsum existieren nur in wenigen Industrieländern (Krausmann, 2009, S. 2698). Es existieren keine zuverlässigen globalen Daten zum Sand- und Kiesverbrauch (Krausmann, 2009, S. 2698), was auf unzureichende Dokumentation und illegale Aktivitäten zurückzuführen ist (KoeHNken, 2018, S. 6). In 70 Ländern wurde illegale Gewinnung von Sand und Kies gemeldet (KoeHNken, 2018, S. 6).

Eine Schätzung des weltweiten Sand- und Kiesverbrauchs für die Betonherstellung lässt sich anhand der Zementproduktion ableiten. Die UNEP hat für das Jahr 2012, in dem insgesamt 3,7 Milliarden Tonnen Zement produziert wurden, eine geschätzte Menge von 25,9 bis 29,6 Milliarden Tonnen an Gesteinskörnungen allein für die Betonherstellung ermittelt (UNEP, 2014, S. 1). Mit einer ähnlichen Menge an Beton könnte eine Mauer von 27 Metern Höhe und 27 Metern Breite um den Äquator gebaut werden (UNEP, 2014, S. 2). Wenn zusätzlich die Aggregate berücksichtigt werden, die für den Straßenbau verwendet werden, steigt diese Schätzung auf über 40 Milliarden Tonnen (UNEP, 2014, S. 2).

In Anbetracht der wachsenden Desertifikation scheint die weltweite Verfügbarkeit von Sand groß zu sein (YanJun et al., 2021, S. 1). In Regionen mit ausgedehnten Wüstenflächen ist Sand eine leicht zugängliche und kostengünstige Ressource (YanJun et al., 2021, S. 2). Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass nicht jeder Sandtyp für die Betonherstellung geeignet ist. Wüstensand ist oft zu fein und weist zu glatte und gerundete Körner auf (YanJun et al., 2021, S. 2). In Beton führt dies zu einer unzureichenden Haftung und resultiert in einer schwächeren Bindung. Stattdessen wird für die Betonherstellung Gesteinskörnungen mit kantigen Körnern und einer breiteren Korngrößenverteilung bevorzugt, die eher in Flussbetten und an Stränden zu finden sind (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 2).

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland 262 Mio. t Bausand- und -kies genutzt (Baier et al., 2022, S. 24) (Abbildung 23 im Anhang). Dafür wurden insgesamt 309 Millionen Tonnen Rohmaterial abgebaut (Elsner, 2022a, S. 9). Die geförderte Sand- und Kiesmenge wurde fast ausschließlich im Bauwesen eingesetzt (Elsner, 2022a, S. 12).

Die Nachhaltigkeit des Sand- und Kiesabbaus steht infrage, da der gegenwärtige Abbau aus Flüssen und Stränden die natürliche Regenerationsrate übersteigt. Sand- und Kiesreserven sind schwer zu quantifizieren und zu schätzen (U.S. Geological Survey, 2023a, S. 2). Die Erde produziert seit Milliarden von Jahren Sand und Kies. In Deutschland sind die nationalen Vorkommen jedoch ausreichend, um den Bedarf der Bauindustrie an Sand und Kies für viele Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende zu decken (Elsner, 2022b, S. 60). Allein das Elbtalglazialbecken liefert Deutschland einen Vorrat von 350 Milliarden Tonnen Kiessand, der ausreichen sollte, um den deutschen Bedarf im Bauwesen für über 1.000 Jahre zu decken. Zusätzlich verfügen die deutschen Teile der Oberrheinischen Tiefebene über noch größere Vorräte von mehr als 500 Milliarden Tonnen an Sand und Kies (Elsner, 2022b, S. 131). Ein Großteil dieser Reserven ist jedoch nicht direkt zugänglich, da sie entweder unter Schutzgebieten liegen, wie beispielsweise Wasserschutz-, Naturschutz-, Landschaftsschutz-, Flora-Fauna-Habitat-, Natura 2000-Schutzgebieten, oder auf städtischen oder landwirtschaftlich genutzten Flächen, wie Wohngebieten, Straßen und Eisenbahnlinien (Elsner, 2022b, S. 25).

3.2 Eisenerzverbrauch

Stahl wird industriell aus Eisen hergestellt (Stahlinstitut VDEh, o. J.). In der Natur befindet sich Eisen in verschiedenen Verbindungen (Earth Sciences Museum, 2013), wie Hämatit (Fe_2O_3) oder Magnetit (Fe_3O_4) (U.S. Geological Survey, o. J.). Eisenerz ist eine natürliche mineralische Substanz mit einem hohen Anteil an Eisenverbindungen, die für die Stahlproduktion abgebaut wird (Earth Sciences Museum, 2013). Etwa 98% des global abgebauten Eisenerzes wird für die Stahlproduktion verwendet (U.S. Geological Survey, o. J.).

Die weltweite Rohstahlproduktion betrug im Jahr 2022 insgesamt 1,886 Gt (Worldsteel Association, 2022). Über 50% des weltweit produzierten Stahls wird im Bauwesen verwendet (Worldsteel Association, 2022).

Deutschland war im Jahr 2022 der größte Stahlproduzent der EU mit einer Produktion von 37 Millionen Tonnen Rohstahl (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2023), wovon 35 % in der Bauindustrie verwendet wurden (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2023). Der Bausektor ist in Deutschland für den größten Stahlkonsum verantwortlich, gefolgt vom Automobilsektor.

Stahl wird weltweit zu 30 % (IEA, 2020) und in Deutschland zu 44% (Birnstengel, 2020; Statista, 2023a; Statista, 2023b) aus recycelten Stahlschrott hergestellt. Die Stahlproduktion aus Stahlschrott ist deutlich energieeffizienter und benötigt nur 1/8 der Energie im Vergleich zur Stahlherstellung aus Eisenerz (IEA, 2020). Das Recyceln von Stahlschrott ist also nicht nur umweltfreundlich und ressourcenschonend, sondern auch wirtschaftlich sinnvoll. Aus diesen Gründen hat Stahl eine sehr hohe Recyclingrate, die global zwischen 80 und 90% liegt (IEA, 2020).

Allerdings reicht der weltweit produzierte Stahlschrott allein nicht aus, um die jährliche Nachfrage der Stahlindustrie zu decken (IEA, 2020). Global wird Rohstahl zu 70% aus abgebautem Eisenerz produziert (IEA, 2020), in Deutschland zu 56% (Birnstengel, 2020; Statista, 2023; Statista 2023). Im Jahr 2022 wurden insgesamt 2,6 Gt Eisenerz für die Stahlproduktion abgebaut (U.S. Geological Survey, 2023b). Da über die Hälfte des global produzierten Stahls im Bauwesen eingesetzt wird (Worldsteel Association,

2022), kann behauptet werden, dass im Jahr 2022 mindestens 1,3 Gt Eisenerz für den Stahlverbrauch im Bauwesen abgebaut wurden.

In der Gesamtmenge an abgebautem Eisenerz sind die Rückstände aus der Eisenerzgewinnung nicht enthalten. Bei der Metallextraktion entstehen erhebliche Mengen an Rückständen, die ungefähr 75%-80% der gesamten Metallextraktion ausmachen (Krausmann et al., 2009, S. 2699). Das bedeutet für 2,6 Gt an global abgebautem Eisenerz im Jahr 2022, sind ungefähr 7,8 bis 10,4 Gt Abfallprodukten entstanden (U.S. Geological Survey, 2023; Krausmann et al., 2009, S. 2699). Rückstände aus der Metallgewinnung können schädliche Schwermetalle enthalten (UNEP, 2016, S. 20).

Eisen ist das vierthäufigste Element in der Erdkruste und macht etwa 5 % ihres Gesamtbestands aus (Pandey, 2012, S. 5). Dennoch sind nicht alle in der Erdkruste vorhandenen Mineralien mit Eisengehalt wirtschaftlich rentabel für die Rohstahlherstellung. Oftmals ist der Eisenanteil zu gering. In Deutschland abgebauten Eisenerzvorkommen haben im Durchschnitt einen Eisenanteil von nur 16% und dienen daher ausschließlich als Zuschlagstoffe in der Baubranche (Baier et al., 2021, S. 37). Aus diesen Gründen ist Deutschland auf importiertes Eisenerz für die Roheisenproduktion angewiesen (Baier et al., 2021, S. 37). Im Jahr 2020 wurden 22,97 Millionen Tonnen Eisenerz überwiegend aus Brasilien, Kanada und der Republik Südafrika nach Deutschland importiert (Baier et al., 2021, S. 37).

3.3 Kalksteinverbrauch

Kalk wird aus Kalkstein hergestellt, einem Carbonatgestein, das hauptsächlich aus Calciumcarbonat besteht und als Sedimentgestein in der Natur vorkommt (BVK, o. J.). Damit Kalkstein wirtschaftlich abgebaut werden kann, muss er einen Gehalt von mindestens 80% Calciumcarbonat aufweisen (LBEG, o. J.). Für hochwertige Kalkprodukte wird ein Kalkgehalt von 90 bis 95 Masse-% angestrebt (LBEG, o. J.). In Korallenriffen ist reichlich Kalkstein vorhanden, da Steinkorallen ein kalkhaltiges Skelett besitzen (Florida Keys National Marine Sanctuary, 2011). Dies führt dazu, dass Korallen für die Herstellung von Baumaterialien abgebaut werden (Brown, 2011, S. 708). Gleiches gilt für Küstengebiete, die reich an Kalkstein sind, aufgrund von Überresten abgestorbener Korallen und Muscheln und Ablagerung von Meereswasser (Brown, 2011, S. 708; U.S. Geological Survey, 2012, S. 1).

Im Jahr 2022 wurden weltweit 430 Millionen Tonnen Branntkalk produziert (U.S. Geological Survey, 2023b). Für eine Tonne Branntkalk werden 1,8 Tonnen Kalkstein benötigt (Vortex, o. J.). Folglich wurden im Jahr 2022 weltweit mindestens 775 Millionen Tonnen Kalkstein abgebaut (U.S. Geological Survey, 2023b; Vortex, o. J.).

In Deutschland gehören Carbonatgesteine zu den am meisten genutzten Rohstoffen nach Bausand und -kies und gebrochenen Natursteinen mit einer Gesamtmenge von über 55 Millionen Tonnen im Jahr 2020 (Baier et al., 2021, S. 24) (Abbildung 23 im Anhang). Fast 40 Millionen Tonnen davon wurden für die Zementherstellung verwendet (VDZ, 2021, S. 33).

3.4 Holzverbrauch

Im Jahr 2020 wurden zwischen 4,3 und 5 Milliarden m³ Holz mit Rinde verbraucht (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 26). Es ist nicht einfach, einen genaueren Wert für den globalen Holzkonsum festzustellen, wegen mangelnder oder widersprüchlicher Statistiken, und illegal abgeholztes Holz wurde bei dieser Summe nicht berücksichtigt (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 26). Die weltweite Gesamtmenge an produziertem Rundholz ist in den letzten 60 Jahren um fast 60% gestiegen, von 2,5 Milliarden auf knapp 4 Milliarden Kubikmeter Rundholz ohne Rinde.

Von den fast 4 Milliarden Kubikmetern Rundholz (ohne Rinde), die weltweit im Jahr 2020 produziert wurden, wurde fast die Hälfte als Brennstoff verwendet (FAO, 2021a). Der verbleibende Teil wurde als Baumaterial und Industriestoff genutzt (FAO, 2021a). Es gibt weltweit erhebliche Unterschiede im Holzkonsum. Erstens wird in Industrieländern deutlich mehr Holz verbraucht als in Afrika, Lateinamerika, Süd- und Südostasien (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 21). Wenn die gesamte Weltbevölkerung so viel Holz verbrauchen würde wie der durchschnittliche Deutsche, läge der weltweite Verbrauch bei 12,8 Milliarden Kubikmetern (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 26) (Abbildung 5). Zweitens wird Holz in Entwicklungsländern im Gegensatz zu Industrieländern hauptsächlich als Brennstoff benutzt (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 21). In Europa werden 80% des abgebauten Holzes als Baumaterial und Industriestoff verwendet, in Nordamerika sogar 90% (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 13). Dies ist wahrscheinlich auf eine leistungsfähigere Industrie, eine höhere Bauaktivität und andere Energiequellen zurückzuführen.

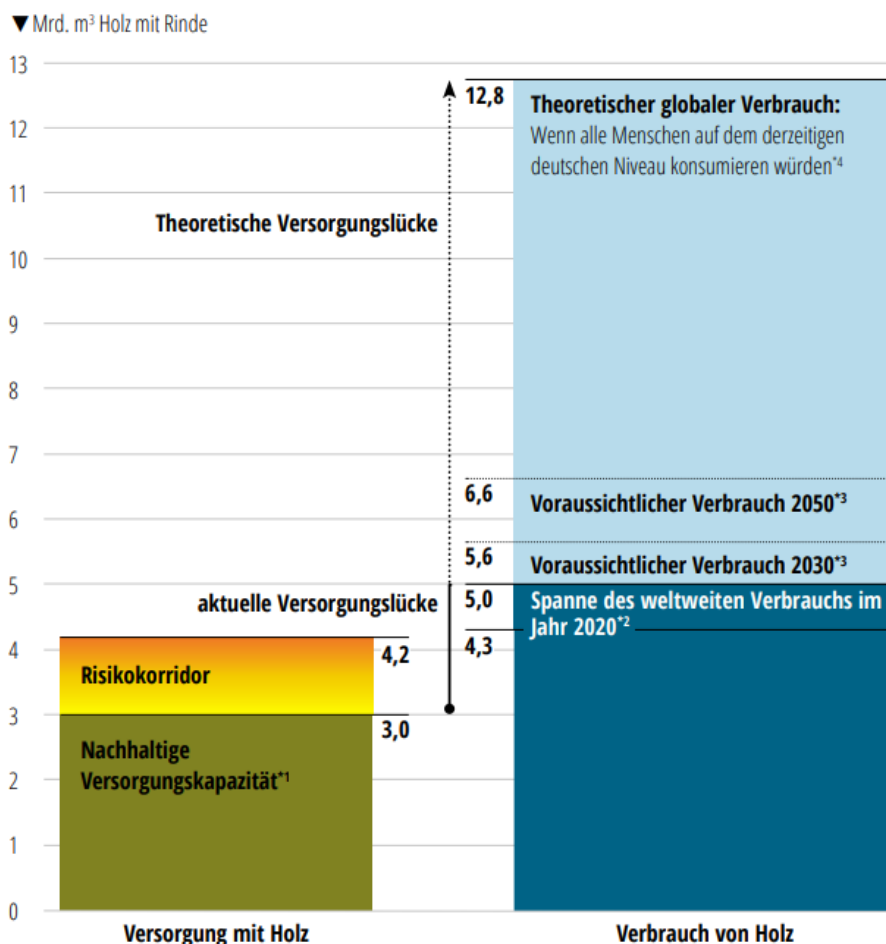


Abbildung 5: Globale Grenze des Holzverbrauchs (Beck-O'Brien, 2022, S. 26)

Die derzeitige Produktion von Holzwerkstoffen für das Bauwesen ist im Vergleich zum Beginn der 1960er Jahre um das 15-fache gestiegen und hat im Jahr 2020 einen globalen Wert von ungefähr 370 Mio. m³ erreicht (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 15). Auch die Herstellung von Schnittholz, das hauptsächlich als Baumaterial verwendet wird, ist angestiegen (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 15), und erreichte im Jahr 2020 eine globale Menge von 473 Mio. m³ (FAO, 2021a). Es mangelt aber an zuverlässigen Daten, die genau definieren, insgesamt wie viel des global produzierten Holzes im Bauwesen verwendet wird.

Die Zahlen des globalen Holzkonsums liegen deutlich über den Grenzen eines nachhaltigen Verbrauchs (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 26). Angesichts der aktuellen Holzressourcen und der Regenerierungsfähigkeit sollte der Holzkonsum für eine nachhaltige Wirtschaft nicht 3,0 Milliarden Kubikmeter Holz übersteigen (Beck-O'Brien et al., 2022, S. 26) (Abbildung 5). Die Überschreitung dieser Grenzen führt langfristig zu einer Erschöpfung der Ressourcen. Obwohl Holz als umweltfreundliches Baumaterial gefördert wird, stellt sich die Frage, ob die Welt ausreichend Holz für einen erhöhten Verbrauch im Bauwesen bereitstellen kann.

Tabelle 1 Gesamtmenge an global und in Deutschland abgebauten Rohstoffen (Bausand und -kies, Eisenerz, Kalkstein und Holz) für die Produktion von Baumaterialien (eigene Darstellung)

Rohstoff	Global	In Deutschland
Bausand und -kies	~40 Gt <i>Schätzung aus der Zementproduktion</i>	262 Mio. t
Eisenerz	min. 1,3 Gt <i>für min. 0,95 t Rohstahl</i>	Importe
Kalkstein	~775 Mio. t <i>für 450 Mio. t Branntkalk</i>	55 Mio. t
Holz	Keine Angabe	Keine Angabe

3.5 Wasserverbrauch

Wasser wird während verschiedener Phasen des Lebenszyklus von Gebäuden und Infrastrukturen für eine Vielzahl von Zwecken genutzt. Im Bergbau (Phase A1) wird Wasser benötigt, in der Phase A3 dient Wasser als Komponente für die Herstellung zahlreicher Baumaterialien und in den Phasen A5 und C1 wird Wasser für die Errichtung und den Abriss von Gebäuden und Infrastrukturen verwendet. Darüber hinaus spielt Wasser eine wichtige Rolle bei der Energieerzeugung, nicht nur als primäre Energiequelle in Wasserkraftwerken, sondern vor allem in verschiedenen Prozessen zur Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen.

Global stehen keine Daten über den gesamten Wasserkonsum im Bauwesen zur Verfügung. Wegen der zahlreich unterschiedlichen Nutzungen von Wasser während der gesamten Lebensdauer eines Bauwerks ist es schwierig, auf eine sinnvolle Schätzung zu kommen.

In Deutschland wurden im Jahr 2019 20 Milliarden Kubikmeter Wasser entnommen, was 11,4% des potenziellen Wasserangebots des Jahres entspricht (Umweltbundesamt, 2022b). Diese Zahl entspricht nicht dem deutschen Wasserfußabdruck, der deutlich größer ist und bei 219 Milliarden Kubikmeter Wasser liegt (Umweltbundesamt, 2022c), weil Wasser auch durch den Import von im Ausland hergestellten Produkten (Sonnenberg et al., 2009, S. 11) indirekt konsumiert wird (Umweltbundesamt, 2022c). Der Anteil von 11,4% liegt unter dem Wassernutzungs-Index von 20%, der aus ökologischen Gründen nicht überschritten werden sollte (Umweltbundesamt, 2022b). Wie die 20 Milliarden Tonnen an Wasser, die im Jahr 2019 in Deutschland entnommen wurden, eingesetzt wurden, ist in der Abbildung 6 erkennbar.

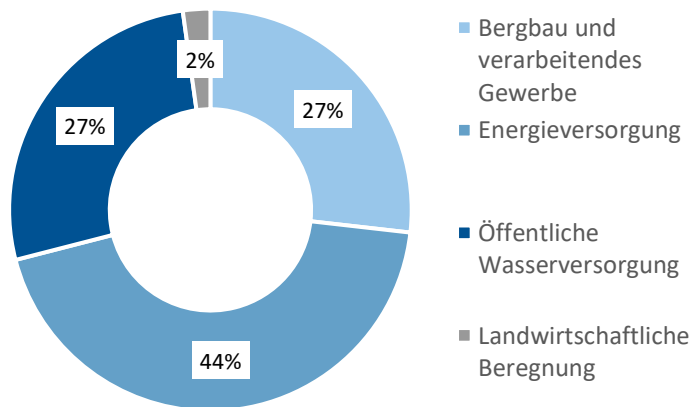


Abbildung 6: Wasserentnahme nach Sektor (eigene Darstellung nach Umweltbundesamt, 2022b)

Beim Abbau von Bodenrohstoffen für die Herstellung von Baumaterialien spielt Wasser eine vielseitige Rolle: Es wird für Bergbauprozesse, wie Bohren und Sprengen, benötigt (Mavis, 2003, S. 48-49), zur Staubkontrolle oder -vermeidung (Mavis, 2003, S. 48), für die Zerkleinerung des abgebauten Materials, für die Trennung von Mineralien und Abfallprodukten, für den Transport von Material über Pipelines (Mavis, 2003, S. 50) oder für die Kühlung von Maschinen (Mavis, 2003, S. 50).

Wasser ist eine wichtige Komponente für die industrielle Herstellung von Baumaterialien. Die Qualität und Eigenschaften des Wassers sind für die Herstellung von Beton, Mörtel, Putz, Stahl, usw. relevant. In der Regel wird Frischwasser verwendet, da Unreinheiten die Festigkeit und Dauerhaftigkeit negativ beeinflussen können (Nikookar et al., 2023, S. 24). Die Verwendung von Salzwasser im Bauwesen wird vermieden, da die darin enthaltenen Chloride korrosive Prozesse, insbesondere bei Stahlbeton, auslösen können (Wegian, 2010, S. 235).

Die Herstellung unterschiedlicher Baumaterialien erfordert unterschiedliche Wassermengen. In Tabelle 2 wurden die Wassermengen kalkuliert, die jährlich durch die globale Produktion von Zement, Stahl und Schnittholz verbraucht werden. Die Daten umfassen die benötigten Wassermengen für die Extraktion, den Transport, die Verarbeitung der Rohstoffe und die Erzeugung von Energie, die dabei konsumiert wird (Teilphasen A1-A3 der Abbildung 22 im Anhang) (ÖKOBAUDAT, o. J.).

Tabelle 2 Jährlicher Wasserkonsum durch die Produktion von Zement, Stahl und Schnittholz (eigene Berechnungen nach ÖKOBAUDAT, o. J.; Statista, 2023c; FAO, 2021a)

<i>Baumaterial</i>	Menge an verbrauchtem Wasser pro Einheit Baumaterial	Global produziert pro Jahr	Der Wasserverbrauch durch die jährliche Produktion des Baumaterials
<i>Zement</i>	1.400 l pro t Zement	4,1 Gt	5,7 Teraliter
<i>Stahl</i>	~3.500 l pro t Stahl	min. 0,95 Gt	3,3 Teraliter
<i>Schnittholz</i>	~300 l pro m ³ Schnittholz	473 Mio. m ³	0,14 Teraliter

3.6 Flächenverbrauch

Global sind 0,2% der Erdoberfläche von Städten und Infrastrukturen besetzt (Statista, 2022). Auf jedem Kontinent wächst die bebaute Fläche schneller als die Erdbevölkerung. Global ist die bebaute Fläche in den 40 Jahren zwischen 1975 und 2015 um das 2,5-fache gestiegen (Banuri et al., 2019, S. 35). Im Vergleich dazu ist die Bevölkerung im selben Zeitraum nur um das 1,8-fache gestiegen (Abbildung 7).

