



David Hackl, BSc

Baubetriebliche CO₂-Emissionen infolge der Errichtung eines Flusskraftwerks

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften –
Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht an der

Technische Universität Graz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Zenz

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Alfred Hammer

Graz, im Mai 2021

EIDESTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das im TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Danksagung

Zuerst bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Gerald Zenz, welcher schon im Bachelorstudium in den Lehrveranstaltungen *Hydraulik* und *Konstruktiver Wasserbau* meine Leidenschaft und Faszination für den Wasserbau in mir weckte.

Ein großer Dank gilt auch Herrn Dr.techn. Alfred Hammer für die lehrreiche und gute Betreuung sowie die Ermöglichung meiner Masterarbeit. Zudem bedanke ich mich auch für das stets offene Ohr und die wertvollen Tipps, die ich im Zuge Ihrer Lehrveranstaltungen während meines Studiums erhalten habe. Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Andreas Fürst – Energie Steiermark Green Power GmbH – für die notwendigen Informationen zur Erarbeitung und die Inspiration zu dieser Arbeit.

Besonders bedanke ich mich auch bei meiner Freundin Katrin, die mich seit unserem Kennenlernen im ersten Semester stets motivierte, gute Ratschläge geben konnte und dadurch für einen großen Teil meines erfolgreichen Studiums verantwortlich ist. Vielen Dank auch an meine Korrekturleserin Lisa und sämtlichen Kommilitonen*innen die mich während des Studiums unterstützt und begleitet haben.

Ein herzliches Dankeschön gebührt selbstverständlich auch meiner Familie – insbesondere meine Mutter Elisabeth, Jürgen und meinen Geschwistern Katharina, Michael und Manuel – für die ständige Unterstützung und Motivation während meines gesamten Bildungsweges.

Kurzfassung

Die beschlossenen Klimaschutzziele der Europäischen Union geben die Marschrichtung für eine klimaneutrale Zukunft vor, welche auch notwendig ist, um den anthropogenen Klimawandel zu stoppen. Für die Erreichung der Klimaneutralität ist die Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen unausweichlich. In vielen Ländern ist die Wasserkraft die größte regenerative Energiequelle und eine der bewährtesten Kraftwerkstechnologien zur emissionsfreien Stromerzeugung.

In diesem Sinne beschäftigt sich die vorliegende Masterarbeit mit der Ermittlung der baubetrieblichen CO₂-Emissionen infolge der Errichtung eines Flusskraftwerks nach aktuellem Stand der Technik. Diesbezüglich werden zuerst der Klimawandel, die Entwicklung der Klima- und Energieziele sowie die Wasserkraft als Energiequelle (inklusive der aktuellen Wasserkraftnutzung in Österreich und Europa) erläutert und analysiert. Anschließend werden die Eigenschaften des am meisten vorkommenden Treibhausgases – Kohlenstoffdioxid – näher beschrieben. In weiterer Folge werden die spezifischen baubetrieblichen CO₂-Emissionsfaktoren der Nutzung fossiler Kraftstoffe (Benzin und Diesel), der Betonherstellung und Stahlerzeugung sowie der Stromaufbringung inklusive der jeweiligen Vorketten für die Herstellung eines Flusskraftwerks ermittelt. Die Funktions- und Bauweise eines typischen Laufwasserkraftwerks wird anhand der drei zuletzt errichteten Murkraftwerke (Leistung je rund 18 MW, Ausbauwassermenge 200 m³/s) südlich von Graz analysiert. Basierend auf den erarbeiteten Emissionsfaktoren und der Massenbilanz eines Murkraftwerks werden dessen baubetriebliche CO₂-Emissionen berechnet.

Die Berechnungen der baubetrieblichen CO₂-Emissionen zeigen, dass sich aktuelle Murkraftwerke infolge der regenerativen Energiegewinnung und unter Berücksichtigung der in der Arbeit ermittelten Emissionsfaktoren nach nur kurzer Betriebszeit der Hauptgewerke amortisieren. Folglich erzeugen Flusskraftwerke nahezu über ihre gesamte Nutzungsdauer (mehr als 100 Jahre) vollständig klimaneutrale Energie.

Abstract

The climate protection targets which have already been agreed by the European Union, are necessary in order to stop the current global climate change. To achieve these climate goals, a climate-neutral power supply as well as a climate-neutral adjustment of everyday domestic life are required. As a result, the creation and expansion of renewable energies are unavoidable. In many countries hydropower is the biggest renewable energy source and an established technology for emission-free energy production.