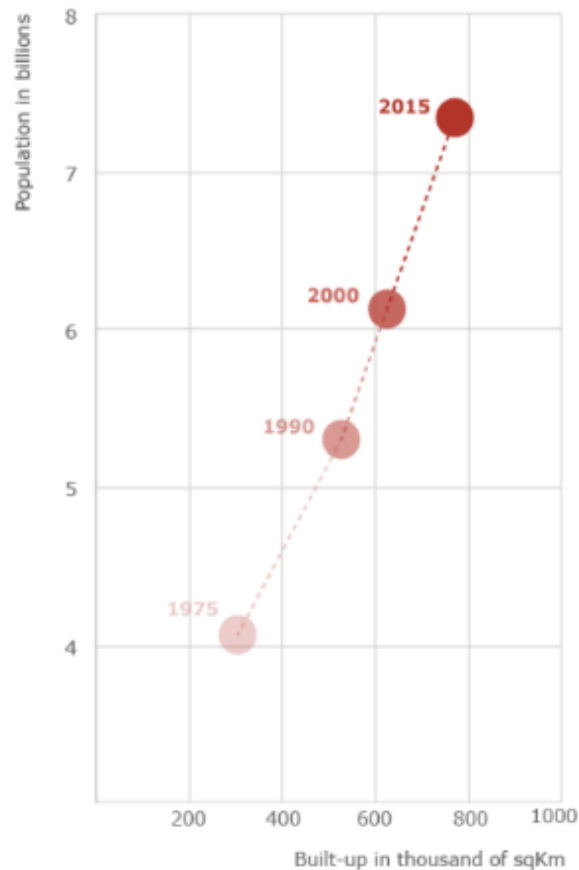


Abbildung 7: Entwicklung der bebauten Flächen und der Bevölkerung weltweit (Pesaresi et al., 2016, S.35)

Die Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland ist in einem kürzeren Zeitraum, zwischen 1992 und 2021, um das 1,29-Fache gestiegen, von 40.305 km² auf 51.813 km² (Umweltbundesamt, 2023a). Währenddessen ist die Bevölkerung um weniger als das 1,03-Fache gestiegen von 80,97 Millionen Einwohnern auf 83,24 Millionen Einwohner (Statista, 2023d). Der Zuwachs der Siedlungs- und Verkehrsfläche fand größtenteils auf Kosten der landwirtschaftlichen Fläche statt (Umweltbundesamt, 2023a).

Der Flächenverbrauch der Baubranche beschränkt sich jedoch nicht nur auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche. Die Extraktion von Bodenressourcen für den Bau verbraucht ebenfalls Fläche. In Deutschland wurden im Jahr 2020 täglich 7,7 Hektar Land für den Rohstoffabbau neu in Anspruch genommen, davon 4,4 nur für Industrie- und Baumineralien (Umweltbundesamt, 2023b). Über das ganze Jahr resultiert, dass eine Gesamtfläche von 1606 Hektar allein für den Abbau von Baumineralien neubeansprucht wurde. In Deutschland nehmen Tagebau und Bergbau insgesamt 140.700 Hektar im Anspruch (Stand 2021) (Statistisches Bundesamt, 2023, 20. September).

Böden gelten als wichtige Kohlenstoffspeicher (siehe Kapitel 5.2.2.1). Bei Betrachtung des Konzepts des Flächen-Fußabdrucks für den Bausektor sollte auch die Waldfläche einbezogen werden, die das Holz für die Produktion von Holzbauteilen bereitstellt, sowie die Fläche, die zur Absorption des emittierten CO₂ dient. In einer Studie (Bastianoni et al., 2006) wurde der Flächen-Fußabdruck von zwei Wohngebäuden in Italien analysiert. Die Studie hat alle konsumierten Ressourcen bei der Herstellung und Renovierung des Gebäudes in einem globalen Flächenkonsum in gm² (globale m²) umgewandelt (Bastianoni et al., 2006, S. 349). Für jeden Megajoule (MJ) wurden dabei 0,020 kg CO₂-Emissionen gezählt (Bastianoni et al., 2006, S. 349). Prozessbedingte Emissionen wurden nicht berücksichtigt. Der CO₂-Absorptionsfaktor des Bodens wurde mit 0,095 kg/m² angenommen, und die Produktionsrate von Bauholz aus einer Fläche von 1 m² Wald betrug 0,125 kg (Bastianoni et al., 2006, S. 349). Bei der Berechnung der bebauten Fläche wurden nicht nur die Grundflächen der Gebäude berücksichtigt, sondern auch die Verkehrs- und Industrieflächen, die für die Herstellung und Renovierung der Gebäude wesentlich waren (Bastianoni et al., 2006, S. 348). Dies führte dazu, dass ein zweistöckiges Einfamilienhaus mit einer Grundfläche von 160 m² einen Flächen-Fußabdruck von 6.290 m² aufwies. Dabei wurden 5.633 m² als Energie-Fläche, 310 m² als Waldfläche für die Holzbauteile und 347 m² als bebaute Fläche betrachtet (Bastianoni et al., 2006). Als zweites Beispiel wurde ein vierstöckiges Wohnhaus mit mehreren Wohneinheiten analysiert, ebenfalls mit einer Grundfläche von 160 m². Hieraus ergab sich ein Flächen-Fußabdruck von 9.465 m².

In der Studie (Bastianoni et al., 2006) wurde die Fläche, die für die Deponierung von Bauabfällen nach dem Abriss der Gebäude benötigt wird, nicht berücksichtigt. Dies stellt einen weiteren Flächenverbrauch dar, der durch das Bauwesen entsteht. In Deutschland existieren 999 AbfalldPONen (Stand 2021) (Statistisches Bundesamt, 2023). Über die Gesamtfläche dieser Deponen gibt es jedoch keine Daten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Flächenkonsum im Hochbau weit über die Grundfläche der Bauwerke hinausgeht. Der Bergbau beansprucht Fläche, die Baumaterialienindustrie benötigt Fläche, der Transport von Rohstoffen und die Vernetzung von Gebäuden erfordern Fläche, selbst die Deponierung von Bauabfällen beansprucht Fläche, und so weiter. Dabei entstehen Emissionen, und indirekt wird mehr Fläche konsumiert, um die ausgestoßenen klimaschädlichen Gase aus der Atmosphäre zu kompensieren (weitere Informationen zu der Rolle der Böden als globale Kohlenstoffspeicher finden sich im Kapitel 4.2.2).

3.7 Energieträgerverbrauch

Während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes oder einer Infrastruktur wird Energie verbraucht. Energie wird für die Extraktion von Rohstoffen, die industrielle Herstellung von Baumaterialien, den Transport von Rohstoffen und Baumaterialien und die Errichtung und Demolition von Gebäuden und Infrastrukturen benötigt.

Die Internationale Energieagentur berichtet, dass im Jahr 2022 etwa 30% der globalen Endenergie für den Betrieb von Gebäuden verwendet wurden (IEA, o. J.a). Im Vergleich dazu beanspruchte die graue Energie der Gebäude etwa 4% der globalen Endenergie, während die graue Energie der Infrastrukturen etwa 3,3% ausmachte (IEA, o. J.a). Angesichts des zunehmenden Interesses an energieeffizientem Bauen könnte sich diese Divergenz zwischen Betriebs- und grauer Energie verändern. Dies liegt nicht nur daran, dass der Betrieb energieeffizienter Gebäude weniger Energie verbraucht, sondern auch daran, dass die Herstellung dieser Gebäude mehr Energie erfordert. Zwei Gründe dafür könnten sein, dass energieeffizientere Gebäude den Einsatz massiverer Bauteile und komplexere Herstellungsprozesse erfordern, die energieintensiver sind.

Eine Studie aus dem Jahr 2011 (Bußwald, 2011) vergleicht die Nutzungsenergie und graue Energie von modellierten repräsentativen Gebäudeformen für die Bauperioden 1970 und 2010 in Österreich. Die modellierten Gebäude umfassen ein Einfamilienhaus in Siedlungslage, ein Einfamilienhaus in Streulage, einen Wohnbau mit 3 Geschossen, einen Wohnbau mit 7 Geschossen und ein Einfamilienhaus in Passivhaus-Bauweise für das Jahr 2010. Dabei wurde eine Nutzungsdauer von 100 Jahren angenommen. In den Ergebnissen ist deutlich erkennbar, dass generell die Nutzungsenergie der unterschiedlichen Arten von Wohnhäusern zwischen 1970 und 2010 gesunken ist. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der grauen Energie ein gegenläufiger Trend: Hier stieg der Energieverbrauch für die Herstellung der Wohngebäude (Abbildung 8).

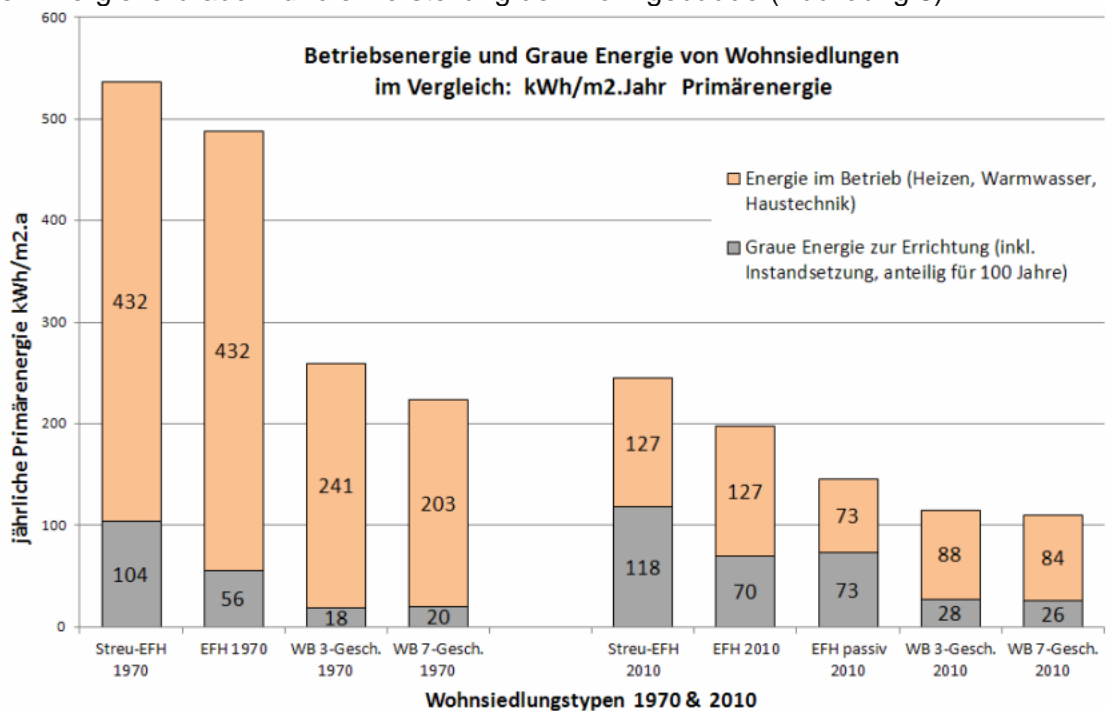


Abbildung 8: Vergleich von Betriebs- und grauer Energie von modellierten repräsentativen Gebäudeformen für die Bauperioden 1970 und 2010 (Bußwald, 2011, S. 13)

4 Einfluss auf die Umwelt und das Klima

4.1 Einfluss auf die Umwelt

Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen wirkt sich vielseitig auf die Umwelt aus. Ökosysteme sind hochvernetzte Systeme. Eine Auswirkung des Verbrauchs einer Ressource kann gleichzeitig mehrere Folgen innerhalb des Ökosystems auslösen. Aus diesem Grund ist es schwierig, genau zu identifizieren und zu quantifizieren, inwiefern der Ressourcenverbrauch im Bauwesen zur Umweltzerstörung beiträgt. Dazu wirken sich auch andere Wirtschaftssektoren wie z.B. die Landwirtschaft auf die Ökosysteme aus, und es mangelt an sektorspezifischen Daten, die ausschließlich den Einfluss des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Umwelt beschreiben, ohne weitere Einflüsse. Folglich konzentriert sich Kapitel 4.1 auf die qualitative Erläuterung der Zusammenhänge zwischen dem Konsum der unterschiedlichen ausgewählten Ressourcen im Bauwesen und den damit verbundenen Umweltauswirkungen. Die Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen quantitativ zu beschreiben, ist nur bedingt möglich.

4.1.1 Küsten- und Meeresbodenmorphologie

Küstengebiete sind vom Sand- und Kiesabbau betroffen. Strandsand und -kies haben den Vorteil, dass sie einfach abzubauen sind, da sie leicht zugänglich sind und für den Abbau keine komplexe Ausrüstung benötigt wird. Der Abbau von Sand und Kies an Stränden ist ein weltweit verbreitetes Phänomen, das in zahlreichen Fällen illegal stattfindet (Europäische Kommission, 2023). Dies führt zu erkennbarer Küstenerosion innerhalb kurzer Zeiträume oder sogar zum vollständigen Verschwinden der Strände. Dieses Phänomen wird sowohl von den Medien als auch von Institutionen wie der Europäischen Union kritisch thematisiert (Hellge, 2021; Knoke, 2016; European Commission, 2023).

In Küstengebieten wird Sand auch offshore abgebaut. Die Offshore-Extraktion von Sand hinterlässt Gruben im Meeresboden (Garel & Bonne, 2009, S. 4165). Bei wiederholtem Abbaggern an derselben Stelle können größere Vertiefungen entstehen. Die Regenerierzeit, bis der Meeresboden seine ursprüngliche Form wiedererlangt, ist von verschiedenen Faktoren abhängig, darunter die Geometrie der Grube, die Wassertiefe, die Stärke der Wasserströmungen und die Hydromechanik des Gebiets (Garel & Bonne, 2009, S. 4166). Die Regenerierzeit kann von wenigen Monaten bis zu mehreren Jahrzehnten dauern (Garel & Bonne, 2009, S. 4166). Gruben im Meeresboden führen zu Veränderungen in der Wellenhöhe und der Hydromechanik (Garel & Bonne, 2009, S. 4168). Sandbänke dienen im Meer als natürliche Schutzbarriere gegen Wellen, indem sie die Wellenhöhe und -stärke verringern (Garel & Bonne, 2009, S. 4168). Der Abbau von Sandbänken kann also zu verstärkter Erosion entlang der Küste führen, weil die Wellen weniger abgeschwächt werden (Garel & Bonne, 2009, S. 4168). Strandabsenkung ist eine weitere Auswirkung von Offshore-Sandabbau, die stattfinden kann, wenn sich das Abbaugelände nicht weit genug von der Küste befindet. Dabei

können Sedimente vom Strand in den ausgegrabenen Bereich rutschen, um die Gruben zu kompensieren (Garel & Bonne, 2009, S. 4168).

Küstengebiete enthalten auch für das Bauwesen nützliche Kalksteinreserven. Meereswasser enthält eine hohe Konzentration an Calciumionen (Ca^{2+}) und Bikarbonat (HCO_3^-) (U.S. Geological Survey, 2012, S. 1). Viele marine Organismen nutzen Calcium- und Bikarbonationen, um widerstandsfähige Schutzhüllen aufzubauen (U.S. Geological Survey, 2012, S. 1). Dazu besteht das Skelett von Korallenriffen aus Kalkstein (Keys National Florida Marine Sanctuar, 2011). Durch Ablagerungen von Meereswasser und Ansammlungen von aquatischen Organismen wie Korallen und Muscheln kommt es zur Formung von Kalkgestein in Küstengebieten (U.S. Geological Survey, 2012, S. 1).

Ähnlich wie Sandbänke fungieren auch Korallenriffe als natürliche Schutzbarrieren für die Küste gegen Stürme, große Wellen, Überflutungen, Hurrikane und Tsunamis (Department of Conservation New Zealand, o. J.). Korallenriffe können durchschnittlich 97% der Energie von Wellen dissipieren (Ferrario et al., 2014, S. 2). Korallenriffe spielen also eine bedeutende Rolle bei der Abschwächung von Wellen, bevor sie die Küste erreichen.

Der Abbau von Sand, Kies und Korallen hat zur Folge, dass weltweit mit hohen Raten von Küstenerosion zu rechnen ist. Der Ressourcenabbau für die Baubranche ist jedoch nicht der einzige Faktor, der zur globalen Küstenerosion beiträgt. Der Klimawandel, der Anstieg des Meeresspiegels, extreme Wetterereignisse und Änderungen in Strömungen und Winden spielen ebenfalls eine bedeutende Rolle (Łabuz, 2015, S. 381). Quantitativ zu definieren, wie hoch der Beitrag des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen zur Küstenerosion ist, lässt sich schwer feststellen.

Um die Auswirkungen des Korallenabbaus auf die Küste zu verstehen, können Ereignisse wie der Tsunami im Dezember 2004 im Indischen Ozean betrachtet werden, der die Küsten von Sri Lanka, Indien und Thailand traf. Wissenschaftler haben Zusammenhänge zwischen dem Korallenabbau und verstärkten Auswirkungen des Tsunamis entlang der Küsten festgestellt (Richmond et al., 2006, S. 249; Fernando et al., 2005, S. 301). An Stellen, an denen intensiver Korallenabbau stattgefunden hatte, wurde eine geringere Widerstandsfähigkeit gegen eindringende Wasserströmungen ins Landesinnere beobachtet (Fernando et al., 2005, S. 301). Dies führte zu stärkeren Überflutungen und Schäden, einschließlich der Zerstörung von Vegetation und Kontaminationen.

Die Ozeanküste in Tansania ist ein weiteres Beispiel dafür, wie sich der Ressourcenabbau für das Bauwesen auf die Küste auswirkt. Die Portland-Zementindustrie nutzt die Küste aufgrund reichlich vorhandener Kalksteinvorkommen aus (Nordic Development Fund, 2014, S. 32). Neben dem Kalksteinabbau finden auch der Abbau von Korallen, anderen Sedimentgesteinen und Sand statt (Nordic Development Fund, 2014, S. 121). Die Abbauprozesse verlaufen ungenehmigt und unkontrolliert, weil die lokalen Behörden die illegalen Aktivitäten nicht wirksam kontrollieren können (Nordic Development Fund, 2014, S. 33). Nur am Kunduchi Strand wurde die Küstenerosion gemessen und später Schutzmaßnahmen ergriffen (Nordic Development Fund, 2014, S. 194). Die Abbildung 9 zeigt die Veränderung der

Küstenlinie im Zeitraum von 1953 bis 2007 (Nordic Development Fund, 2014, S. 195). Die Küstenerosion erreichte Werte von bis zu 157,5 m (Almstöm & Larsson, 2008, S. 61). Eine Studie berichtet, dass die Küstenerosion über die Strecke durchschnittlich 25 m beträgt (Almstöm & Larsson, 2008, S. 48). In der Abbildung 10 ist zu sehen, wie die Einwohner der Region Müllsäcke als Schutzbarriere platziert haben, um die Dörfer und Wohnhäuser vor der steigenden Küstenerosion zu schützen.

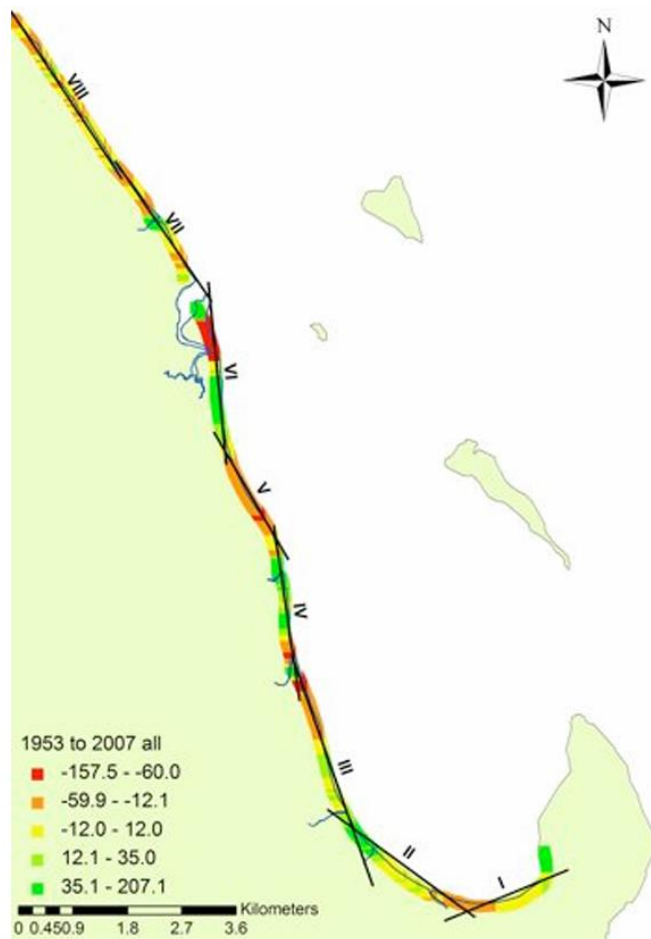


Abbildung 9: Küstenerosion entlang des Kunduchi Strandes im Zeitraum von 1953 bis 2007 (Almstöm & Larsson, 2008, S. 61).



Abbildung 10: Platzierung von Müllsäcken als Erosionsschutz am Kunduchi Strand (Almstöm & Larsson, 2008, S. 10).

4.1.2 Flussmorphologie

Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen beeinflusst die Flusssysteme vor allem durch den Abbau von Flusssand und -kies aus Flussbetten, Überschwemmungsgebieten und Flussterrassen (Asube & Bulado, 2022, S. 6). Der Sand- und Kiesabbau verändert die geometrischen Eigenschaften der Flüsse (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 3-4; Asube & Bulado, 2022, S. 6).

Die Extraktion von Sedimenten aus dem Flussbett vertieft die Flussquerschnitte und destabilisiert die Flussbänke. Dies kann zu einem Einsturz der Flussbänke und zu mehr seitlicher Erosion führen, was nicht nur zu tieferen, sondern auch zu breiteren Flussquerschnitten führt (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4). Dadurch kann die Überschwemmungsfläche entlang der Flussbänke verloren gehen (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4).

Geometrische Veränderungen wurden an verschiedenen Flüssen weltweit beobachtet, die über mehrere Jahre hinweg intensivem Sand- und Kiesabbau ausgesetzt waren. Eine Studie zum Fluss Velika Morava in Serbien, der von illegalem und unkontrolliertem Sand- und Kiesabbau betroffen war, berichtet, dass das Flussbett zwischen 1980 und 2000 ungefähr 5 m tiefer wurde (Kresojevic et al., 2023, S. 8). Eine weitere Studie verglich drei Querschnitte des Yangtze-Flusses in China zwischen 1998 und 2013. Bei allen dreien ist eine tiefere und breitere Querschnittsform erkennbar (Abbildung 11) (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4).

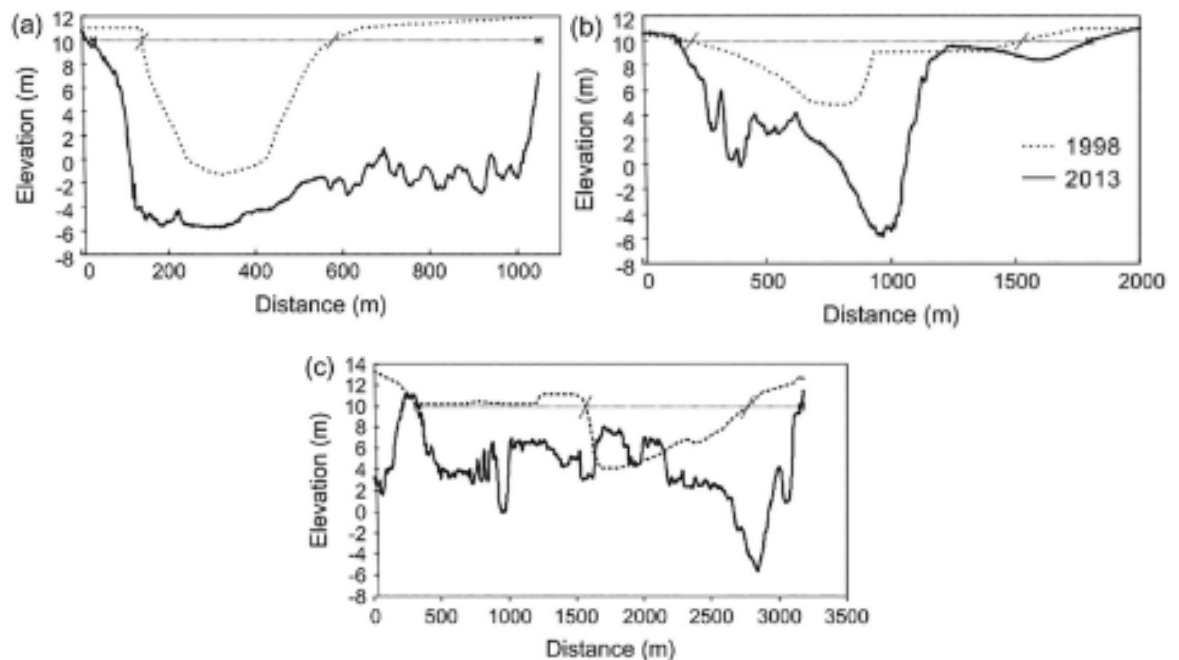


Abbildung 11: Vergleich der Querschnitte des Yangtze-Flusses in China zwischen 1998 und 2013 (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4)

Mit der Veränderung der geometrischen Eigenschaften des Flusses ändert sich auch automatisch der Wasserspiegel (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4). Wenn der Fluss tiefer und breiter wird, sinkt der Wasserspiegel. Ein tieferer Wasserspiegel könnte zu einer Verzweigung der Flüsse führen (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4). Eine Änderung des Wasserspiegels wirkt sich nicht nur auf die Flüsse, wo der Sand- und Kiesabbau stattfindet, aus, sondern auch auf die vernetzten Gewässer.

Entlang des Yangtze Flusses wurden seit 2002 840 Millionen Tonnen Sand abgebaut. Darunter wurden nur 80,4 Millionen Tonnen legal genehmigt (Xiao et al., 2023, S. 3). Das resultierte in einer Wasserspiegelsenkung im größten chinesischen Frischwasser-See, der Poyang See, der von dem Yangtze Fluss mit Frischwasser versorgt wird (Lai et al., 2014, S. 1702). Der Abflusskanal des Sees zum Fluss wurde durch den Sand- und Kiesabbau tiefer und breiter, und die Abflusskapazität bei Niedrigwasser hat sich seit Beginn der Abbauaktivitäten um das 1,5-2-fache erhöht (Lai et al., 2014, S. 1704). Dies führt dazu, dass sich der See sehr schnell entleeren kann und Rekord-Niedrigwasserstände erreicht (Lai et al., 2014, S. 1704).

4.1.3 Hydrologie

Einige Sedimentgesteine, die als Rohstoffe für das Bauwesen abgebaut werden, wie z.B. Kalkgesteine, fungieren als natürliche Grundwasserleiter (U.S. Geological Survey, 2012, S. 3). Deckschichten und Grundwasserleiter regulieren die Grundwasserneubildungsrate, also den Niederschlag, der durch die Böden ins Grundwasser fließt (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, o. J.). Sie schützen das Grundwasser vor Verdunstung, ermöglichen einen kapillaren Wasseranstieg und schützen vor allem das Grundwasser vor Kontaminationen, indem sie potenzielle Schadstoffe teilweise herausfiltern oder deren Eindringen verzögern (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, o. J.).

Beim Rohstoffabbau gelangt das mit Schadstoff belastetes Grubenwasser in die Umwelt, oft durch Kraftstoff- und Öllecks von Maschinen (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 5). Zudem entstehen Schwermetallkontaminationen wie Beryllium, Cadmium, Chrom, Kupfer, Eisen, Mangan und Nickel, die beim Abbau von Gesteinen freigesetzt werden (U.S. Geological Survey, 2018). Schwermetallkontaminationen können auch durch die Ansammlung von Rückständen aus der Metallgewinnung entstehen (UNEP, 2016, S. 20).

Bei unzureichenden Schutzmaßnahmen können Katastrophen ereignen, wie der Dambruch im Jahr 2019 an der Mine Córrego do Feijão von Vale in der Nähe von Brumadinho, Brasilien. Dabei versagte das Rückhaltebecken für Eisenerzrückstände, was zu einer Freisetzung von 9,7 Millionen Kubikmetern an toxischen Materialien in die Umwelt führte (Morrill et al., 2020, S. 8). Die Bergbauabfälle zerstörten 125 Hektar Wald über eine Strecke von acht Kilometern, bevor sie im Paraopeba-Fluss landeten (Morrill et al., 2020, S. 8; Thompson et al., 2020, S. 5; WWF, 2019b). Die Wasserqualität wurde langfristig beeinträchtigt, und Teile des Ökosystems wurden zerstört. Solche Katastrophen sind keine Einzelfälle; Staudambrüche von Rückhaltebecken des Bergbaus ereigneten sich in den letzten Jahren mehrmals mit unterschiedlich schwerwiegenden Konsequenzen. Zwischen 2010 und 2019 wurden insgesamt 30 Dambrüche registriert (Piciullo et al., 2022, S. 3). Es wird geschätzt, dass jährlich über 180 Millionen Tonnen Bergbauabfälle in Gewässer gelangen (OHCHR, 2023).

Beim Abbau von Sand und Kies, sowohl in Oberflächengewässern als auch offshore, kommt es zu Trübungen im Wasser (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4; Garel & Bonnet, 2009, S. 4166). Baggerschiffe filtern das unerwünschte Material im Wasser heraus, um den Transport von unnötigem Material zu minimieren (Garel & Bonnet, 2009, S. 4166). Das direkt aus den Behältern herausgefilterte Material ist 3- bis 4-mal größer als das, was behalten wird, und resultiert in feinen Sedimenten, die im Wasser schweben (Garel & Bonnet, 2009, S. 4166). Trübungen in Gewässern verschlechtern die Wasserqualität (U.S. Geological Survey, 2019, 22. Oktober).

Die Versiegelung von Flächen beeinträchtigt die Funktion der Böden als Grundwasserleiter. Durch die Versiegelung werden Böden undurchlässig, wodurch die Absorption und Versickerung von Wasser behindert werden (Grathwohl, 2002, S. 14). Stattdessen sammelt sich Niederschlagwasser an und fließt unkontrolliert und verschmutzt erst nach Tagen oder Wochen in nahegelegene Oberflächengewässer (Grathwohl, 2002, S. 14; Umweltbundesamt, 2022d). Die Versiegelung von Flächen erhöht somit das Risiko von Überschwemmungen (EEA, o. J.; Umweltbundesamt, 2022d). Zwischen 1980 und 2010 stieg die Anzahl an jährlich schwerwiegende Überschwemmungen in Europa von 12 auf 71 an, und in den Statistiken lässt sich ein überwiegend positiver Trend erkennen (European Environment Agency, 2016) (Abbildung 12). Die Versiegelung von Flächen in Europa hat zu dem Anstieg der Überschwemmungen beigetragen.

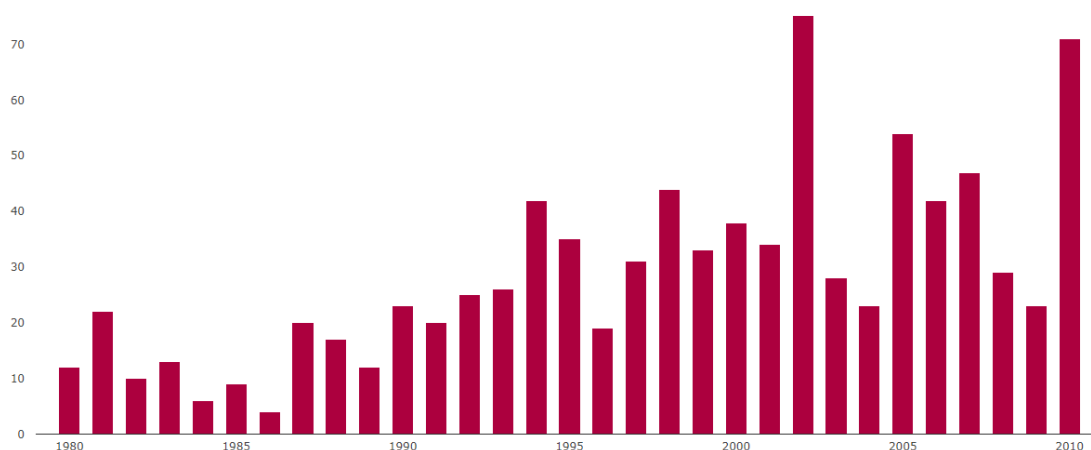


Abbildung 12: Statistik über die Anzahl schwerer Überschwemmungen in Europa (European Environment Agency, 2016).

Der Abbau von Deckschichten und Grundwasserleitern, die Kontamination durch freigelegte Schwermetalle und Rückstände aus der Metallextraktion und die Versiegelung von Flächen tragen negativ zur Wasserqualität und zum Zustand der Wasserkörper bei. Laut dem Umweltbundesamt (2022e) wurde im Jahr 2021 der ökologische Zustand von 19,1% der Wasserkörper in Deutschland als schlecht eingestuft. Weitere 36,3% wurden als unbefriedigend, 36,3% als mäßig und nur 8,0% als gut bewertet. Obwohl sich die Werte seit der Berichterstattung des Jahres 2015 leicht verbessert haben, sind sie immer noch weit entfernt von dem Ziel, alle deutschen Gewässer bis zum Jahr 2027 in einen guten bis sehr guten Zustand zu versetzen.

Im Kapitel 4.1.2 wurde der Zusammenhang zwischen Sand- und Kiesabbau und niedrigerem Wasserspiegel in Oberflächengewässern erläutert. Oberflächengewässer und Grundwasser sind hydraulisch miteinander verbunden (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4). Die Senkung des Wasserspiegels in Flüssen und Seen führt auch zur Absenkung des Grundwasserspiegels in der Region (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4). Eine geringere Grundwasserneubildungsrate, wegen des Abbaus von Grundwasserleitern und der Versiegelung von Flächen, trägt auch zur Senkung des Wasserspiegels bei (Grathwohl, 2002, S. 14; Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, o. J.). Die Senkung des Grundwasserspiegels führt zur Austrocknung der oberen Erdschichten und Feuchtgebiete und zur potenziellen Versalzung der Böden (Palmer, 2022, S. 3).

In Deutschland ist eine alarmierende Absenkung des Wasserspiegels zu beobachten. In den letzten 20 Jahren ist die Gesamtwasserspeicherung in Deutschland durchschnittlich um -0,76 Gt/Jahr gesunken, was einem Äquivalent von -2,1 mm entspricht (Güntner et al., 2023, S. 85). Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen könnte eine maßgebliche Ursache dafür sein.



Abbildung 13: Zusammenfassende Grafik über die Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Hydrologie (eigene Darstellung)

Tabelle 3 Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Hydrologie mit Bewertungsindikatoren und Fallbeispielen (eigene Darstellung)

Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Hydrologie	Globale Bewertungsindikatoren	Bewertungsindikatoren für Europa
<i>Schwächerer Schutz gegen Hochwasser, Tsunamis oder starke Wellen</i>	/	Zunahme in der Anzahl schwerer Überschwemmungen pro Jahr: Im Jahr 1980: 12 Im Jahr 2010: 71 (EEA, 2016)
<i>Verschmutzung durch Grubenwasserabfluss</i>	3,2 Megatonnen Stickstoff und 8,6 Megatonnen Phosphor verbreiten sich jährlich durch die Flüsse in den Meeren (United Nations Environment Programme, 2013, S. 28)	/
<i>Negative Auswirkungen auf die Wasserqualität der Gewässer</i>	/	In der EU: 83,5% der marinen Ökosystemen sind Risikogebiete für Eutrophierung (EEA, 2022)

Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Hydrologie	Bewertungsindikatoren für Deutschland	Fallbeispiele
<i>Schwächerer Schutz gegen Hochwasser, Tsunamis oder starke Wellen und Erosion</i>	/	Tsunami 2004 im indischen Ozean (Fernando et al., 2005, S. 301) Kunduchi Strand (Tansania) (Almstöm & Larsson, 2008)
<i>Senkung des Wasserspiegels in Gewässer</i>	-0,76 km ³ /Jahr Rückgang der Gesamtwasserspeicherung (Güntner et al., 2023, S. 83) 92% der Moorböden sind entwässert (BMUV, 2022, S. 6)	Der Poyang Sees (Chinas größter See) (Lai et al., 2014, S. 1704)
<i>Verschmutzung durch Grubenwasserabfluss</i>	/	Dammbruch im Jahr 2019 an der Mine Córrego do Feijão von Vale (Morrill et al., 2020, S. 8)
<i>Negative Auswirkungen auf die Wasserqualität der Gewässer</i>	19,1% der Fließgewässer-Wasserkörper sind in einem „schlechten“ ökologischen Zustand 34,9% der Fließgewässer-Wasserkörper sind in einem „unbefriedigenden“ ökologischen Zustand (Umweltbundesamt, 2022e)	/

**Die Auswirkungen in Grau beziehen sich nicht ausschließlich auf den Einfluss des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen, sondern beschreiben den generellen Zustand der Gewässer, der auch von anderen Faktoren beeinflusst wird*

4.1.4 Boden

Die genaue Zusammensetzung der Böden hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter Klima, Ausgangsgestein und Bodentyp (Blume et al., 2010, S. 1). Allgemein bestehen Böden aus Wasser, Luft, mineralisch anorganischer Substanz und organischer Substanz (Blume et al., 2010, S. 1). Die organische Substanz teilt sich auf in lebende Organismen wie Bakterien, Tiere, Pilze und Wurzeln, verstorbene Organismen, die abgebaut werden, und Humus als zerlegte organische Substanz (Blume et al., 2010, S. 51, 52).

Humus erfüllt verschiedene Funktionen im Boden. Er versorgt die Böden mit Nährstoffen, die für das Pflanzenwachstum wichtig sind (Blume et al., 2010, S. 68;

Bundesregierung, o. J.). Zudem trägt er zur stabilen Bodenstruktur bei, indem er Poren schafft, in denen sich Pflanzenwurzeln ausbreiten können (Blume et al., 2010, S. 69; Bundesregierung, o. J.). Darüber hinaus erhöht Humus die Wasserspeicherkapazität und reguliert die Wasserdurchlässigkeit der Böden. Er bindet Nährstoffe und fördert biologische Aktivitäten, was die Bodenfruchtbarkeit steigert (Blume et al., 2010, S. 51). Zudem spielt Humus eine entscheidende Rolle bei der Speicherung von Kohlenstoff und der Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (Blume et al., 2010, S. 70; Bundesregierung, o. J.). Humus ist somit für alle Funktionen, die Böden erfüllen, von großer Bedeutung.

Der Humusgehalt normal durchlässiger Ackerböden liegt zwischen 2 und 5% (Bundesverband Deutscher Gartenfreunde e.V., o. J.). Bei normal durchlässigen Grünflächen ist der Humusgehalt etwas höher und beträgt zwischen 5 und 10% (Bundesverband Deutscher Gartenfreunde e.V., o. J.). Böden, die einen Humusgehalt von mehr als 15 Masse-% aufweisen, werden als "Moorböden" bezeichnet (LABO-Vorsitz, 2017, S. 21) und spielen eine entscheidende Rolle als Ökosysteme, auch im Klimasystem.

Unter dem Begriff „Bodendegradation“ ist ein fortlaufender Prozess zu verstehen, bei dem die physischen, chemischen, biologischen und ökologischen Fähigkeiten des Bodens beeinträchtigt werden, und seine ursprüngliche Fähigkeit, Güter und Dienstleistungen bereitzustellen, verringert wird (FAO, o. J.a). Die Food and Agriculture Organization of the United Nations berichtete im Jahr 2015, dass 24% der globalen Fläche zu unterschiedlichen Maßen von Bodendegradation betroffen ist, was 35 Millionen km² entspricht (FAO & ITPS, 2015). In einem weiteren Bericht von 2021 wird eine Gesamtmenge an degradiertem Fläche weltweit auf 56,7 Millionen km² geschätzt (FAO, 2021b). Im Folgenden werden die verschiedenen Aspekte diskutiert, wie der Ressourcenverbrauch im Bauwesen zur globalen Bodendegradation beiträgt.

Durch den Ressourcenverbrauch im Bauwesen kommt es zur Zerstörung von Vegetation, sei es für die Herstellung von Bauholz, die Schaffung freier Flächen für Gruben, neue Gebäude und Infrastrukturen oder für Bagger- oder Transportmaschinen (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 5). Wurzeln helfen dabei, den Boden zu befestigen, während Gräser, Bäume und Sträucher die Oberfläche vor Erosion schützen. Die Entfernung der Vegetation macht die Böden anfälliger für Erosion durch Wind, Wasser und andere Wetterereignisse (Manonen, 2022, S. 18). Dazu kommt es zu einer Verringerung der biologischen Aktivitäten und organischen Substanz in den Böden, was wiederum zu einer direkten Verringerung des Humusgehalts führt (Blume et al., 2010, S. 51), was sich in verschiedener Hinsicht negativ auf die Böden auswirkt.

Ein weiterer bedeutender Beitrag zur Bodendegradation erfolgt durch den Bergbau, bei dem der Boden abgebagert und zerstört wird (Manonen, 2022, S. 17). Die Tiefe des Baggerns hängt von der Lage der gewünschten Rohstoffe ab. Je tiefer gebaggert werden muss, desto schwerwiegender sind die Konsequenzen für die Böden, und desto schwieriger wird es, ihre ökologischen Funktionen wiederherzustellen.

Ein weiterer Aspekt, der bereits im Kapitel 4.1.3 genannt wurde, ist die Senkung des Wasserspiegels in Oberflächengewässern und im Grundwasser. Wasser spielt eine entscheidende Rolle für das Überleben der im Boden lebenden Organismen. Die Senkung des Wasserspiegels führt zu einem Rückgang an organischen Bestandteilen und an Humus im Boden. Da die Versiegelung der Fläche die Böden wasserundurchlässig macht, ist sie mit dem kompletten Verlust der biologischen Bodenfunktionen vergleichbar (FAO und ITPS, 2015, S. 132). Darüber hinaus können selbst minimale Senkungen des Wasserspiegels Moorböden endgültig beschädigen.

(Naturschutz in Bayern e.V., o. J.). Moorböden erstrecken sich in Deutschland über eine Fläche von 1,8 Millionen Hektar (BMUV, 2022, S. 6). Deutschlandweit gelten 92 % der Moorböden als entwässert (BMUV, 2022, S. 6) und deshalb zu unterschiedlichen Maßen degradiert.

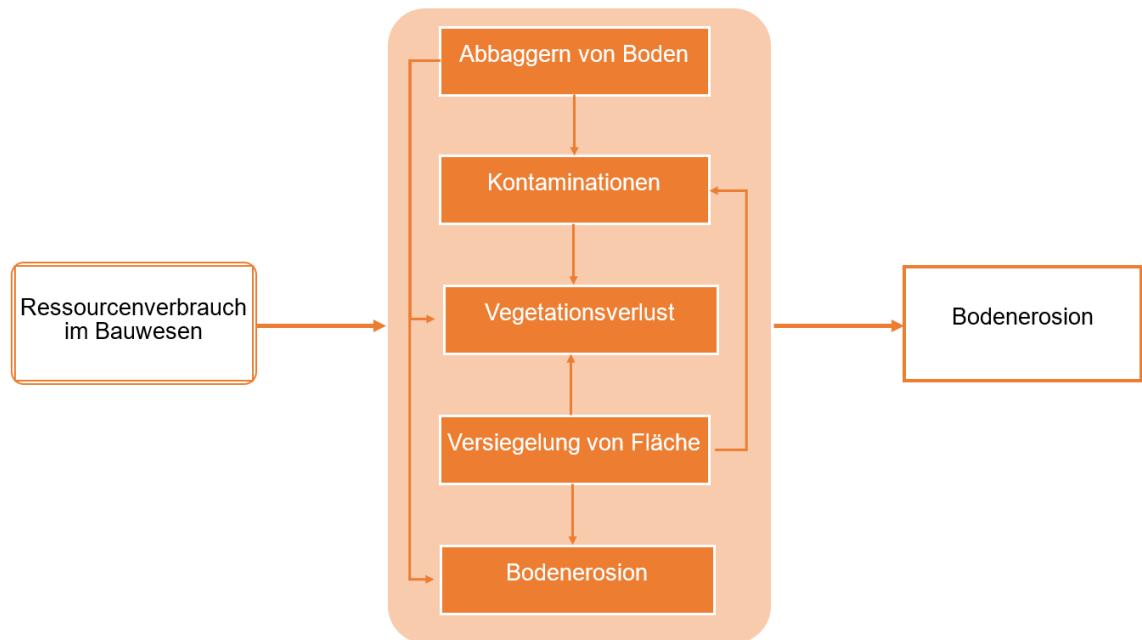


Abbildung 14: Zusammenfassende Grafik über die Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Böden (eigene Darstellung)

4.1.5 Atmosphäre

Durch den Ressourcenverbrauch im Bauwesen werden Emissionen von toxischen Gasen in die Atmosphäre freigesetzt, darunter vor allem THGs wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O), die über 96% der Emissionen repräsentieren, die durch den Gebäudesektor entstehen (IPCC, 2022, S. 1018). Diese gasförmigen Schadstoffe verunreinigen die Luft und haben negative Auswirkungen auf die Ökosysteme, indem sie beispielsweise zu Versauerung von Böden und Gewässern führen, Pflanzen schädigen und die Atemwege von Tieren beeinträchtigen (EPA, o. J.). Im Kapitel 4.2 wird das Thema der THG-Emissionen, die durch den Ressourcenverbrauch im Bauwesen entstehen, behandelt.

4.1.6 Flora und Fauna

Fluss- und Küstengebiete, Gewässer und Böden fungieren als Lebensraum unzähliger Tier- und Pflanzenarten. Änderungen in den Habitaten oder die Degradation der Lebensräume wegen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen haben unmittelbare Auswirkungen auf die Flora und Fauna. Im Folgenden sind einige wesentliche Faktoren aufgelistet, die den Einfluss des Ressourcenverbrauches auf die Umwelt und das Klima beschreiben.

Eindringen von Baggermaschinen in die Lebensräume:

Beim Abbau von Bodenrohstoffen kommt es zu direktem Lebensraumverlust für die dort lebenden Organismen (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 1; Palmer, 2022, S. 2; Koehnken, S. 5, 2018). Tiere und Pflanzen werden teilweise durch Baggermaschinen, die für die Gewinnung von Bodenrohstoffen eingesetzt werden, aus ihrem Lebensraum

herausgerissen. Nicht nur Tiere werden getötet, sondern auch Eier und Nester werden dabei zerstört (Palmer, 2022, S. 4). Auch andere natürliche Elemente wie Natursteine und Baumstämme, die von Tieren als Verstecke oder thermale Zufluchtsorte genutzt werden, werden durch den Einsatz von Baggermaschinen entfernt (Palmer, 2022, S. 2).

Erschwerte Wasserzugänglichkeit für Flora und Fauna:

Die Wasserzugänglichkeit ist essenziell für das Überleben aller Organismen. Durch die Senkung des Wasserspiegels in Oberflächengewässern und Grundwasser können sich Wasserquellen für Flora und feuchte Gebiete austrocknen, was das Absterben von Flora und Fauna verursachen kann.

Trübung in den Gewässern:

Die feinen Partikel, die beim Baggern aufgewirbelt werden, setzen sich anschließend als neue Schicht auf der Oberfläche von Flussbetten oder Meeresböden ab und beeinträchtigen die Atmungssysteme kleiner aquatischer Organismen wie Rogen oder Mikroalgen (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4). Außerdem machen Schwebstoffwolken das Wasser weniger transparent und undurchlässiger für Sonnenstrahlen (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4). Sonnenlicht ist essenziell für Algen auf der Meeresbodenoberfläche, um den Photosynthese-Prozess durchzuführen (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4; Cloern, 1987, S. 1367). Wenn Sonnenstrahlen blockiert werden, können die Algen am Meeresboden absterben. Phytoplankton ist ebenfalls eine Form von Mikroalgen und benötigt daher Licht für die Photosynthese (Cloern, 1987, S. 1367). Trübung hindert das Wachstum von Phytoplankton. Phytoplankton ist ein wichtiger Organismus für die aquatische Fauna und steht an der Basis der Nahrungskette der Flüsse, Meere und Ozeanen (Kim, 2020, S. 3). Tiere wie Quallen, Fische, Schnecken, Garnelen, usw. ernähren sich vom Phytoplankton (Kim, 2020, S. 3). Wenn Phytoplankton schwindet, wirkt sich das auf die ganze Fauna aus.

Eutrophierung:

Bodendegradation und die steigende Anzahl an Überschwemmungen tragen dazu bei, dass Abwässer und Düngemittel unfiltriert in Gewässer landen. Laut Schätzungen verbreiten sich jährlich 3,2 Megatonnen Stickstoff und 8,6 Megatonnen Phosphor weltweit in den Meeren (UNEP et al., 2013, S. 28). Phosphor und Stickstoff sind Pflanzennährstoffe und fördern eine überschüssige Produktion an Phytoplankton (Umweltbundesamt, 2021b). Phytoplankton sammelt sich an der Wasseroberfläche, wo die Sonne scheint, und können giftige, großflächige Algenblüten formen, die kein Sonnenlicht durch das Wasser zu den am Meeresboden lebenden Makroalgen penetrieren lassen (Umweltbundesamt, 2021b). Dazu begünstigt der Überfluss an Stickstoff und Phosphor auch Organismen, die die Blätter des Seegrases beschädigen (Umweltbundesamt, 2021b). Abgestorbenes Phytoplankton sinkt zum Meeresboden (Umweltbundesamt, 2021b). Dort wird es von Bakterien abgebaut, die dabei Sauerstoff verbrauchen (Umweltbundesamt, 2021b). Eine höhere Menge an Phytoplankton, die abgebaut werden muss, führt zu einem größeren Sauerstoffverzehr der Bakterien, die dafür zuständig sind. Dafür bleibt weniger Sauerstoff für andere Tier- und Pflanzenarten übrig, die sich auf dem Meeresboden befinden, wie Seesterne, Seeigel und Muscheln. Generell schadet Eutrophierung der aquatischen Biodiversität (Umweltbundesamt, 2021b). Bei großem Sauerstoffmangel entstehen Totzonen in den Meerestiefen (Díaz & Rosenberg, 2008, S. 926).

Die Anzahl der Todeszonen hat sich seit den 1960er Jahren ungefähr alle zehn Jahre verdoppelt (Díaz & Rosenberg, 2008, S. 926). Im Jahr 2007 wurden weltweit mehr als 400 Totzonen gemeldet, über eine Fläche von mehr als 245.000 km² (Díaz & Rosenberg, 2008, S. 926). Laut Daten der European Environment Agency betraf das

Eutrophierung-Risiko wegen Stickstoffüberschuss in 2020 83,5% der marinen Ökosysteme in der EU (EEA, 2022).

Bodendegradation:

Böden fungieren als Lebensraum für Pflanzen und Tiere. Ungefähr 15 Tonnen Lebewesen leben in jedem Hektar Boden (Grathwohl et al., 2002, S. 11). Es wird geschätzt, dass in einer Handvoll Boden, mehr Lebewesen sind als Menschen auf der Erde (NABU, o. J.; Umweltbundesamt, 2013). Die Bodendegradation hat negative Konsequenzen auf die im Boden lebenden Flora und Fauna. Im Kapitel 4.1.4 wurde erläutert, wie der Ressourcenverbrauch im Bauwesen zum globalen Phänomen der Bodendegradation beiträgt.

Direkte Zerstörung der Vegetation:

Das Bauwesen trägt durch die Beschaffung von Bauholz zur globalen Abholzung bei, wodurch die Vegetation zerstört wird. Darüber hinaus führt das Bauwesen durch Schaffung von freien Flächen, ebenfalls zur Zerstörung von Vegetation.

Weitere Faktoren, die mit dem Ressourcenverbrauch im Bauwesen korreliert sind, führen zum Verlust von Vegetation, wie zum Beispiel die Senkung des Wasserspiegels in Oberflächengewässern und im Grundwasser und die Bodendegradation (Palmer, 2022, S. 3). Mehrere Studien haben deswegen den Ressourcenverbrauch für die Baubranche mit dem Absterben der Vegetation in Verbindung gebracht (Kresojević et al., 2023, S. 2; Sreebha & Padmalal, 2011, S. 136; Lohani et al., 2020, S. 1).

Lärmverschmutzung:

Der Abbau von Rohstoffen und Bautätigkeiten sorgen für Lärmverschmutzung (Mononen et al., 2022, S. 20). Lärm kann die Kommunikation zwischen Tieren stören, Stress auslösen oder sie aus deren natürlichem Habitat verjagen (Mononen et al., 2022, S. 20). Lärm- und Bodenvibrationen können auch die Nahrungssuche für Tiere erschweren.

Einführung von invasiven Spezies in Ökosystemen:

Durch den Abbau und Transport von Rohstoffen, wie beispielsweise Sand, können invasive Tierarten in neuen Ökosystemen eingeführt werden (Koehnken, 2018, S. 5). Ein Beispiel dafür ist die *Corbicula Fluminea*, eine asiatische Muschel, die sich durch den Sand- und Kiestransport in Irland verbreitet hat (Lucy, 2012, S. 471).

Habitat-Fragmentierung:

Die Verzweigung von Flüssen wegen des sinkenden Wasserspiegels, die Erosion, die Abholzung, der Rohstoffabbau und die Versiegelung von Flächen können die Fragmentierung der Habitate verursachen. Migrationsrouten von Tieren werden dadurch blockiert und die Wanderung von Tieren wird erschwert (Mononen et al., 2022, S. 18). Viele Tierarten sind für die Nahrungssuche und Fortpflanzung auf Wanderung angewiesen (WWF, 2022, S. 36).

Der „Freshwater Migratory Living Planet Index“ ist ein Indikator, der den durchschnittlichen Populationstrend der Süßwasser-Migrationsfischarten in einem prozentualen Rückgang oder Anstieg der Populationsgrößen im Laufe der Zeit zeigt (Colleen, 2009, S. 317; WWF, 2022, S. 36). Ein Süßwasser-Migrationsfischarten-LPI-Wert von 100% würde bedeuten, dass die durchschnittliche Population aller erfassten Migrationsfischarten stabil ist. Wenn der Wert unter 100% liegt, bedeutet dies, dass ein Rückgang der Populationen beobachtet wurde. Der „Freshwater Living Planet Index“ zeigte zwischen 1970 und 2016 einen Rückgang von -76% (WWF, 2022, S. 36). Für

diesen starken Rückgang der Population der Migrationsfischarten können viele Faktoren verantwortlich sein, darunter auch der intensive Flusssand- und -kiesabbau.

Habitats-Verlust:

Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen trägt zur Zerstörung von Ökosystemen bei, die als Habitate für die Flora und Fauna dienen. Es ist also nicht überraschend, dass in den letzten Jahrzehnten neben einer Steigerung des Ressourcenverbrauches auch eine steigende Zerstörung der Ökosysteme beobachtet wurde. Der „Biodiversity Intactness Index“ ist ein geschätzter Prozentsatz, der die Zerstörung unter menschlichem Einfluss eines Ökosystems von seinem natürlichen Zustand beschreibt (Natural History Museum, 2021). Wenn der Biodiversity Intactness Index 100% entspricht, bedeutet dies, es handelt sich um ein von menschlichen Aktivitäten ungestörtes Gebiet (Natural History Museum, 2021). Bei einem Wert von weniger als 90%, bedeutet es, dass das Ökosystem weniger effektiv und zuverlässig arbeitet (Natural History Museum, 2021). Unter 30% bedeutet es, dass es zu einer Erschöpfung der Biodiversität in der Region gekommen ist und dass dem Ökosystem das Kollabieren droht (Natural History Museum, 2021). Laut Schätzungen lag im Jahr 1970 der globale Biodiversity Intactness Index bei 79,75% (Natural History Museum, 2021). Für das Jahr 2014 wurde der Wert auf 77,01% geschätzt (Natural History Museum, 2021). Für das Jahr 2050 erwartet man, dass die Zahl weiter auf 76,14% sinken wird (Natural History Museum, 2021).

Aussterben von Tieren- und Pflanzenarten und beschränkte Artenvielfalt:

Die Zerstörung der Ökosysteme und die weiteren aufgelisteten Faktoren haben direkte negative Auswirkungen auf die Flora und Fauna, die die Ökosysteme beleben. Der Global Living Planet Index (abgekürzt LPI) zeigt den durchschnittlichen Populationstrend der Wirbeltierarten (Collen, 2009, S. 317). Ein LPI-Wert von 100 Prozent würde bedeuten, dass die durchschnittliche Population aller erfassten Wirbeltierarten stabil ist. Unter 100% weist es auf einen Rückgang der Tierbestände. Der LPI liefert wichtige Informationen über die Biodiversität (Collen, 2009, S. 318). Wenn der Stand der Ökosysteme im Jahr 1970 als 100% gesetzt wird, würde im Vergleich im Jahr 2018 einen Rückgang von 69% beobachtet (WWF, 2022, S. 33). Im Diagramm des LPI sind sowohl fallende als steigende Trends erkennbar (WWF, 2022, S. 33) (Abbildung 15). Allgemein ist aber im Zeitraum von 1970 bis 2018 einen großen Rückfall der Populationen der Wirbeltiere zu sehen (Abbildung 15).

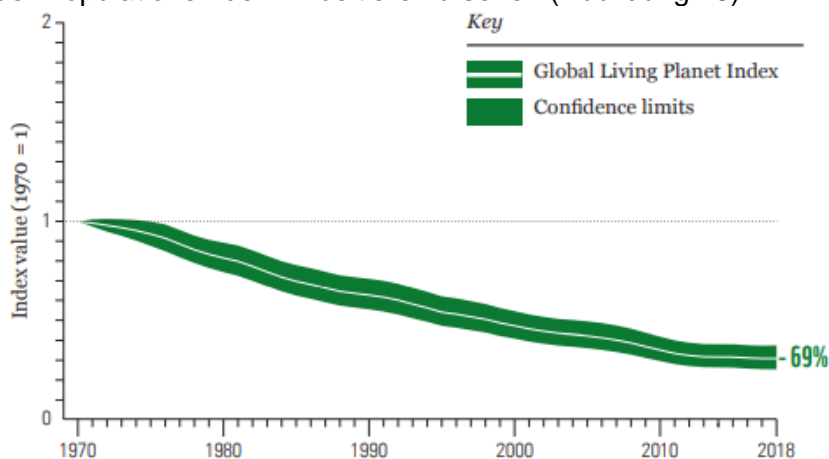


Abbildung 15: Global Living Planet Index (LPI) im Zeitraum 1970 bis 2018 (WWF, 2022, S. 33)

Der LPI-Wert für Tiere in Frischwasserökosystemen zeigt sogar einen stärkeren Rückgang als der allgemeine LPI-Wert (WWF, 2022, S. 33) (Abbildung 16). Seit 1970 verzeichnet der Frischwasser-LPI einen Rückgang um 83%. Die Belastung der

Frischwassersysteme durch den Ressourcenverbrauch hat sicherlich zu diesem Rückgang beigetragen, insbesondere durch den intensiven Sand- und Kiesabbau, der an zahlreichen Flüssen weltweit stattfindet.



Abbildung 16: Freshwater Living Planet Index (LPI) im Zeitraum 1970 bis 2018 (WWF, 2022, S. 36)

Ein Beispiel, das zeigt, wie sich der intensive Sand- und Kiesabbau in einem Fluss auf eine Frischwassertierspezies auswirken kann, ist eine Studie von 2014, die das Aussterben einer Delfinart im Ganges-Fluss in Indien und Bangladesch analysiert (Mazumder, 2014). In den Wintermonaten versammeln sich die Gangesdelfine an strategischen Orten mit niedriger Strömung und größeren Flusstiefen, wo normalerweise reichlich Fische vorhanden sind (Mazumder, 2014, S. 364). Über die Jahre wurden an diesen Versammlungsorten immer weniger Delfine beobachtet. Schätzungen zufolge ist die Anzahl von 4000-5000 im Jahr 1982 auf nur noch 1200 im Jahr 2012 gesunken (Mazumder, 2014, S. 360). Experten identifizierten den Rückgang der Fischpopulationen und die geringere Wassertiefe als Hauptursachen des Artensterbens (Mazumder, 2014, S. 364). Für den Rückgang der Fischpopulationen scheint die Überfischung eine wichtige Rolle gespielt zu haben. Der Abbau von Sand und Kies wurde mit der Erosion entlang des Flusses in Verbindung gebracht, was zu Sedimentablagerungen und einem niedrigeren Wasserspiegel an den Versammlungsorten der Delfine führte. Der Sand- und Kiesabbau hat also zur Aussterbegefahr der Tiere beigetragen.

Im Jahr 2023 hat die „International Union for Conservation of Nature“ (IUCN) 7.072 Tierspezies als vom Aussterben vulnerabel kategorisiert und 9.673 Pflanzenarten (IUCN, 2023). Dazu 6.336 Tierarten und 10.901 Pflanzenarten als vom Aussterben bedroht. Und 4.008 Tierarten und 5.702 Pflanzenarten als akut bedroht. Insgesamt sind 28% der vom IUCN evaluierten Spezies dem Aussterben vulnerabel, bedroht oder akut bedroht.

Tabelle 4 Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Flora und Fauna mit globalen Bewertungsindikatoren und Fallbeispielen (eigene Darstellung)

Auswirkungen	Globale Bewertungsindikatoren	Fallbeispiele
<i>Eutrophierung</i>	Die Anzahl der Todeszonen hat sich seit den 1960er Jahren ungefähr alle zehn Jahre verdoppelt (Díaz & Rosenberg, 2008, S. 926) Es wurden über 400 Totzonen gemeldet, die eine Fläche von über 245.000 km ² bedecken (Díaz & Rosenberg, 2008, S. 926)	/
<i>Einführung von invasiven Spezies in Ökosystemen</i>	/	Die Corbicula Fluminea ist eine invasive Muschelart, die sich durch den Sand- und Kiestransport aus Asien in Irland verbreitet hat (Lucy et al., 2012, S. 471)
<i>Habitatsfragmentierung</i>	76%iger Rückgang des Living Planet Index für wandernde Süßwasserfische zwischen 1970 und 2016 (WWF, 2022, S. 36)	/
<i>Habitats-Verlust</i>	Rückgang um 2,14 % des Biodiversity Intactness Index Im Jahr 1970: 79.75% Im Jahr 2014: 77.01% (Natural History Museum, 2021)	/
<i>Aussterben von Tier- und Pflanzenarten und geringere Artenvielfalt</i>	69%iger Rückgang des globalen Living Planet Index zwischen 1970 und 2018 (WWF, 2022, S. 33) 28% der Tierspezies sind dem Aussterben vulnerabel, bedroht oder akut bedroht (IUCN, 2023)	Die Aussterbegefahr der Delfine im Ganges-Fluss (Indien) (Mazumder, 2014)

**Die Auswirkungen in Grau beziehen sich nicht ausschließlich auf den Einfluss des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen, sondern beschreiben den generellen Zustand der Flora und Fauna, der auch von anderen Faktoren beeinflusst wird*

4.2 Einfluss auf das Klima

Während aller Lebenszyklusphasen eines Gebäudes entstehen THG-Emissionen. THGs sind Spurengase, die den Treibhauseffekt verursachen und somit zum Klimawandel beitragen. Diese Arbeit betrachtet hauptsächlich Emissionen der THGs Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O).

Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen verursacht verschiedene Arten von THG-Emissionen. Im Kapitel 3.7 wurde der Energieverbrauch im Bauwesen analysiert. Mit dem Energieverbrauch sind THG-Emissionen verbunden. Daten zum globalen Primärenergieverbrauch aus dem Jahr 2019 zeigen, dass 80,9% des Primärenergiebedarfs aus fossilen Brennstoffen wie Kohle, Erdöl und Erdgas stammen (IEA, o. J.b). Die THG-Emissionen, die bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entstehen, werden als energiebedingte Emissionen bezeichnet. Während bestimmter industrieller Produktionsprozesse entstehen auch THG-Emissionen als Nebenprodukte chemischer Reaktionen. Diese Emissionen werden als prozessbedingte Emissionen bezeichnet. Energie- und prozessbedingte Emissionen, die im IPCC-Bericht mit der Abkürzung FFI (Fossil Fuel and Industry) genannt werden (IPCC, 2022), werden in Kapitel 4.2.1 analysiert.

Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen verursacht auch THG-Emissionen durch die Zerstörung natürlicher Kohlenstoffspeicher wie der Böden und der Vegetation. Diese Emissionen werden im Kapitel 4.2.2 analysiert.

4.2.1 Energiebedingte und prozessbedingte Emissionen

Während aller Teilphasen der Herstellung, Errichtung und Entsorgung von Gebäuden entstehen THG-Emissionen, die unter die Kategorie energiebedingte und prozessbedingte Emissionen fallen. Die kumulative Emissionsmenge während dieser Phasen (einschließlich der Emissionen der Wartung, falls erforderlich) wird als „graue Emissionen“ bezeichnet (Lewis et al., 2021, S. 3). Es existiert viel Dokumentation, die die THG-Emissionen der Nutzungsphase der Gebäude auf globaler Ebene quantifiziert. Literatur, die sich mit den grauen Emissionen des globalen Bausektors beschäftigt, ist im Vergleich seltener (IPCC, 2022, S. 977). Dazu herrschen Unklarheiten über die definierte Systemgrenzen und was genau in der Summe von grauen Emissionen einfließt (IPCC, 2022, S. 977). Unterschiedliche Studien benutzen unterschiedliche Systemgrenzen (IPCC, 2022, S. 977). Bei den Berichten, die für diese Arbeit analysiert wurden, scheint in mehreren Fällen unklar zu sein, was genau unter der Summe der „grauen Emissionen“ miteinbezogen wurde.

Um graue Emissionen des Bausektors zu quantifizieren, wurden in dieser Arbeit drei Quellen analysiert und verglichen: Der IPCC-Bericht vom Jahr 2022, der UN-Bericht „2022 Global Status Report for Buildings and Constructions“ und die Daten der International Energy Agency. In allen drei dieser Berichte herrschen aber Unklarheiten bezüglich dessen, was genau unter "graue Emissionen" zu verstehen ist. Erstens deutet keine Quelle explizit darauf hin, unter grauen Emissionen auch die THG-Emissionen, die während der Entsorgungsphase von Gebäuden entstehen, zu berücksichtigen. Zweitens besteht das Problem, dass THG-Emissionen, die beim Transport von Rohstoffen, Baumaterialien und Bauabfällen entstehen, unter den Sektor Transport fallen und nicht unter das Bauwesen. Das gleiche Problem zeigt sich bei den THG-

Emissionen, die bei dem Abbau von Rohstoffen entstehen. Es nicht immer klar, ob diese Emissionen unter die Kategorie Industrie oder Bauwesen fallen. Das führt dazu, dass die Klimaauswirkungen des Bausektors hinsichtlich der grauen Emissionen unterschätzt werden.

Laut des IPCC-Berichts wurden im Jahr 2019 insgesamt 59 Gt an CO₂-Äquivalenten anthropogenen Treibhausgasen ausgestoßen. Davon sind 21% im Gebäudesektor entstanden, was 12 Gt an CO₂-Äquivalenten Emissionen entspricht (IPCC, 2022, S. 963). In der Abbildung 17 ist dargelegt, wie sich diese 12 Gt an Emissionen in Nutzungsemissionen und grauen Emissionen unterteilen. Zwischen 1990 und 2019 stiegen die Emissionen aus dem Bausektor um 50% (IPCC, 2022, S. 963). Dabei hat die Kategorie der eingebetteten Emissionen im Bausektor schneller zugenommen als die Emissionen, die während der Nutzungsphase entstanden sind (IPCC, 2022, S. 963). Dies lässt sich durch dieselbe Überlegung begründen, die bereits im Kapitel 3.7 über graue Energie angestellt wurde, nämlich: In den letzten Jahrzehnten wurde vermehrt Wert daraufgelegt, energieeffizient zu bauen (IPCC, 2022, S. 975). Weniger Betriebsemissionen bedeutet dabei nicht zwangsläufig weniger graue Emissionen; energieeffizienter zu bauen kann komplexere Materialien und industrielle Prozesse verlangen, die mehr graue Emissionen verursachen (IPCC, 2022, S. 975).

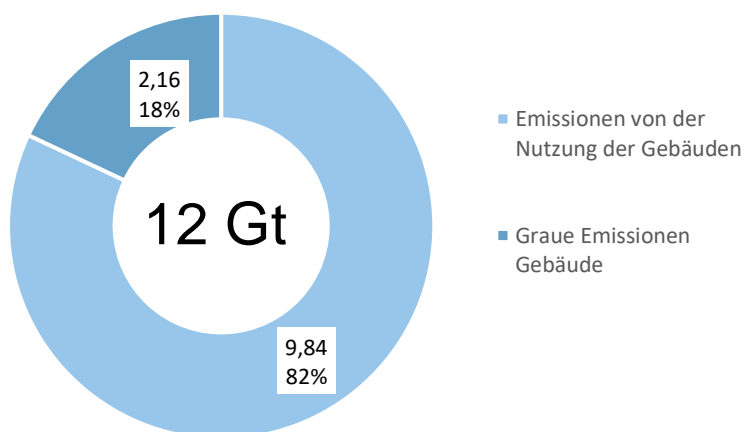


Abbildung 17: Globale Emissionen des Gebäudesektors für das Jahr 2019 in Gt (IPCC, 2022, S. 963)

Der IPCC-Bericht definiert unter grauen Emissionen hauptsächlich die Emissionen, die bei der industriellen Herstellung von Stahl und Zement entstehen (IPCC, 2022, S. 955). Der Bericht enthält keine expliziten Aussagen darüber, ob die THG-Emissionen, die beim Transport, beim Bergbau oder bei der Entsorgung von Gebäuden entstehen, auch unter die grauen Emissionen fallen. Der Bericht trifft auch keine Aussagen über das Bauwesen, was nicht nur den Hochbau betrifft.

Im UN-Bericht wird festgestellt, dass Gebäude (sowohl Wohn- als auch Nicht-Wohngebäude) für 37% der im Jahr 2021 weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich sind, was einer Menge von 13,7 Gt CO₂-Emissionen entspricht (UNEP, 2022, S. 42; Ritchie & Moser, o. J.) (Abbildung 18). Jedoch sind 76% davon direkt oder indirekt mit der Nutzung von Gebäuden entstanden (UNEP, 2022, S. 42). Die verbleibenden 24% stellen die grauen Emissionen dar, was einer Menge von 3,33 Gt CO₂-Emissionen entspricht (UNEP, 2022, S. 42). Die grauen Emissionen von Gebäuden unterteilen sich in Emissionen aus der Beton-, Stahl- und Aluminiumherstellung, die etwa 6% der globalen CO₂-Emissionen ausmachen (Abbildung 18), was 2,22 Gt CO₂-Emissionen entspricht, und Emissionen aus der Herstellung von Ziegelsteinen und Glas, die etwa

3% der globalen CO₂-Emissionen ausmachen (Abbildung 18), was 1,11 Gt CO₂-Emissionen entspricht (UNEP, 2022, S. 42). Dabei wurden auch die Emissionen berücksichtigt, die bei der Gewinnung von Rohstoffen für die Baumaterialienindustrie im Bergbau entstehen (UNEP, 2022, S. 42). Das Bauwesen ist zudem für weitere 6% der globalen CO₂-Emissionen des Jahres 2021 verantwortlich (Abbildung 18), wobei jedoch nicht klar ist, worauf sich diese Emissionen genau beziehen (UNEP, 2022, S. 42). Wahrscheinlich handelt es sich um graue Emissionen von Infrastrukturen. Der UN-Bericht lässt darauf schließen, dass die eingebetteten Emissionen im Bauwesen, die durch den Transport entstehen, dem Transportsektor und nicht dem Bausektor zugeordnet werden.

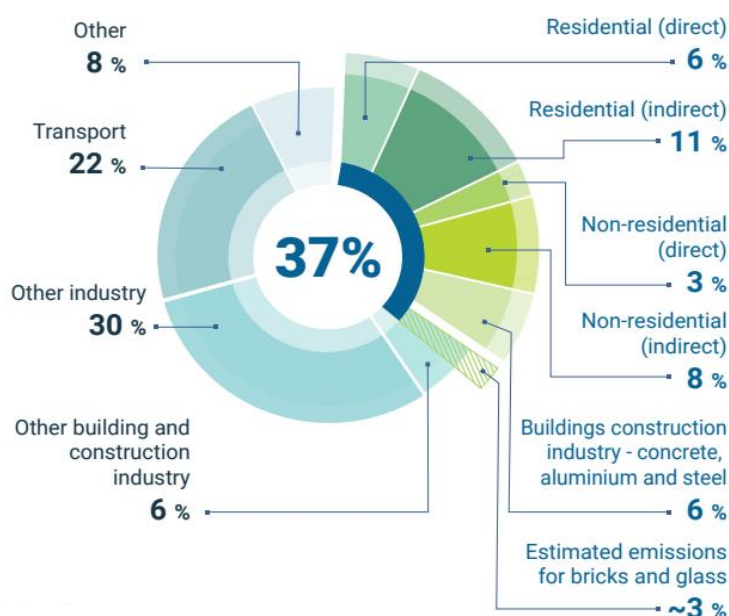


Abbildung 18: Globale Emissionen für das Jahr 2021 (UNEP, 2022, S. 42)

Laut den Daten der International Energy Agency für das Jahr 2022 sind Gebäude für 33% der im Jahr 2022 produzierten CO₂-Emissionen verantwortlich, das entspricht 12,44 Gt an CO₂-Emissionen (IEA, o. J., Ritchie & Moser, o. J.). Davon sind 80% mit dem direkten oder indirekten Energiekonsum während der Nutzungsphase verbunden (IEA, o. J.). Weitere 20% der Emissionen, die durch den Hochbau entstehen, sind graue Emissionen und machen global 7% der im Jahr 2022 produzierten Emissionen aus, was 2,5 Gt an CO₂ entspricht (Abbildung 19). Weitere 6% der im Jahr 2022 global produzierten CO₂-Emissionen sind eingebettete Emissionen von Infrastrukturen und entsprechen 2,26 Gt CO₂ (Abbildung 19). Die Daten beziehen sich nicht nur auf die energiebedingten Emissionen, sondern auch auf die prozessbedingten Emissionen, die in der Bauindustrie entstehen. Es stellt sich jedoch erneut das Problem, wie bei den IPCC- und UN-Berichten, dass nicht genau erläutert wird, was unter grauen Emissionen mitgezählt wurde, außer die industrielle Herstellung von Stahl, Zement und Aluminium.

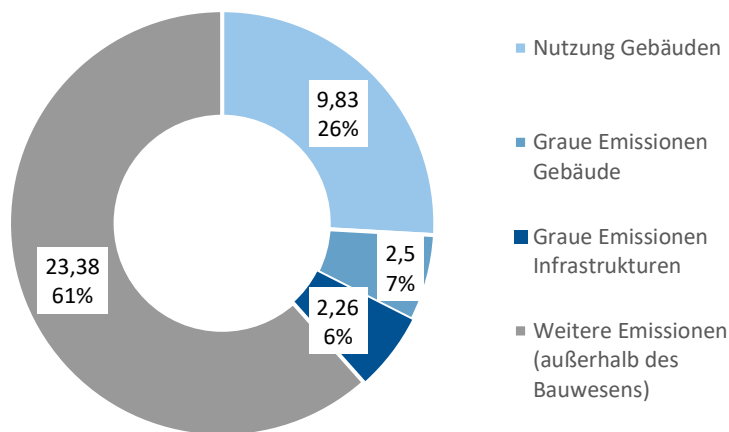


Abbildung 19: Globale Emissionen für das Jahr 2022 in Gt (IEA, o. J.)

Tabelle 5 Jährliche Emissionen des Bauwesens (eigene Darstellung nach IPCC, 2022; UNEP, 2022; IEA, o. J.; Ritchie & Moser, o. J.)

	Hochbau			Infrastruktur		
	Gesamt (inkl. Nutzung)	Graue Emissionen		Graue Emissionen		
IPCC-Report 2022	21%**	12,0 Gt CO ₂ -Äq.	3,67%**	2,16 Gt CO ₂ -Äq.	Keine Angaben	Keine Angaben
UN 2022 Global Status Report for Buildings and Construction	37%*	13,7 Gt CO ₂	9%*	3,33 Gt CO ₂	6%*	2,22 Gt CO ₂
IEA Buildings - Energy System für 2022	33%*	12,4 Gt CO ₂	6,79%*	2,5 Gt CO ₂	6,16%*	2,27 Gt CO ₂

Beim IPCC-Report 2022 handelt es sich um CO₂-Äq Emissionen. Bei den „UN 2022 Global Status Report for Buildings and Construction“ und „IEA Buildings - Energy System für 2022“ handelt es sich ausschließlich um CO₂-Emissionen (deshalb die unterschiedlichen Grautöne)

*Prozentanteile beziehen sich auf die im Jahr 2021 emittierten 37,12 Gt an CO₂ Emissionen (Ritchie & Moser, o. J.)

**Prozentanteile beziehen sich jeweils auf die im Jahr 2021 emittierten 59 Gt an CO₂-Äq Emissionen (IPCC, 2022, S. 229)

Um die Wissenslücken der drei Berichte zu füllen, werden in den nächsten drei Teilkapiteln (4.2.1.1, 4.2.1.2 und 4.2.1.3) die Emissionen, die beim Abbau von Rohstoffen für das Bauwesen, bei der industriellen Materialienherstellung und bei der Entsorgung von Bauwerken entstehen, separat betrachtet.

4.2.1.1 Abbau von Rohstoffen für das Bauwesen

Die Gewinnung von Rohstoffen für die Herstellung von Baumaterialien erfordert einen erheblichen Energieaufwand, was zu energiebedingten Emissionen führt.

Gemäß Angaben der National Stone Sand & Gravel Association (2021, S. 9) entstehen bei der Gewinnung von einer Tonne Bausand oder -kies in der US-amerikanischen Aggregatenindustrie etwa 5,51 kg energiegebundene CO₂-Äquivalenten Emissionen. Unter Berücksichtigung der Schätzungen der UNEP, die besagen, dass weltweit jährlich über 40 Gt Sand und Kies im Bauwesen verwendet werden, ergibt sich beim Multiplizieren dieser Menge mit den Emissionen pro Einheit eine Gesamtsumme von über 220 Mio. t CO₂-Äquivalenten Emissionen (angenommen, dass die Daten der US-amerikanischen Aggregatenindustrie weltweit gelten).

Für die Gewinnung einer Tonne Eisenerz entstehen 11,9 kg an energiegebundene CO₂-Äquivalenten Emissionen, basierend auf Durchschnittswerten der Eisenerzabbauoperationen der größten Eisenerzexporteure wie Indien, Australien, Brasilien und Kanada (Haque, 2022, S. 624). Jährlich werden weltweit etwa 2,6 Gt Eisenerz für die Stahlherstellung abgebaut (U.S. Geological Survey, 2023), wobei mehr als die Hälfte des produzierten Stahls im Bauwesen verwendet wird (Worldsteel Association, 2022). Daher ist das Bauwesen für den Abbau von mindestens 1,3 Gt Eisenerz verantwortlich, was zu über 14,5 Mio. t CO₂-Äquivalenten Emissionen führt.

Für die Gewinnung einer Tonne zerkleinerten Kalkgesteins werden gemäß einer Studie aus Thailand etwa 3,13 kg energiebedingte CO₂-Äquivalenten Emissionen freigesetzt (Kittipongvises, 2017, S. 77). Aus dem jährlichen weltweiten Abbau von etwa 775 Mio. t Kalkstein resultieren etwa 2,42 Mio. t CO₂-Äquivalente Emissionen (USGS, 2023; Vortex, o. J.) (angenommen, dass die Daten der Studie von Kittipongvises weltweit gelten).

Tabelle 6 Globale jährliche Emissionen, die durch den Abbau von Sand und Kies, Eisenerz und Kalkstein für die Herstellung von Baumaterialien entstehen (eigene Berechnungen)

<i>Rohstoff/ Baumaterial</i>	CO₂-Äq. pro t	Konsum im Bauwesen (weltweit)	CO₂-Äq. Emissionen (weltweit)
<i>Sand und Kies</i>	5,51 kg	>40 Gt	>220 Mio. t
<i>Stahl (bezieht sich auf den Abbau von Eisenerz)</i>	11,9 kg	>1,3 Gt	>14,5 Mio. t
<i>Zerkleinerter Kalkstein</i>	3,13 kg	>775 Mio. t	>2,42 Mio. t

4.2.1.2 Industrielle Materialienherstellung

Die Emissionen, die bei der industriellen Herstellung von Baumaterialien entstehen, machen den Großteil der eingebetteten Emissionen aus. Bei der industriellen Herstellung von Baumaterialien kommt es sowohl zu energiebedingten Emissionen als auch prozessbedingten Emissionen. Die Stahl- und Zementindustrie gehören jeweils auf Platz eins und zwei der emissionsintensivsten Industrien weltweit (IEA, o. J.c). In der Tabelle sind die Emissionen der Zement- und Stahlindustrie dargestellt. Da Stahl nicht ausschließlich im Bauwesen verwendet wird, ist nur ein Teil der Emissionen der Stahlindustrie dem Bauwesen zuzuschreiben.

Tabelle 7

Tabelle 7 Globale jährliche Emissionen der Zement- und Stahlindustrie (eigene Darstellung nach IEA, o. J.c)

	Prozessbedingte Emissionen		Energiebedingte Emissionen		Gesamt (nicht nur Bauwesen)		Für das Bauwesen	
Zement-industrie	4,04%*	1,5 Gt CO ₂	2,16%*	0,8 Gt CO ₂	6,52%*	2,42 Gt CO ₂	6,52%*	2,42 Gt CO ₂
Stahl-industrie	0,81%*	0,3 Gt CO ₂	6,20%*	2,3 Gt CO ₂	7,06%*	2,62 Gt CO ₂	3,53%*	1,31 Gt CO ₂

4.2.1.3 Entsorgungsphase

Es besteht ein großer Mangel an Literatur, die sich mit den Emissionen des Bausektors, die während der Entsorgungsphase von Bauwerken entstehen, beschäftigt. Es stehen keine Informationen über die Emissionen, die global bei der Entsorgung von Gebäuden oder Infrastrukturen freigesetzt werden, zur Verfügung.

In einer Studie des Bundesamts für Umwelt der Schweiz wurden die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus von drei Bürogebäuden und einem Wohngebäude in der Schweiz untersucht. Dabei wurde eine Lebensdauer von 60 Jahren berücksichtigt. Es wurde festgestellt, dass beim Rückbau zwischen 11% und 18 % der Emissionen des gesamten Lebenszyklus der Gebäude entstehen. Unter Rückbau versteht die Studie sowohl den Abbruch der Gebäude als auch den Transport der Abfälle, die Abfallbehandlung und die Deponierung (Teilphasen C1-C4 in der Abbildung 22 im Anhang) (Tschümperlin et al., 2016).

4.2.2 Emissionen durch die Zerstörung natürlicher Kohlenstoffspeicher

Kohlenstoff ist der Bestandteil aller organischen Verbindungen auf der Erde (Max-Planck-Gesellschaft, o. J.). Natürliche Elemente wie die Atmosphäre, die Ozeane, die Biosphäre, die Böden oder fossile Rohstoffe wie Kohle, Öl und Gas speichern Kohlenstoff in Form von unterschiedlichen chemischen Verbindungen (Max-Planck-Gesellschaft, o. J.). Zwischen diesen natürlichen Elementen treten Wechselwirkungen auf, bei denen durch eine Vielzahl an physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen Kohlenstoffverbindungen austauscht werden (Max-Planck-Gesellschaft, o. J.). Diese Wechselwirkungen bilden den globalen Kohlenstoffkreislauf (Abbildung 24 im Anhang) (Max-Planck-Gesellschaft, o. J.). Menschliche Aktivitäten können den Kohlenstoffkreislauf aus seinem Gleichgewicht bringen und durch THG-Emissionen für eine Steigerung der Kohlenstoffkonzentrationen in der Atmosphäre sorgen (Max-Planck-Gesellschaft, o. J.). Eine erhöhte THG-Konzentration in der Atmosphäre verursacht den Klimawandel (Max-Planck-Gesellschaft, o. J.).

In den Kapiteln 4.2.2.1 und 4.2.2.2 wird erläutert, wie der Ressourcenverbrauch im Bauwesen den natürlichen Kohlenstoffkreislauf stört und dadurch zu einer erhöhten THG-Konzentration in der Atmosphäre führt. Genauer gesagt wird erklärt, wie der Ressourcenverbrauch im Bauwesen durch die Zerstörung oder Degradation der natürlichen Kohlenstoffspeicher Boden und Vegetation für die Freisetzung von THG-Emissionen in der Atmosphäre sorgt.

4.2.2.1 Emissionen durch die Bodendegradation

Böden zählen nach den Ozeanen zu den zweitgrößten Kohlenstoffspeichern der Welt (European Commission, 2011). Es wird geschätzt, dass allein die oberste 30 cm-Schicht der Böden weltweit etwa 680 Gt Kohlenstoff speichert (FAO, o. J.b). Insgesamt speichern Böden rund 1.500 Gt Kohlenstoff (FAO, o. J.b). Aufgrund der großen Kohlenstoffspeicherfähigkeit hat der Zustand der Böden einen signifikanten Einfluss auf das Klima.

In dem Kapitel 5.1.4 wurde erläutert, wie der Ressourcenverbrauch im Bauwesen zum globalen Phänomen der Bodendegradation beiträgt. Bodendegradation ist eng mit einem Rückgang des Humusgehalts im Boden verbunden. Humus erfüllt viele Funktionen in den Böden, darunter auch die Speicherung von Kohlenstoff, indem er CO₂ aus der Atmosphäre bindet (Bundesregierung, 2021, 8. Oktober). Böden mit unterschiedlichen Humusanteilen können unterschiedlich viel CO₂ aus der Atmosphäre binden. Ackerböden speichern beispielsweise durchschnittlich 95 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar, während Dauergrünflächen etwa 181 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar speichern können (Bundesregierung, 2021, 8. Oktober). Ein Rückgang des Humusgehalts führt zur Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre (Bundesregierung, 2021, 8. Oktober).

Die Umwandlung von Böden in versiegelte Flächen ist eine Quelle von Emissionen, die durch den Ressourcenverbrauch im Bauwesen entstehen. Durch die Versiegelung werden Böden wasserundurchlässig, wodurch fast sämtliche ökologischen Funktionen der Böden verloren gehen (FAO & ITPS, 2015). Ein Mangel an ökologischen Aktivitäten im Boden führt zu einem Rückgang des Humusanteils und zur Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre.

In Deutschland beansprucht die Siedlungs- und Verkehrsfläche laut Stand Ende 2022 51.903 km², was 14,51% der nationalen Fläche entspricht (Umweltbundesamt, 2024). Etwa 45% davon, also 23.356,4 km², sind versiegelt, was 6,54% der nationalen Fläche entspricht (Umweltbundesamt, 2024). Zwischen 2021 und 2022 stieg die versiegelte Fläche in Deutschland um 64,0 km² (Umweltbundesamt, 2024). Neue Siedlungs- und Verkehrsflächen in Deutschland entstehen hauptsächlich durch die Umwandlung von landwirtschaftlichen Flächen (Umweltbundesamt, 2023a). Ein Quadratkilometer Ackerland kann ungefähr 9.500 Tonnen Kohlenstoff speichern (Bundesregierung, 2021, 8. Oktober). Unter der Annahme, dass eine Tonne Kohlenstoff sich in 3,67 Tonnen gasförmigen Kohlenstoffdioxid umwandelt (molare Masse von Kohlenstoffdioxid / molare Masse von Kohlenstoff = 44/12 = 3,67), ergibt sich, dass die Umwandlung der im Jahr 2021 neu versiegelten Fläche, zur Freisetzung von 2,24 Mio. t an CO₂-Emissionen geführt hat.

Weitere Landnutzungsänderungsemissionen erfolgen durch den Abbau von Rohstoffen für die Herstellung von Baumaterialien und die Deponierung von Bauabfällen. Sowohl die Nutzung von Fläche als Deponie, als auch für den Abbau von Rohstoffen, verursacht langfristige Bodendegradation (Umweltbundesamt, 2021c).

Allein im Jahr 2021 wurden in Deutschland zusätzliche 2.963 Hektar für den Rohstoffabbau abgebaggert (Umweltbundesamt, 2023, 23. Januar), was einer täglichen Fläche von 7,7 Hektar entspricht (Umweltbundesamt, 2023, 23. Januar). Davon ungefähr 15 km², also 4,1 Hektar pro Tag, ausschließlich für den Abbau von Baumineralien (Umweltbundesamt, 2023, 23. Januar). Angenommen, dass diese Flächenumwandlung zu Tagebau für den Abbau von Baumineralien auch auf Lasten

der landwirtschaftlichen Fläche stattfindet, entspricht die Flächenumwandlung für den Abbau von Baumineralien einer Emissionsmenge von 0,525 Mio. t CO₂ pro Jahr.

Es fehlt an Daten und Literatur, die den Flächenkonsum von Deponien von Bauabfällen quantifizieren und die Auswirkungen der Nutzung von Fläche als Deponie beschreiben, um eine ähnliche Schätzung für die Fläche, die als Deponie benutzt wird, zu berechnen.

Ein weiteres Phänomen, das für klimaschädliche Emissionen sorgt, ist die Bodenerosion. Erodierte Böden verlieren ihren Kohlenstoffgehalt, der dann in Form von THGs in die Atmosphäre oder in Gewässer freigesetzt wird (Lal, 2020). Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen trägt in verschiedenen Formen zur Bodenerosion bei, indem er beispielsweise Flusssufer destabilisiert und zum Kollabieren bringt (siehe Kapitel 4.1.2), zur vermehrten Küstenerosion beiträgt (siehe Kapitel 4.1.1), die Vegetation zerstört und die Böden degradiert (siehe Kapitel 4.1.5). Es ist jedoch schwer zu quantifizieren, in welchem Ausmaß das Bauwesen zur globalen Erosion der Böden beiträgt, und somit potenzielle Emissionen zu quantifizieren.

Ein weiterer Auslöser für klimaschädliche Emissionen aus den Böden, ist die Austrocknung von Moorböden. Global speichern Moorböden zwischen 550 und 600 Gt an Kohlenstoff (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2019). Im Jahr 2021 hat die Austrocknung von Moorböden über 7% der gesamten THG-Emissionen in Deutschland verursacht, was 53,7 Mio. t CO₂-Äquivalente entspricht (Umweltbundesamt, 2023c). In den Kapitel 4.1.3 und 4.1.4 wurde erläutert, wie das Bauwesen zur Austrocknung von Böden beiträgt.

Tabelle 8 Jährliche Emissionen in Deutschland, verursacht durch Prozesse, die mit Bodendegradation korrelieren (eigene Darstellung)

Phänomen	Fläche in DE	Emissionen
<i>Abbau von Bodenressourcen</i>	~15 km ² <i>jedes Jahr für Baumineralien neu abgebaggert</i>	~0,525 Mio. t CO ₂
<i>Versiegelung von Fläche</i>	64 km ² <i>jedes Jahr in neuversiegelt</i>	~2,24 Mio. t CO ₂
<i>Bodenerosion</i>	Keine Angaben	/
<i>Austrocknung von Moorböden*</i>	Keine Angaben	53,7 Mio. t CO ₂ -Äq.

**Die Austrocknung von Moorböden wird nicht ausschließlich vom Bauwesen verursacht. Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen trägt aber aus verschiedenen Gründen zur Austrocknung der Moorböden bei*

4.2.2.2 Emissionen durch die Zerstörung der Vegetation

Genauso wie Böden fungiert auch die globale Vegetation als Kohlenstoffspeicher. Pflanzen speichern insgesamt 560 Gt Kohlenstoff weltweit (FAO, o. J.a) und haben somit einen Einfluss auf die Regulation des Klimas. Für Deutschland sind Wälder die größte Emissionssenke (Max-Planck-Gesellschaft, 2020). Pflanzen absorbieren durch

die Photosynthese CO_2 aus der Luft (Bassham & Landers, 2024). Der während der Photosynthese absorbierte CO_2 wird teils im Baum als Kohlenstoff aufgespeichert und dient zum Wachstum der Pflanzen (Bassham & Landers, 2024). Der Kohlenstoff bleibt in der Pflanze gespeichert bis zum Ende der Lebensdauer. Wenn die Pflanze abstirbt oder verwelkt, werden die pflanzlichen Zellen zersetzt und tragen zur Bildung des Humus der Böden bei (Ontl, 2012). Im Humus wird auch ein Teil des Kohlenstoffs der Pflanzen gespeichert (Ontl, 2012). Der Rest wird als CO_2 in der Atmosphäre freigesetzt (Ontl, 2012).

Das Bauwesen konsumiert Holz für die Herstellung von Bauholz (IPCC, 2022, S. 975). Bauholz wird als umweltfreundliche Alternative zu anderen Baumaterialien wie Beton, Stahl angesehen, weil für die Herstellung von Bauholz geringe Mengen an Energie benötigt werden im Vergleich zu anderen Baumaterialien (WWF, 2019a). Der im Baumholz gespeicherte Kohlenstoff wird nach dem Herstellungsprozess zu Bauholz weiter in den Holzbauteilen gespeichert und nicht direkt als Kohlenstoffdioxid oder andere THGs emittiert (WWF, 2019a). Dabei müssen aber zwei Aspekte berücksichtigt werden. Erstens: Wenn ein Baum für die Herstellung von Baumaterialien abgeholzt wird, wird nicht die gesamte Masse des Baums in Bauholz umgewandelt (Ramage et al., 2019, S. 340). Nur der Stamm des Baumes wird für die Bauholzherstellung verwendet (Ramage et al., 2019, S. 340). Die Wurzelmasse, die Äste und die Rinde werden für die Bauholzherstellung nicht benutzt (Ramage et al., 2019, S. 340). Wenn diese Teile vor Ort verrotten gelassen werden, wird ein Anteil des Kohlenstoffes weiterhin als zersetzte organische Substanz (Humus) im Boden gebunden (Ramage et al., 2019, S. 340; Ontl & Schulte, 2012). Der restliche Anteil wird während des Zersetzungsprozesses als CO_2 oder andere THG in der Atmosphäre freigesetzt (Ontl & Schulte, 2012). Wenn die Wurzeln, Äste und Rinde nicht vor Ort verrotten, werden sie wahrscheinlich als Abfall der Forstwirtschaft und der Holzverarbeitenden Industrie energetisch verwertet (Umweltbundesamt, 2019b), was in der sofortigen Freisetzung des gebundenen Kohlenstoffes als THGs resultiert. Der zweite Aspekt, der berücksichtigt werden sollte bei der Kohlenstoffdioxid-Bilanz der Forstwirtschaft, ist die Tatsache, dass Bäume mit dem Alter mehr Kohlenstoff speichern als jüngere Bäume (Hetemäki et al, 2022, S. 117). Die Abholzung eines Baumes kann in der CO_2 -Bilanz nicht wieder ausgeglichen werden, indem für den abgeholzten Baum ein neuer Baum nachwächst. Der nachwachsende Baum muss für Jahrzehnte wachsen, um die gleiche Menge an CO_2 speichern zu können wie der vorherige abgeholzte Baum.

Wegen des Mangels an Dokumentation über den Holzverbrauch im Bauwesen und die komplizierten Prozesse des Kohlenstoffkreislaufes, ist es schwierig die Emissionen zu quantifizieren, die das Bauwesen durch die Abholzung verursacht. Es mangelt auch an Studien, die sich mit dem Thema der Emissionen, die durch die Gewinnung von Holz für das Bauwesen entstehen, beschäftigen.

Das Bauwesen trägt nicht nur durch die Gewinnung von Holz für die Holzproduktion zur Zerstörung der Vegetation bei. Weitere Aspekte, durch die der Ressourcenverbrauch im Bauwesen zur Zerstörung der Vegetation beiträgt, wurden bereits im Kapitel 4.1.5 aufgelistet. Beispielsweise schädigen die Austrocknung der Böden und die Bodendegradation, die teilweise durch den Ressourcenverbrauch im Bauwesen verursacht werden, die Vegetation. Alle Arten von Pflanzen speichern Kohlenstoff, und deren Zerstörung führt zu Treibhausgasemissionen (Max-Planck-Gesellschaft, o. J.).

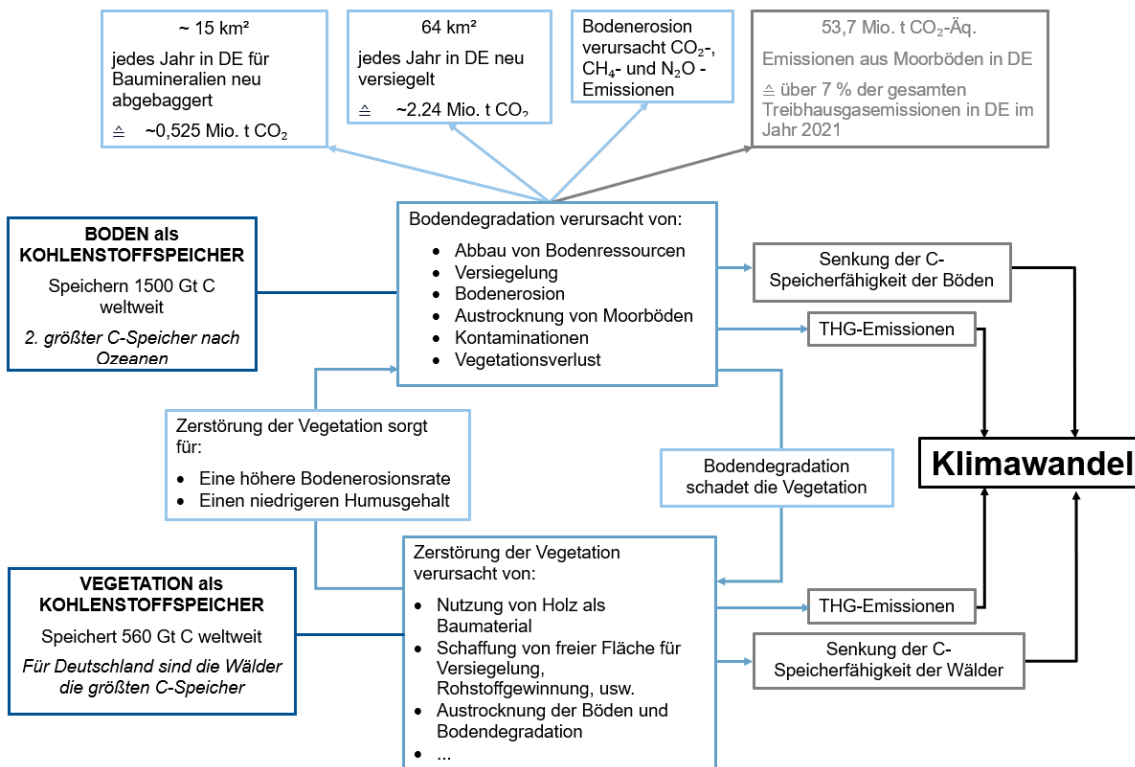


Abbildung 20: Grafische Darstellung der Zusammenhänge zwischen dem Ressourcenverbrauch im Bauwesen und der Entstehung von Treibhausgasemissionen durch die Zerstörung der natürlichen Kohlenstoffspeicher Boden und Vegetation (eigene Darstellung)

5 Indirekter Einfluss auf die Umwelt

Die Auswirkungen des Klimawandels entfalten sich auf globaler Ebene. Das bedeutet, obwohl sich der Ressourcenabbau und -verbrauch auf der Erde lokal unterscheidet und in bestimmten Regionen intensiver ist als in anderen, erstrecken sich die indirekten Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen, die durch den Klimawandel entstehen, auf den gesamten Globus und betreffen jeden Ort auf der Erde. Klimawandel wird generell als eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperaturen definiert (Bundesregierung, 2019). Zahlreiche Ereignisse sind mit dem Klimawandel verbunden und haben negative Auswirkungen auf die Umwelt. Einige Beispiele für diese negativen Auswirkungen sind:

- Das Schmelzen der Gletscher
- Die Erhöhung des Meeresspiegels
- Häufigere Dürre- und Hitzewellen
- Hochwasser
- Verwüstung
- Schäden an der biologischen Vielfalt
- Das Aussterben von Tier- und Pflanzenarten
- Die Verringerung des Sauerstoffgehalts der Ozeane
- Verlust von Meeres- und Küstenökosystemen
- Verbreitung von Infektionskrankheiten
- [...] und viele weitere (Bundesregierung, 2019)

6 Regularien

Regularien spielen eine wichtige Rolle in der Minimierung der negativen Auswirkungen des Ressourcenverbrauches auf die Umwelt und das Klima. Zum Schluss dieser Arbeit werden einige Beispiele an Regularien genannt, die sich mit der Thematik des Ressourcenverbrauches im Bauwesen auseinandersetzen und die Eindämmung der Arbeit genannten Auswirkungen fördern. Dabei wird unter Regularien auf globaler, EU- und deutscher Ebene unterschieden.

Bei der Literaturrecherche der Regularien hat sich herausgestellt, dass auf globaler Ebene eine Vielzahl an internationalen Initiativen, Vereinbarungen und Organisationen existiert, die Leitlinien, Empfehlungen und wissenschaftliche Erkenntnisse über die Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen bereitstellen. Auf globaler Ebene findet aber keine rechtliche Umsetzung statt. Die Erkenntnisse, die offiziell zur Verfügung gestellt werden, spielen aber eine wichtige Rolle für die Regierungen in der Entwicklung von Politiken, Gesetzen und Maßnahmen für die Umwelt und das Klima.

Auf EU-Ebene hingegen sieht das anders aus. Die EU ist eine supranationale Organisation, das bedeutet, sie hat Souveränität über die Mitgliedstaaten (Sächsische Landeszentrale für Politische Bildung, o. J.). Die EU erlässt Richtlinien, Verordnungen und Politiken über verschiedene Politikfeldern, darunter auch die Umwelt und das Klima, die von den Mitgliedstaaten umgesetzt werden müssen (Sächsische Landeszentrale Für Politische Bildung, o. J.). Die EU-Politiken werden auf nationaler Ebene in den Mitgliedstaaten umgesetzt, darunter auch in Deutschland (Sächsische Landeszentrale Für Politische Bildung, o. J.). Die Mitgliedstaaten tragen die Verantwortung für die Umsetzung und Durchsetzung der EU-Politiken. Das ermöglicht Freiraum, um die Politiken an nationale Umstände anzupassen und nationale Prioritäten zu berücksichtigen.

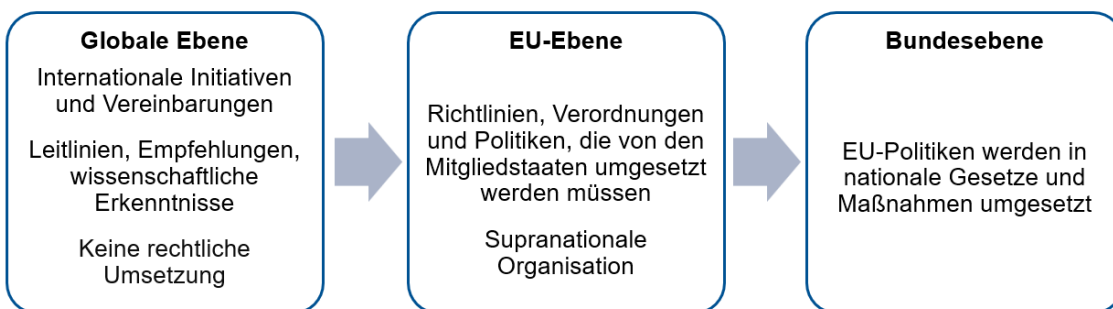


Abbildung 21: Zusammenhänge zwischen Regularien auf globaler, EU- und nationaler Ebene (eigene Darstellung)

6.1 Auf globaler Ebene

Extractive Industries Transparency Initiative (EITI):

EITI ist eine freiwillige Initiative, die Transparenz und Rechenschaftspflicht in der Rohstoffindustrie fördert, indem sie Regierungen und Unternehmen dazu ermutigt, Einnahmen aus dem Rohstoffabbau zu überprüfen und diese öffentlich zu berichten. (EITI, 2023).

UN Convention on Biological Diversity (CBD):

Die UN-Konvention über die biologische Vielfalt zielt darauf ab, den Verlust der biologischen Vielfalt zu verringern und den nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen, einschließlich Land, zu fördern. Sie ermutigt die Erhaltung und Wiederherstellung von Ökosystemen, auch im Zusammenhang mit Themen wie dem Ressourcenverbrauch im Bauwesen.

(UN Convention on Biological Diversity, 2016)

UN Sustainable Development Goals (SDGs):

Die UN hat im Jahr 2015 17 globale Ziele verabschiedet, die als universeller Aufruf zur Handlung dienen, um bis 2030 eine nachhaltige Entwicklung auf wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Ebene zu erreichen. Mehrere dieser Ziele zielen darauf ab, die negativen Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen zu minimieren (z.B. SDG 9: Industrie, Innovation und Infrastruktur, SDG 11: Nachhaltige Städte und Gemeinden, SDG 12: Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster, SDG 13: Maßnahmen zum Klimaschutz, ...).

(UN, o. J.)

6.2 Auf EU-Ebene

Bergbauabfälle-Richtlinie (2006/21/EG):

Diese Richtlinie enthält Anforderungen an die Verwaltung von Abfällen aus der Gewinnung und Behandlung von mineralischen Rohstoffen. Dazu gehören Vorschriften für die Vermeidung und Verringerung von Umweltauswirkungen durch Bergbauabfälle, einschließlich Anforderungen an die Planung, Überwachung und Sanierung von Abraumhalden, Schlammteichen und anderen Abfallentsorgungseinrichtungen. (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2006)

Habitat-Richtlinie (92/43/EWG):

Diese Richtlinie schützt natürliche Lebensräume und wild lebende Tier- und Pflanzenarten. Sie enthält Richtlinien zur Bestimmung von Schutzgebieten fest und verpflichtet die EU-Mitgliedstaaten, diese zu schützen, zu verwalten und zu konservieren. Im Kontext des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen sollen diese Schutzgebiete vor den negativen Auswirkungen von Bergbau- und Bauaktivitäten, Versiegelung, Verschmutzung und weiteren Faktoren bewahrt werden.

(Rat der Europäischen Union, 1992).

Richtlinie über die Umweltverträglichkeitsprüfung (2011/92/EU):

Diese Richtlinie legt Vorschriften für die Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) für bestimmte Projekte fest, einschließlich Bauprojekten. Die UVP soll sicherstellen, dass Umweltauswirkungen im Vorfeld bewertet und in der Planung angemessen berücksichtigt werden.

(Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, 2011).

6.3 Auf Bundesebene

Bundesberggesetz (BBergG):

Legt die Bedingungen und Verfahren fest, unter denen Bodenrohstoffe wie Sand, Kies, Eisenerz usw. abgebaut werden können. Es regelt zudem Sicherheitsmaßnahmen, Überwachungspflichten und Maßnahmen zur Wiederherstellung von Ökosystemen, wo der Bergbau eingegriffen hat.

(Deutsche Bundesregierung, 2023)

Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG):

Fördert ein sparsamen und nachhaltiges Flächenmanagement. Es enthält Regelungen über die Berichtspflicht, über Versiegelungsverbote und Kompensationsmaßnahmen, um die negativen Auswirkungen der Versiegelung von Flächen auszugleichen, und noch vieles Weiteres.

(Deutsche Bundesregierung, 2021)

Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG):

Fördert den Schutz der Natur vor menschlichen Aktivitäten, darunter Bergbau-, Abholzung- und Bauaktivitäten. Es legt die Kriterien und Verfahren für die Schaffung und Verwaltung von Schutzgebieten fest, schützt bedrohte Arten vor menschlichen Eingriffen in die Natur und enthält Bestimmungen zur Vermeidung, Minimierung und Kompensation von Eingriffen in die Natur.

(Deutsche Bundesregierung, 2022)

7 Fazit und Ausblick

7.1 Fazit

Die vorliegende Bachelorarbeit hat das Ziel verfolgt, die Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs auf die Umwelt und das Klima zu untersuchen und die Wechselwirkungen zwischen den Auswirkungen auf die Umwelt und den Auswirkungen auf das Klima zu erläutern. Dafür wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Die Ergebnisse wurden schematisch und tabellarisch dargestellt.

In Bezug auf die Forschungsfragen ergeben sich folgende Antworten:

Forschungsfrage: Welche Auswirkungen hat der Ressourcenverbrauch im Bauwesen auf die Umwelt?

Die Ergebnisse der Recherche zeigen, dass der Ressourcenverbrauch im Bauwesen weitreichende Auswirkungen auf die Umwelt hat, die sich auf verschiedene Ökosysteme auswirken. Gewässer, Böden, Atmosphäre und die darin lebende Flora und Fauna sind allesamt vom Ressourcenverbrauch im Bauwesen betroffen. Die genaue Identifizierung und Quantifizierung des Einflusses des Ressourcenverbrauchs auf die Umwelt erwies sich als schwierig. Dies liegt zum einen an der hochvernetzten Natur von Ökosystemen; eine Auswirkung des Ressourcenverbrauches auf die Umwelt kann gleichzeitig eine Vielzahl an weiteren Folgen innerhalb des Ökosystems verursachen. Zum anderen beeinflussen zahlreiche weitere Wirtschaftssektoren außer die Bauindustrie ebenfalls die Ökosysteme. Daher ist es schwierig zu unterscheiden, inwieweit der Ressourcenverbrauch im Bauwesen im Vergleich zu anderen Wirtschaftssektoren zu den Auswirkungen beigetragen hat. Dazu besteht ein Mangel an Daten, die spezifisch die Auswirkungen des Bauwesens allein auf die Ökosysteme beschreiben. Die wesentlichen direkten Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen werden in den Abbildungen 13 und 14 und in den Tabellen 3 und 4 zusammengefasst.

Forschungsfrage: Welche Auswirkungen hat der Ressourcenverbrauch im Bauwesen auf das Klima?

Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen verursacht THG-Emissionen sowohl durch die Verbrennung fossiler Energieträger und industrielle Prozesse als auch durch die Zerstörung natürlicher Kohlenstoffspeicher wie Böden und Vegetation.

In der Literatur herrschen mehrere Unklarheiten über das Thema graue Emissionen. Emissionen, die während des Rohstoffabbaus für das Bauwesen entstehen, werden eher dem allgemeinen Industriesektor zugeordnet, während Emissionen, die durch den Transport von Rohstoffen, Baumaterialien und Bauabfällen entstehen, eher dem Transportsektor zugeordnet werden, und nicht dem Bausektor. Dazu wurden in den analysierten Berichten zum Thema „grauen Emissionen“ im globalen Bausektor die Emissionen, die während der Entsorgungsphase von Bauwerken entstehen, vernachlässigt. Diese Aspekte führen dazu, dass die Emissionen des Bauwesens, die außerhalb der Nutzungsphase von Bauwerken entstehen, unterschätzt werden. Mehrere Berichte dokumentieren unter grauen Emissionen ausschließlich die Emissionen der Zement- und Stahlindustrien, die das Bauwesen mit Baumaterialien versorgen, und vernachlässigen weitere Aspekte, die auch THG-Emissionen freisetzen. Die Stahl- und Zementindustrie sind die emissionsintensivsten Industrien der Welt und

machen einen bedeutenden Teil der grauen Emissionen des Gebäudesektors aus. Weitere Emissionen, die durch den Bergbau, Transport und die Entsorgung von Bauwerken entstehen, sollten aber nicht vernachlässigt werden.

Die Analyse der energiebedingten und prozessbedingten THG-Emissionen, die durch den Ressourcenverbrauch im Bauwesen entstehen, wurde in den Tabellen 5, 6 und 7 zusammengefasst.

Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen trägt zur Zerstörung natürlicher Kohlenstoffspeicher bei, indem er zur globalen Austrocknung der Böden, zur Bodendegradation, zur Abholzung und generell zur Zerstörung der Vegetation beiträgt. Dies führt zu Treibhausgasemissionen. Insbesondere die Austrocknung der Moorböden stellt hohe Emissionen dar, zu denen der Ressourcenverbrauch im Bauwesen zumindest teilweise beiträgt. Eine Übersicht der Prozesse, die den Einfluss des Ressourcenverbrauchs auf globale Kohlenstoffspeicher beschreiben, ist in der Abbildung 20 dargestellt.

THG-Emissionen, die vom Bauwesen verursacht werden, tragen zum Klimawandel bei.

Forschungsfrage: Was sind die Wechselwirkungen zwischen den Auswirkungen auf die Umwelt und den Auswirkungen auf das Klima?

Der Ressourcenverbrauch im Bauwesen hat direkte Auswirkungen auf die Umwelt und ihre verschiedenen Ökosysteme. Die Gesamtmenge an THG-Emissionen, die durch den Ressourcenverbrauch im Bauwesen ausgesetzt werden, tragen zum Klimawandel bei. Die Zerstörung von Ökosystemen, die auch als Kohlenstoffspeicher fungieren, wie die Wälder, die Böden und vor allem die Moorböden, trägt zu den gesamten THG-Emissionen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen bei.

Da das Klima ein wesentlicher Bestandteil der Umwelt ist und die Ökosysteme sowie die Lebensbedingungen aller Organismen auf der Erde beeinflusst, hat der Ressourcenverbrauch im Bauwesen sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen auf die Ökosysteme, die durch den Klimawandel verursacht werden. Die indirekten Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Umwelt, die durch den Klimawandel entstehen, entfalten sich auf globaler Ebene, unabhängig von lokalem Ressourcenabbau und -verbrauch.

7.2 Ausblick

Die Erkenntnis, dass die genaue Reichweite des Einflusses des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Umwelt und das Klima noch eine große Wissenslücke darstellt, ist eine wichtige Schlussfolgerung dieser Arbeit. Um diese Lücke zu schließen, sind zunächst mehr Transparenz und Dokumentation über den globalen Rohstoffabbau und Ressourceneinsatz im Bauwesen erforderlich. Zweitens ist für die Dokumentation und Analyse des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen eine ganzheitlichere Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus von Bauwerken wichtig.

Eine präzise Dokumentation über den Rohstoffabbau für die Bauindustrie erfordert jedoch in vielen Teilen der Welt die Bekämpfung und Regulierung illegaler Aktivitäten, wie den illegalen Sandabbau, was in mehreren Regionen der Welt schwierig ist.

Die Minimierung des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen ist von entscheidender Bedeutung für den Erhalt der Ökosysteme und die Erreichung globaler Klimaziele. Umweltzerstörung und Klimawandel sind globale Probleme, die globale Lösungen erfordern. Daher scheint die Einführung von global einheitlichen politischen Regularien angebracht, um die negativen Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen zu minimieren und zu kompensieren.

Globale Unterschiede in den politischen Ansätzen zum Ressourcenverbrauch könnten dazu führen, dass viele Länder verstärkt auf den Export von Rohstoffen und Baumaterialien angewiesen sind. In Ländern mit weniger strengen Regulierungen, könnten Unternehmen und Industrien dazu neigen, Rohstoffe und Baumaterialien in größeren Mengen abzubauen oder zu produzieren, um sie dann auf den globalen Markt zu exportieren, um die Nachfrage in Ländern mit strengeren Regulierungen zu decken. Diese verstärkte Exportaktivität führt zu längeren Transportwegen, was weniger nachhaltig ist als die Verwendung lokaler Ressourcen.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit unterstreichen auch die Bedeutung nachhaltiger Baupraktiken, die die Lebensdauer von Bauwerken verlängern und somit den Bedarf an Neubauten und den damit verbundenen Ressourcenverbrauch minimieren. Weiterhin zeigt die Arbeit die Notwendigkeit des Übergangs zu einer zirkulären Bauwirtschaft, in der Sekundärstoffe den Bedarf an Primärstoffen minimieren.

Literaturverzeichnis

- Achenbach, H., Rüter, S. (2016). Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern in Holzbauweise. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 128 p, Thünen Rep 38, DOI:10.3220/REP1456994776000
- Almstöm, B. & Larsson, L. (Januar 2008). Shoreline Change Analysis for the Kunduchi Beach Area, Tanzania. Division of Water Resources Engineering Department of Building and Environmental Engineering Lund Institute of Technology Lund University.
- Asube, L., Bulado, S. (2022). Mapping Sand and Gravel Extraction Activities and Evaluating their Impacts on River Geometric Characteristics in Cabadbaran City Using Remote Sensing. Zugang am 15.08.2023. Verfügbar unter: https://a-a-r-s.org/proceeding/ACRS2022/ACRS22_30.pdf
- Baier, M., Bookhagen, B., Eicke, B., Elsner, H., Henning, S., Kuhn, K., Lutz, R., Moldenhauer, K., Pein, M., Schauer, M., Schmidt, S., Schmitz, M., Sievers, H., Szurlies, M. (2021). Deutschland – Rohstoffsituation 2020. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Zugriff am 01.06.2023. Verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Banuri, T., Prates, F., Martino, D., Murthy, I., Park, J., Zenghelis, D., Kosko, M. (2019). UNEP. DRIVERS OF ENVIRONMENTAL CHANGE - GLOBAL ENVIRONMENT OUTLOOK (GEO-6): HEALTHY PLANET, HEALTHY PEOPLE CHAPTER 2. Zugriff am 05.09.2023. Verfügbar unter: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/27654>
- Bassham, J. A., Lambers, H. (2024). Photosynthesis. Encyclopaedia Britannica. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.britannica.com/science/photosynthesis/Carbon-fixation-in-C4-plants>
- Beck-O'Brien, M., Egenolf, V., Winter, S., Zahnen, J., Griesshammer, N. (2022). Alles aus Holz – Rohstoff der Zukunft oder kommende Krise; Ansätze zu einer ausgewogenen Bioökonomie. WWF Deutschland. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Wald/WWF-Studie-Alles-aus-Holz.pdf>
- Birnstengel, B., Eckhardt, M., Haberland, L., Hoffmeister, J., Klose, G., Lambert, J., Sandhövel, M., Schütz, N., Simpson, R., Thevessen, A., Weiss, J. (2020). Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020. Zugriff am 20.10.2023. Verfügbar unter: <https://www.prognos.com/de/projekt/statusbericht-der-deutschen-kreislaufwirtschaft-2020>

- Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschamer, R., Stahr, K., Wilke, B.-M. (2010). Lehrbuch der Bodenkunde. In Spektrum Akademischer Verlag eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2251-4>
- BMUV - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (2022). Nationale Moorschutzstrategie.
- Brown, B. E. (2011). Mining/Quarrying of coral reefs. Encyclopedia of earth sciences. Zugriff am 25.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2639-2_115
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2019). Moorböden. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/boden-moor.html>
- Bundesregierung. (2019). Auswirkungen des Klimawandels - Konsequenzen für Deutschland und die Welt. Zugriff am 01.02.2024. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/auswirkungen-klimawandel-1669160>
- Bundesregierung. (o. J.). Was ist Humus und welche Rolle spielt er beim Klimaschutz? Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/humus-und-klimaschutz-1965592>
- Bundesverband Deutscher Gartenfreunde e.V. (o. J.). Die Zusammensetzung und Entstehung des Bodens. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: https://stadtverband-chemnitz.de/th_images/fachberatung/allgemeines/zusammensetzung_und_entstehung_des_bodens.pdf
- Bußwald, P. (2011). Projekt ZERsiedelt: Zu EnergieRelevanten Aspekten der Entstehung und Zukunft von Siedlungsstrukturen und Wohngebäudetypen in Österreich. Akaryon Niederl & Bußwald OG, Wien, 2011
- BVK - BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN KALKINDUSTRIE E. V. (o. J.b). Rohstoff Kalk - BV Kalk. Kalk. Zugriff am 25.07.2023. Verfügbar unter: <https://www.kalk.de/rohstoff/anwendungsgebiete/bauwirtschaft>
- Cloern, J. E. (1987). Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries. Continental Shelf Research, 7(11–12), 1367–1381. Zugriff am 24.09.2023. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(87\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0278-4343(87)90042-2)
- COLLEN, B., LOH, J., WHITMEE, S., McRAE, L., AMIN, R. and BAILLIE, J.E.M. (2009), Monitoring Change in Vertebrate Abundance: the Living Planet Index. Conservation Biology, 23: 317-327. Zugriff am 16.10.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01117.x>
- Deutsche Bundesregierung. (2021). Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG). Zugriff am 21.03.2024. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/>

- Deutsche Bundesregierung. (2022). Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG). Zugriff am 21.03.2024. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/>
- Deutsche Bundesregierung. (2023). Bundesberggesetz (BBergG). Zugriff am 21.03.2024. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/BJNR013100980.html>
- Díaz, R. J., Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926–929. Zugriff am 16.10.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1126/science.1156401>
- DWDS – Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache (2021). Infrastruktur, die. Zugriff am 21. November 2023. Verfügbar unter: <https://www.dwds.de/wb/Infrastruktur>
- Earth Sciences Museum. (2013). Iron Ore. Zugriff am 15.07.2023. Verfügbar unter: <https://uwaterloo.ca/earth-sciences-museum/resources/detailed-rocks-and-minerals-articles/iron-ore>
- Earthworks. (2020). Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management, Earthworks and MiningWatch Canada.
- EEA - European Environment Agency. (2022). Areas of ecosystems at risk of eutrophication and the magnitude of critical load exceedances in the EEA member countries in 2005 and 2020. Zugriff am 16.10.2023. Verfügbar unter: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/the-ecosystem-area-at-risk-3/#tab-chart_2
- EITI - Extractive Industries Transparency Initiative. (2023). Anniversary Report 2023 - Twenty years of extractives transparency.
- Elsner, H. (2022a). Gewinnung von Sand und Kies in Deutschland – Stand und Herausforderungen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Zugriff am 27.06.2023. Verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Veranstaltungen/Sand_und_Kies_in_Deutschland_2022/1_Vortrag_Elsner_Sand_und_Kies.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- EN ISO 14688:2002. (2002). Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description. International Organization for Standardization.
- EPA - United States Environmental Protection Agency. (o. J.). Ecosystems and Air Quality. Zugriff am 09.03.2024. Verfügbar unter: <https://www.epa.gov/eco-research/ecosystems-and-air-quality#:~:text=Atmospheric%20Nitrogen%20and%20Sulfur%20Deposition,both%20terrestrial%20and%20aquatic%20ecosystems>
- Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union. (2006). Richtlinie 2006/21/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2006 über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie und zur

Änderung der Richtlinie 2004/35/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, L 102/15

Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union. (2011). Richtlinie 2011/92/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten. Amtsblatt der Europäischen Union, L 26/1.

European Commission. (2011). SOIL the hidden part of the climate cycle. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/soil_and_climate_en.pdf

European Commission. (2023). Call for better management of coastal sand mining to halt 'dire' consequences. Zugriff am 05.03.2023. Verfügbar unter: https://environment.ec.europa.eu/news/call-better-management-coastal-sand-mining-halt-dire-consequences-2023-06-27_en

European Environmental Agency. (o. J.). What is soil sealing and why is it important to monitor it? Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/help/faq/what-is-soil-sealing-and>

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, ITPS - Intergovernmental Technical Panel on Soils. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Rome, Italy

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021a). Forest product statistics. Zugriff am 25.07.2023. Verfügbar unter: <https://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en/>

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021b). The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point. Synthesis report 2021. Rome. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4060/cb7654en>

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (o. J.a). All definitions. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.fao.org/soils-portal/about/all-definitions/en>

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (o. J.b). World's most comprehensive map showing the amount of carbon stocks in the soil launched. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.fao.org/newsroom/detail/World-s-most-comprehensive-map-showing-the-amount-of-carbon-stocks-in-the-soil-launched/en>

Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Airoldi, L. (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>

Florida Keys National Marine Sanctuary. (2011). What is a coral reef? Zugriff am 25.07.2023. Verfügbar unter: <https://floridakeys.noaa.gov/corals/coralreef.html#:~:text=Coral%20reefs%20are%20massive%20structures,of%20all%20known%20marine%20species.>

- Gabler Wirtschaftslexikon. (2018a). Rohstoffe. Zugriff am 03. März 2024. Verfügbar: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/rohstoffe-46814>
- Gabler Wirtschaftslexikon. (2018b). Ressource. Zugriff am 03. März 2024. Verfügbar: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/ressource-42805>
- Gabler Wirtschaftslexikon. (2018c). natürliche Umwelt. Zugriff am 21. November 2023. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/natuerliche-umwelt-41343>
- Garel, E., Bonne, W. (2009). Offshore Sand and Gravel Mining. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/236238857_Offshore_Sand_and_Gravel_Mining
- Grathwohl, P.; Hentschler, D.; Walther, W.; Klein, W.; Miehlich, G.; Mühle, H.; Thoenes, W.; Wilke, B.M. (2002). Ohne Boden – bodenlos. Eine Denkschrift zum Boden-Bewusstsein. WBB: Wissenschaftlicher Beirat Bodenschutz beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/denkschrift_ohne_boden_bodenlos.pdf
- Güntner, A., Gerdener, H., Boergens, E., Kusche, J., Kollet, S., Dobslaw, H., Hartick, C., Sharifi, E., Flechtner, F. (2023). Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland seit 2002 aus Beobachtungen der Satellitengravimetrie. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 67, (2), 74-89. DOI: 10.5675/HyWa_2023.2_1
- Haque, N. (2022). Life cycle assessment of iron ore mining and processing. Zugriff am 25.01.2024. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/284897310_Life_cycle_assessment_of_iron_ore_mining_and_processing
- Hellge, A. (2021). An vielen Stränden wird der Sand knapp. *Süddeutsche Zeitung*. Zugriff am 05.03.2023. Verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/baustoff-der-welt-geht-der-sand-aus-1.3588083>
- Hetemäki, L., Kangas, J., & Peltola, H. (2022). *Forest Bioeconomy and Climate Change*. Springer.
- Huang, B., Gao, X., Xu, X., Song, J., Geng, Y., Sarkis, J., Fishman, T., Kua, H., & Nakatani, J. (2020b). A life cycle thinking framework to mitigate the environmental impact of building materials. *One Earth*, 3(5), 564–573. Zugriff am: 1.12.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.one3ear.2020.10.010>
- IEA - International Energy Agency. (2020). Iron and Steel Technology Roadmap – Analysis. Zugriff am 25.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/energy-system/industry/steel#tracking>
- IEA - International Energy Agency (o. J.a). Buildings - Energy System. Zugriff am 25.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>

- IEA - International Energy Agency. (o. J.b). World Energy Balances: Overview – Analysis. Zugriff am 29.01.2024. Verfügbar unter:
<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world>
- IEA - International Energy Agency. (o. J.c). Industry - Energy System. Zugriff am 25.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/energy-system/industry>
- International Resource Panel. (o. J.). Global Material Flows Database. Zugriff am 03.03. 2024. Verfügbar unter: <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IUCN - The International Union for Conservation of Nature. (2022). Summary Statistics. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter:
<https://www.iucnredlist.org/resources/summary-statistics#Summary%20Tables>
- Keys National Florida Marine Sanctuary. (2011). What is a coral reef? Zugriff am 05.03.2023. Verfügbar unter:
<https://floridakeys.noaa.gov/corals/coralreef.html#:~:text=Coral%20reefs%20are%20massive%20structures,of%20all%20known%20marine%20species>
- Kim, J., & Yoo, S. (2020). Public perspective on the environmental impacts of sea sand mining: Evidence from a choice experiment in South Korea. *Resources Policy*, 69, 101811. Zugriff am 24.09.2023. Verfügbar unter:
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101811>
- Kittipongvises, S. (2017). Assessment of environmental impacts of limestone quarrying operations in Thailand. *Environmental and Climate Technologies*, 20(1), 67–83. Zugriff am 25.09.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1515/rtuct-2017-0011>
- Knoke, M. (2016). Von wegen „wie Sand am Meer“. Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren. Zugriff am 05.03.2023. Verfügbar unter:
<https://www.helmholtz.de/newsroom/artikel/vonwegenwiesandammer/>
- Koehnken, L. (2018). Impacts of Sand Mining on Ecosystem Structure, Process & Biodiversity in Rivers. WWF. Zugriff am 05.09.2023. Verfügbar unter
https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/sandmining_execsum__final_.pdf
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K., Haberl, H., & Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68(10), 2696–2705. Zugriff am 30.12.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>
- Kresojevic, M., Vakanjac, V. R., Trifkovic, D., Nikolic, J., Vakanjac, B., Polomčić, D., & Bajić, D. (2023). The effect of gravel and sand mining on groundwater and Surface Water Regimes—A case study of the Velika Morava River, Serbia. *Water*, 15(14), 2654. Zugang am 15.10.2023. Verfügbar unter:
<https://doi.org/10.3390/w15142654>

- LABO-Vorsitz - Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und Ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. (2017). Bedeutung und Schutz von Moorböden. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: https://www.labo-deutschland.de/documents/171222_LABO_Hintergrundpapier_Moorbodenschutz.pdf
- Łabuz, T. A. (2015). Environmental Impacts—Coastal erosion and coastline Changes. In *Regional climate studies* (pp. 381–396). Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1_20
- Lai, X., Shankman, D., Huber, C., Yésou, H., Huang, Q., & Jiang, J. (2014). Sand mining and increasing Poyang Lake's discharge ability: A reassessment of causes for lake decline in China. *Journal of Hydrology*, 519, 1698–1706. Zugang am 15.10.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.058>
- Lal, R. (2020). Soil erosion and gaseous emissions. *Applied Sciences*, 10(8), 2784. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/app10082784#>
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. (o. J.). Hydrogeologischer Überblick. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/hydrogeologie/tertiare-quartaere-deckschichten/hydrogeologischer-ueberblick>
- LBEG - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. (o. J.). Rohstoff Kalkstein.
- Lohani, S., Dilts, T. E., Weisberg, P. J., Null, S. E., & Hogan, Z. (2020). Rapidly accelerating deforestation in Cambodia's Mekong River Basin: A Comparative analysis of spatial patterns and drivers. *Water*, 12(8), 2191. <https://doi.org/10.3390/w12082191>
- Lucy, F. E., Karatayev, A. Y., & Burlakova, L. E. (2012). Predictions for the spread, population density, and impacts of *Corbicula fluminea* in Ireland. *Aquatic Invasions*, 7(4), 465–474. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3391/ai.2012.7.4.003>
- Lutter, S., Giljum, S., Gözet, B., Wieland, H., Manstein, C. (2018). Die Nutzung natürlicher Ressourcen Bericht für Deutschland 2018. Umweltbundesamt. S. 35. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/deuress18_de_bericht_web_f.pdf
- Mavis, J. (2003). Water Use in Industries of the Future: Mining Industry. Center for Waste Reduction Technologies. Zugriff am 15.11.2023. Verfügbar unter: <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/itp-mining-water-use-industries-future-mining-industry>
- Max-Planck-Gesellschaft. (2020). FORESTS CHANGE THE CLIMATE.
- Max-Planck-Gesellschaft. (o. J.). Der Kohlenstoffkreislauf im Erdsystem. Zugriff am 06.03.2024. Verfügbar unter: <https://www.mpg.de/21324/kohlenstoffkreislauf-im-erdsystem>

- Mazumder, M. K., Boro, F., Barbhuiya, B., & Singha, U. (2014). A study of the winter congregation sites of the Gangetic River Dolphin in southern Assam, India, with reference to conservation. *Global Ecology and Conservation*, 2, 359–366. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.09.004>
- Mononen, T., Kivinen, S., Kotilainen, J., Leino, J. (2022). Social and environmental impacts of mining activities in the EU. Policy Department for Citizens' Rights and Constitutional Affairs. Zugriff am 30.09.2023. Verfügbar unter: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/729156/IPOL_STU\(2022\)729156_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/729156/IPOL_STU(2022)729156_EN.pdf)
- NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V. (o. J.). Das Ökosystem Boden. Zugriff am 30.10.2023. Verfügbar unter: <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/oekologisch-leben/balkon-und-garten/grundlagen/boden/24123.html>
- National Stone Sand & Gravel Association. (2021). THE AGGREGATES INDUSTRY GREENHOUSE GASES: LOW EMISSIONS, HIGH RESILIENCY. Zugriff am 25.01.2024. Verfügbar unter: <https://www.nssga.org/sites/default/files/2021-05/NSSGAGreenhouseGasEmissionsReport04-26-21.pdf>
- Natural History Museum (2021). Biodiversity Intactness Index. Zugriff am 16.10.2023. Verfügbar unter: https://www.nhm.ac.uk/our-science/data/biodiversity-indicators/biodiversity-intactness-index-data?future-scenario=ssp2_rcp4p5_message_globiom&georegion=001&min-year=1970&max-year=2050&georegion-compare=null&future-scenario-compare=null&show-uncertainty=true&min-biigraph-y-axis=0&max-biigraph-y-axis=100&min-factorgraph-y-axis=0&max-factorgraph-y-axis=100&underlying-factor=crp
- Naturschutz in Bayern e.V. (o. J.). MOORZERSTÖRUNG. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.bund-naturschutz.de/natur-und-landschaft/moore-in-bayern/moorzerstoerung>
- Nikookar, M., Brake, N. A., Adesina, M., Rahman, A., & Selvaratnam, T. (2023). Past, current, and future re-use of recycled non-potable water sources in concrete applications to reduce freshwater consumption- A Review. *Cleaner Materials*, 100203. Zugriff am 15.11.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100203>
- Nordic Development Fund. (2014). Coastal Profile for Tanzania Mainland 2014 Thematic Volume I Including Threats Prioritisation. Zugriff am 30.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.scribbr.de/wissenschaftliches-schreiben/verbotene-woerter-in-einer-abschlussarbeit/>
- OHCHR - Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights. (2023). Special Rapporteur on the Human Rights to Safe Drinking Water and Sanitation: It is Critical to Initiate Discussions to Explore the Inclusion of the Contamination of Aquatic Ecosystems as a Crime against Humanity. Zugriff am

- 15.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.ohchr.org/en/news/2023/09/special-rapporteur-human-rights-safe-drinking-water-and-sanitation-it-critical>
- ÖKOBAU.DAT. (o. J.). Datenbank ÖKOBAUDAT. Zugriff am 16.03.2024. Verfügbar unter: <https://www.oekobaudat.de/>
- Ontl, T. A. & Schulte, L. A. (2012). Soil Carbon Storage. *Nature Education Knowledge* 3(10):35
- Our World in Data (o.J.a). Gross domestic product (GDP). Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: https://ourworldindata.org/grapher/national-gdp-constant-usd-wb?tab=chart&time=1970..2010&country=~OWID_WRL
- Our World in Data (o.J.b). Urbanization over the past 500 years. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: https://ourworldindata.org/grapher/urbanization-last-500-years?time=1970..2010&country=~OWID_WRL
- Palmer, J. (Januar 2022). Biodiversity and Sand Mining: Key Ecological Impacts. *Environment & Disaster Management*. Zugang am 15.08.2023. Verfügbar unter: <https://envirodm.org/resource/biodiversity-and-sand-mining-key-ecological-impacts/>
- Pandey, B. D. (2012). State of the Art Report on Technology for Producing rare Metals in India. *ResearchGate*. Zugriff am 15.07.2023. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/309767544_STATE-OF-THE_ART_REPORT_ON_TECHNOLOGY_FOR_PRODUCING_RARE_METALS_IN_INDIA
- Peduzzi, P. (March 2014). Sand, rarer than one thinks. *UNEP*. Zugriff am 27.10.2023. Verfügbar unter: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8665>
- Pesaresi, M., Melchiorri, M., Siragusa, A. and Kemper, T. (2016). *Atlas of the Human Planet 2016 Mapping Human Presence on Earth with the Global Human Settlement Layer*. Brussels: European Union. Zugriff am 05.09.2023. Verfügbar unter: <http://ghsl.jrc.ec.europa.eu/atlas2016Overview.php>
- Piciullo, L., Storrøsten, E. B., Liu, Z., Nadim, F., & Lacasse, S. (2022). A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*, 303, 106657. Zugriff am 15.09.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106657>
- Quintarelli, J. M., Da Silva, G. C., & Viglio, E. P. (2023). A Note on the Influence of the Mine Tailings Released in the Córrego do Feijão Mine Disaster on the Water Bodies of Brumadinho, Minas Gerais, Brazil. *Mine Water and the Environment*, 42(1). S. 187. Zugriff am 30.10.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10230-023-00916-8>
- Ramage, M., Burrige, H. C., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P. H., Densley-Tingley, D., Allwood, J. M., Dupree, P., Linden, P. F., & Scherman, O. A. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 68, 333–359. Zugriff am 03.01.2024. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>

- Rat der Europäischen Union. (1992). Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen
- Rentier, E., Cammeraat, E. (2022). The environmental impacts of river sand mining. *Science of the Total Environment*, 838, 155877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>
- Ritchie, H., Roser, M. (o. J.). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Our World in Data. Zugriff am 25.09.2023. Verfügbar unter: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- Roser, M., Ritchie, H., Rodés-Guirao, L., Mathieu, E., Gerber, M., Ortiz-Ospina, E., Hasell, J. (o. J.). World Population Growth. Our World in Data. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://ourworldindata.org/world-population-growth>
- Sächsische Landeszentrale Für Politische Bildung. (o. J.). Prinzipien und Leitbilder der EU – Sächsische Landeszentrale für politische Bildung. Zugriff am 21.03.2024. Verfügbar unter: <https://www.slpb.de/themen/europa-und-welt/prinzipien-und-leitbilder-der-eu>
- Saviour, N. M. (2012). ENVIRONMENTAL IMPACT OF SOIL AND SAND MINING: A REVIEW. Department of Soil Science and Agricultural Chemistry, Tamil Nadu Agricultural University, Coimbatore, Tamil Nadu, India.
- Schandl, H., Fischer-Kowalski, M., West, J., Giljum, S., Dittrich, M., Eisenmenger, N., Geschke, A., Lieber, M., Wieland, H., Schaffartzik, A., Krausmann, F., Gierlinger, S., Hosking, K., Lenzen, M., Tanikawa, H., Miatto, A., & Fishman, T. (2016). GLOBAL MATERIAL FLOWS AND RESOURCE PRODUCTIVITY Summary for Policymakers. UNEP
- Sonnenberg, A., Chapagain, A., Geiger, M., August, D. (2009). Der Wasser-Fußabdruck Deutschlands. WWF. Zugriff am 15.10.2023. Verfügbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Studie-Wasserfussabdruck.pdf>
- Sreebha, S., Padmalal, D. (2011). Environmental impact assessment of sand mining from the small catchment rivers in the Southwestern Coast of India: a case study. *Environ. Manag.* 47 (1), 130–140. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9571-6>
- Stahlinstitut VDEh. (o. J.). Kohlenstoffbasierte Stahlerzeugung. Zugriff am 20.08.2023. Verfügbar unter: <https://vdeh.de/stahlherstellung/kohlenstoffbasierte-stahlerzeugung/>
- Statista. (2023a). Rohstahlerzeugung in Deutschland bis 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28355/umfrage/stahlproduktion-von-rohstahl-in-deutschland-seit-1980/>
- Statista. (2023b). Stahlschrottverbrauch in Deutschland bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28386/umfrage/verbrauch-von-stahlschrott-in-deutschland-seit-1980/>

- Statista. (2023c). Cement production global 2022. Zugriff am 05.10.2023. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>
- Statista. (2023d). Einwohnerzahl von Deutschland bis 2022. Statista. Zugriff am 05.08.2023. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2861/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-deutschlands/>
- Statistisches Bundesamt (o. J.). Bruttoinlandsprodukt (BIP). Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Methoden/bip.html>
- Statistisches Bundesamt. (2023). Fläche für Siedlung nach Nutzungsarten in Deutschland. Zugriff am 05.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/siedlungsflaeche.html>
- Thompson, F. L., De Oliveira, B. C., Cordeiro, M. C., Masi, B. P., Rangel, T. P., Paz, P. H. C., Freitas, T., Lopes, G., Silva, B. S., De Souza Cabral, A., Soares, M. C. S., Lacerda, D., Vergílio, C. D. S., Lopes-Ferreira, M., Lima, C., Thompson, C., & De Rezende, C. E. (2020). Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. *Science of the Total Environment*, 705, 135914. Zugriff am 15.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719359091>
- Tschümperlin, L., Frischknecht, R., Pfäffli, K., Schultheiss, M., Knecht, K. (2016). Zielwert Gesamtumweltbelastung Gebäude Ergänzungsarbeiten mit Fokus auf den Einfluss der Technisierung auf die Umweltbelastung von Büro- und Wohnbauten. Bundesamt für Energie BFE, Bundesamt für Umwelt BAFU.
- TU Graz. (2022). Was ist Beton? Zugriff am 30.12.2023. Verfügbar unter: <https://www.tugraz.at/tu-graz/universitaet/klimaneutrale-tu-graz/einzelansicht/article/was-ist-beton>
- U.S. Geological Survey (2012). Limestone—A Crucial and Versatile Industrial Mineral Commodity.
- U.S. Geological Survey (o. J.). Iron Ore Statistics and Information. Zugriff am 15.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/iron-ore-statistics-and-information>
- U.S. Geological Survey. (2018). Contamination of groundwater. Zugriff am 15.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/contamination-groundwater>
- U.S. Geological Survey. (2019). Turbidity and water. Zugriff am 15.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/turbidity-and-water>

- U.S. Geological Survey. (2023a). Sand and Gravel (Construction). Mineral Commodity Summaries. Zugriff am 30.06.2023. Verfügbar unter:
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-sand-gravel.pdf>
- U.S. Geological Survey. (2023b). Lime. Mineral Commodity Summaries. Zugriff am 25.07.2023. Verfügbar unter:
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lime.pdf>
- Umweltbundesamt. (2013). Bodenfunktionen. Umweltbundesamt. Zugriff am 25.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/bodenflaeche/kleine-bodenkunde/bodenfunktionen#boden-sichern-unsere-ernahrung>
- Umweltbundesamt. (2021a). Was ist eigentlich Klima? Zugriff am 03. März 2024. Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-ist-eigentlich-klima>
- Umweltbundesamt. (2019b). Altholz. Zugriff am 03.10.2023. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.de/altholz#hinweise-zum-recycling>
- Umweltbundesamt. (2021b). Eutrophierung. Zugriff am 16.10.2023. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/eutrophierung#eutrophierung-was-bedeutet-das>
- Umweltbundesamt. (2021c). Folgen der Flächennutzung. Umweltbundesamt. Zugriff am 05.09.2023. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/raum-siedlungsentwicklung/folgen-der-flaechennutzung#flachennutzungen>
- Umweltbundesamt. (2022a). Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Ressourcenbericht für Deutschland 2022.
- Umweltbundesamt. (2022b). Wasserressourcen und ihre Nutzung. Zugriff am 15.10.2023. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#wassernachfrage>
- Umweltbundesamt. (2022c). Wasserfußabdruck. Zugriff am 15.10.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasserbewirtschaften/wasserfussabdruck#was-ist-der-wasserfussabdruck>
- Umweltbundesamt. (2022d). Bebauung und Versiegelung. Zugriff am 01.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/bodenflaeche/bodenbelastungen/bebauung-versiegelung>
- Umweltbundesamt. (2022e). Ökologischer Zustand der Fließgewässer. Umweltbundesamt. Zugriff am 10.09.2023. Verfügbar unter:
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliesssgewaesser/oekologischer-zustand-der-fliesssgewaesser#oekologischer-zustand-der-flusse-und-bache>
- Umweltbundesamt. (2023a). Siedlungs- und Verkehrsfläche. Zugriff am 05.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche#anhaltender-flachenverbrauch-fur-siedlungs-und-verkehrszwecke>

- Umweltbundesamt. (2023b). Flächenverbrauch für Rohstoffabbau. Umweltbundesamt. Zugriff am 05.09.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/flaechenverbrauch-fuer-rohstoffabbau>
- Umweltbundesamt. (2023c). Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft. Zugriff am 30.12.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#bedeutung-von-landnutzung-und-forstwirtschaft>
- Umweltbundesamt. (2024). Bodenversiegelung. Zugriff am 21.03.2024. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung#anstieg-der-versiegelten-siedlungs-und-verkehrsflaeche>
- UN - United Nations. (o. J.). The 17 Goals. Zugriff am 21.03.2024. Verfügbar unter: <https://sdgs.un.org/goals>
- UN Convention on Biological Diversity. (2016). Text of the Convention. Zugriff am 21.03.2024. Verfügbar unter: <https://www.cbd.int/convention/text>
- UNEP - United Nations Environment Programme, Global Partnership on Nutrient Management, International Nitrogen Initiative. (2013). Our Nutrient World: The Challenge to Produce More Food and Energy with Less Pollution. Zugriff am 16.10.2023. Verfügbar unter: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/10747>
- UNEP - United Nations Environment Programme. (2014). Sand, Rarer than One Thinks: UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS) - March 2014. Zugriff am 05.12.2023. Verfügbar unter: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8665>
- UNEP - United Nations Environment Programme. (2016). Global Material Flows and Resource Productivity. An Assessment Study of the UNEP International Resource Panel. H. Schandl, M. Fischer-Kowalski, J. West, S. Giljum, M. Dittrich, N. Eisenmenger, A. Geschke, M. Lieber, H. P. Wieland, A. Schaffartzik, F. Krausmann, S. Gierlinger, K. Hosking, M. Lenzen, H. Tanikawa, A. Miatto, and T. Fishman. Paris, United Nations Environment Programme.
- UNEP - United Nations Environment Programme. (2019). Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- UNEP - United Nations Environment Programme. (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.
- VDZ – Verein Deutscher Zementwerke e. V. (2021). Zementindustrie im Überblick 2021/2022. Zugriff am 01.06.2023. Verfügbar unter: https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ-Zementindustrie_im_Ueberblick_2021_2022.pdf

- Vortex. (o. J.). Handling limestone's many forms. Zugriff am 25.10.2023. Verfügbar unter: <https://www.vortexglobal.com/resources/handling-limestones-many-forms#:~:text=It%20takes%20approximately%201.8%20tons,liberate%20a%20carbon%20dioxide%20molecule.>
- Wegian, F. M. (2010). Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete. *The IES Journal*, 3(4), 235–243. Zugriff am 15.11.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1080/19373260.2010.521048>
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2023). Statistiken. Zugriff am 20.07.2023. Verfügbar unter: <https://www.stahl-online.de/startseite/stahl-in-deutschland/zahlen-und-fakten/>
- Worldsteel Association. (2022). Annual production steel data. Zugriff am 20.07.2023. Verfügbar unter: https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND
- WWF. (2019a). Heimisches Laubholz: Der Baustoff der Zukunft. Zugriff am 03.01.2024. Verfügbar unter: <https://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/verantwortungsvollere-waldnutzung/baustoff-der-zukunft#:~:text=Die%20Bedeutung%20von%20Holz%20im%20Bausektor&text=Anders%20als%20beispielsweise%20in%20Skandinavien,bei%20insgesamt%2017%2C6%20Prozent>
- WWF. (2019b). Dam burst in Brumadinho caused 125 hectares of forest loss. Zugriff am 21.03.2023. Verfügbar unter: <https://www.wwf.org.br/?69542/dam-brumadinho-125-hectares-forest-loss>
- WWF. (2022). Living Planet Report 2022 – Building a naturepositive society. Almond, R.E.A., Grooten, M., Juffe Bignoli, D. & Petersen, T. WWF, Gland, Switzerland.
- Xiao, J., Zhang, H., Hu, X., Ding, T., Xiao, X. (2023). Impact assessment of river sand resource shortage under different policy scenarios in China. *Low-carbon Materials and Green Construction*. Zugriff am 05.09.2023. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44242-023-00015-5>
- YanJun, J., Chuang, L., & Zhichao, D. (2021). Research and Analysis on Present Situation of Desert Sand Concrete. *E3S Web of Conferences*, 271, 02004. Zugriff am 05.12.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127102004>
- Zeghichi, L. (2006). The effect of replacement of natural aggregates by slag products on the strength of concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*. Zugriff am 30.10.2023. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/336288036_The_effect_of_replacement_of_natural_aggregates_by_slag_products_on_the_strength_of_concrete

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strukturierung der Arbeit (eigene Darstellung)	9
Abbildung 2: Globaler Verbrauch von Baumaterialien nach Materialtyp im Zeitraum von 2000 bis 2017 (Huang et al., 2020, S. 565)	10
Abbildung 3: Globaler Rohstoffabbau nach Kategorie (eigene Darstellung nach International Resource Panel, o. J.)	12
Abbildung 4: Globaler Abbau von nichtmetallischen Mineralien nach Verwendungsbereich (Schandl et al., 2017, S. 159).....	12
Abbildung 5: Globale Grenze des Holzverbrauchs (Beck-O'Brien, 2022, S. 26)	16
Abbildung 6: Wasserentnahme nach Sektor (eigene Darstellung nach Umweltbundesamt, 2022b).....	18
Abbildung 7: Entwicklung der bebauten Flächen und der Bevölkerung weltweit (Pesaresi et al., 2016, S.35)	19
Abbildung 8: Vergleich von Betriebs- und grauer Energie von modellierten repräsentativen Gebäudeformen für die Bauperioden 1970 und 2010 (Bußwald, 2011, S. 13)	21
Abbildung 9: Küstenerosion entlang des Kunduchi Strandes im Zeitraum von 1953 bis 2007 (Almstöm & Larsson, 2008, S. 61).....	24
Abbildung 10: Platzierung von Müllsäcken als Erosionsschutz am Kunduchi Strand (Almstöm & Larsson, 2008, S. 10).....	24
Abbildung 11: Vergleich der Querschnitte des Yangtze-Flusses in China zwischen 1998 und 2013 (Rentier & Cammeraat, 2022, S. 4).....	25
Abbildung 12: Statistik über die Anzahl schwerer Überschwemmungen in Europa (European Environment Agency, 2016).	27
Abbildung 13: Zusammenfassende Grafik über die Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Hydrologie (eigene Darstellung).....	28
Abbildung 14: Zusammenfassende Grafik über die Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Böden (eigene Darstellung)	31
Abbildung 15: Global Living Planet Index (LPI) im Zeitraum 1970 bis 2018 (WWF, 2022, S. 33).....	34
Abbildung 16: Freshwater Living Planet Index (LPI) im Zeitraum 1970 bis 2018 (WWF, 2022, S. 36)	35
Abbildung 17: Globale Emissionen des Gebäudesektors für das Jahr 2019 in Gt (IPCC, 2022, S. 963).....	38
Abbildung 18: Globale Emissionen für das Jahr 2021 (UNEP, 2022, S. 42).....	39
Abbildung 19: Globale Emissionen für das Jahr 2022 in Gt (IEA, o. J.).....	40

Abbildung 20: Grafische Darstellung der Zusammenhänge zwischen dem Ressourcenverbrauch im Bauwesen und der Entstehung von Treibhausgasemissionen durch die Zerstörung der natürlichen Kohlenstoffspeicher Boden und Vegetation (eigene Darstellung)	46
Abbildung 21: Zusammenhänge zwischen Regularien auf globaler, EU- und nationaler Ebene (eigene Darstellung)	48
Abbildung 22: Lebenszyklusphasen von Gebäuden und Infrastrukturen (Achenbach & Rüter, 2016, S.2).....	72
Abbildung 23: Genutzte Rohstoffmenge in Deutschland für das Jahr 2021 (Baier et al., 2022, S. 24).....	72
Abbildung 24: Kohlenstoffkreislauf (Max-Planck-Gesellschaft, o. J.)	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Gesamtmenge an global und in Deutschland abgebauten Rohstoffen (Bausand und -kies, Eisenerz, Kalkstein und Holz) für die Produktion von Baumaterialien (eigene Darstellung)	17
Tabelle 2 Jährlicher Wasserkonsum durch die Produktion von Zement, Stahl und Schnittholz (eigene Berechnungen nach ÖKOBAUDAT, o. J.; Statista, 2023c; FAO, 2021a).....	19
Tabelle 3 Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Hydrologie mit Bewertungsindikatoren und Fallbeispielen (eigene Darstellung).....	28
Tabelle 4 Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen auf die Flora und Fauna mit globalen Bewertungsindikatoren und Fallbeispielen (eigene Darstellung).....	36
Tabelle 5 Jährliche Emissionen des Bauwesens (eigene Darstellung nach IPCC, 2022; UNEP, 2022; IEA, o. J.; Ritchie & Moser, o. J.)	40
Tabelle 6 Globale jährliche Emissionen, die durch den Abbau von Sand und Kies, Eisenerz und Kalkstein für die Herstellung von Baumaterialien entstehen (eigene Berechnungen)	41
Tabelle 7 Globale jährliche Emissionen der Zement- und Stahlindustrie (eigene Darstellung nach IEA, o. J.c)	42
Tabelle 8 Jährliche Emissionen in Deutschland, verursacht durch Prozesse, die mit Bodendegradation korrelieren (eigene Darstellung)	44

Anhang

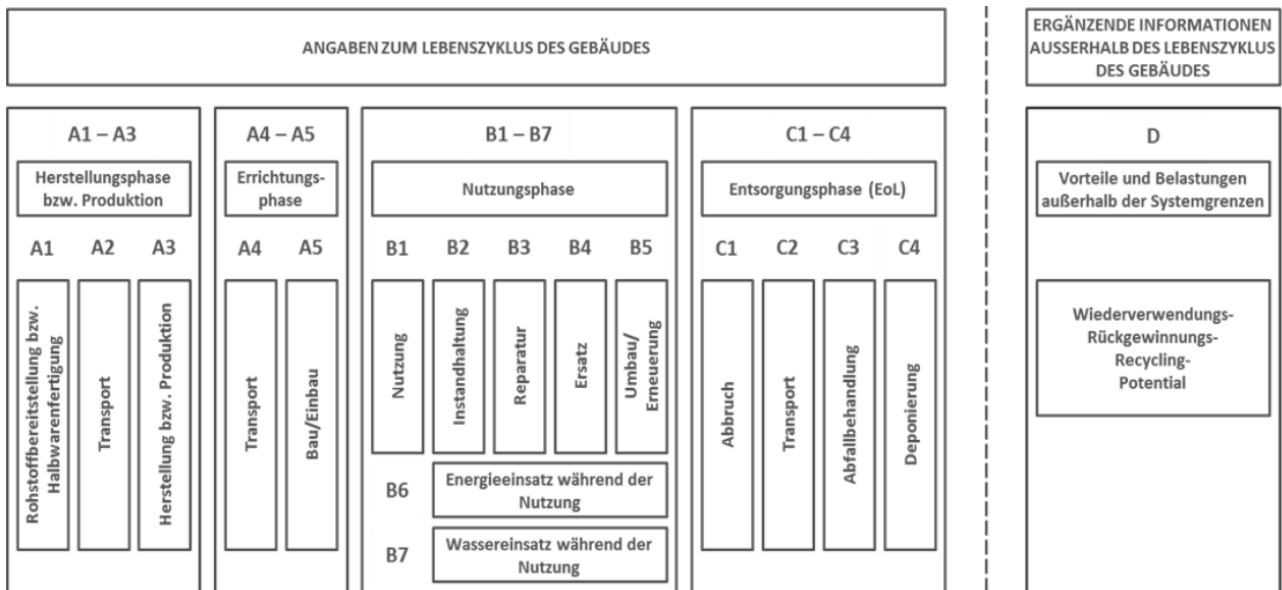


Abbildung 22: Lebenszyklusphasen von Gebäuden und Infrastrukturen (Achenbach & Rüter, 2016, S.2)

		Menge	„Dichte“	Ø Abbau- mächtigkeit	Flächenäquivalent	
		t	t/m ³	m	m ²	km ²
Baurohstoffe und Industrieminerale	Bausand, Baukies etc.	262.000.000	1,8	15	9.703.704	9,70
	gebrochene Natursteine	223.000.000	2,6	25	3.430.769	3,43
	Kalk- und Dolomitsteine	55.236.000	2,6	25	849.785	0,85
	grobkeramische Tone	11.500.000	2,2	5	1.045.455	1,05
	Quarzsande und -kiese	9.800.000	1,8	15	362.963	0,36
	Gips- und Anhydritstein	5.200.000	2,0	10	260.000	0,26
	Rohkaolin	4.969.000	2,2	30	75.288	0,08
	feinkeramische Tone	2.278.000	2,2	20	51.773	0,05
	Lavaschlacke und -sand	4.573.000	1,7	20	134.500	0,13
	Bims, Tuff und Trass	722.000	1,0	5	144.400	0,14
	Naturwerksteine	379.000	2,6	5	29.154	0,03
	Bentonit	333.000	2,6	15	8.538	0,01
	Feldspat und Pegmatitsand	238.000	1,8	30	4.407	0,00
	Schiefer	201.000	2,7	20	3.722	0,00
	Kieselerde	52.000	2,6	20	1.000	0,00
	Form- und Klebsand	52.000	1,9	10	2.737	0,00
	Zwischensumme:	580.533.000	–	–		16,11
Energierohstoffe	Braunkohle, Rheinland	51.365.000	1,3	35	1.128.901	1,13
	Braunkohle, Lausitz	43.245.000	1,3	11	3.024.126	3,02
	Braunkohle, Mitteldeutschland	12.767.000	1,3	11	892.797	0,89
	Torf (m ³)	5.215.000	0,5	1,5	6.953.333	6,95
	Zwischensumme:	108.524.300	–	–		12,00
Gesamt:					28,11	

Abbildung 23: Genutzte Rohstoffmenge in Deutschland für das Jahr 2021 (Baier et al., 2022, S. 24)

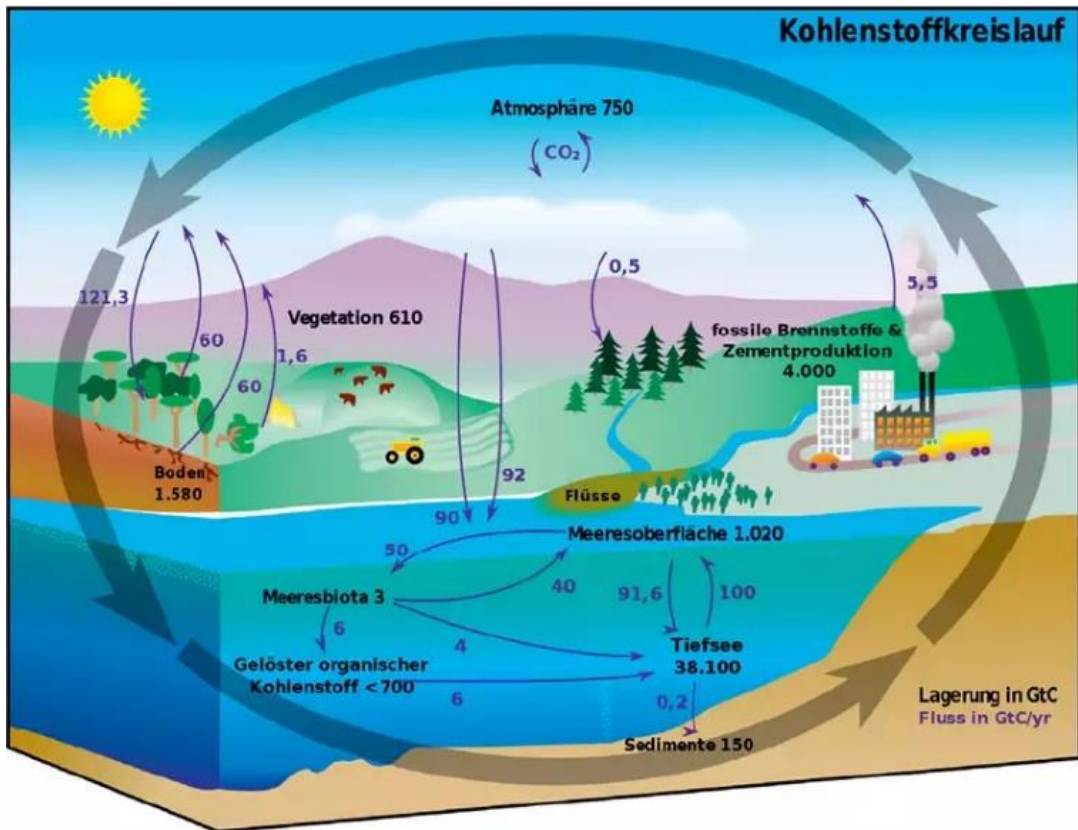


Abbildung 24: Kohlenstoffkreislauf (Max-Planck-Gesellschaft, o. J.)