Therefore, this master thesis deals with the construction-related CO₂ emissions caused by the construction of a river power plant according to the current state of the art. The thesis will start out by describing and analyzing climate change, climate protection targets and hydropower as a renewable energy source. Next, the chemical and technical properties of the most common greenhouse gas – carbon dioxide – will be described in more detail. Subsequently, the specific CO₂ emission factors of fossil fuels (petrol and diesel), concrete and steel production as well as electricity generation will be determined including their respective supply chain emissions. The function and design of a river power plant is derived from the three most recently constructed Mur power plants (power of approximately 18 MW, discharge of 200 m³/s) in the south of Graz. Based on the determined emission factors and the mass balances of a Mur power plant, its construction-related CO₂ emissions will be calculated.

Considering the determined emission factors, the calculations of the construction-related CO₂ emissions show that current Mur power plants amortize after a short operating time due to their regenerative energy production. As a result, river power plants produce emission-free energy almost over their entire operating live of more than 100 years.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Klimawandel, Klima- und Energieziele	3
2.1	Der Klimawandel	3
2.2	Die Erderwärmung und ihre Folgen	5
2.2.1	Natürliche Kalt- und Warmzeiten	5
2.2.2	Einfluss der Industriellen Revolution	10
2.2.3	Folgen der Erderwärmung	12
2.3	Entwicklung der Klima- und Energieziele	18
2.3.1	Beginn des Umdenkens – Start der Klimapolitik	18
2.3.2	Klimaschutzziele der Europäischen Union	22
3.	Kohlenstoffdioxid CO ₂ – Allgemein	27
3.1	Eigenschaften	27
3.2	Natürlicher Kohlenstoffkreislauf	28
3.3	Emissionen verschiedener Brennstoffe und Äquivalenz der THG	30
4.	Wasserkraft als Energiequelle	32
4.1	Wasserwirtschaftliche Kennzahlen – Allgemein	33
4.1.1	Energieumwandlung und Leistung	33
4.1.2	Jahresarbeitsvermögen	34
4.2	Wasserkraftwerkstypen	34
4.2.1	Laufwasserkraftwerke	35
4.2.2	Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke	36

4.3	Wasserkraft in Österreich und Europa	37
4.3.1	Wasserkraft in Österreich	37
4.3.2	Wasserkraft in Europa	39
4.4	Österreichischer und Europäischer Strommix	43
4.4.1	Strommix Österreich	44
4.4.2	Strommix Europäische Union	45
5.	Ermittlung baubetrieblicher CO ₂ -Emissionsfaktoren	48
5.1	Endenergieverbrauch der Baubranche	48
5.2	CO ₂ -Emissionen infolge der Verbrennung fossiler Kraftstoffe	51
5.2.1	Emissionsfaktoren Benzin und Diesel	53
5.3	CO ₂ -Emissionen infolge der Betonherstellung	58
5.3.1	Emissionsfaktor der Zementherstellung	60
5.3.2	Emissionsfaktor der Herstellung von Bau- und Bewehrungsstahl	64
5.4	CO ₂ -Emissionen infolge des Stromverbrauchs	69
5.4.1	Emissionsfaktor Baustellenstrom	70
6.	Typische Laufwasserkraftwerke	72
6.1	Bau- und Funktionsweise der Murkraftwerke	74
6.1.1	Ökologische Maßnahmen rund um die Murkraftwerke	76
7.	CO ₂ -Emissionen infolge der Kraftwerkserrichtung	80
7.1	Ermittlung der baubetrieblichen CO ₂ -Emissionen	80
7.2	Baubetriebliche CO ₂ -Amortisation	82
8.	Zusammenfassung und Ausblick	86

Abkürzungsverzeichnis	90
Abbildungsverzeichnis.....	92
Tabellenverzeichnis.....	95
Literaturverzeichnis	96
Anhang.....	103

1. Einleitung

Die Nutzung von Energie – vor allem elektrischer Energie – ist als Antrieb und zur Erhaltung der Weltwirtschaft heutzutage wichtiger denn je. Aufgrund des exponentiellen Wachstums der Digitalisierung und der folglich immer größer werdenden Abhängigkeit von elektrischer Energie sind verlässliche, regenerative Energiequellen wie die Wasserkraft essenziell, um die täglichen Aufgaben des Alltags bewältigen zu können. Besonders die klimaneutrale Energiegewinnung ist für die Realisierung der vordefinierten Klimaschutzziele von großer Bedeutung. Folglich ist der stetige Neubau bzw. Ausbau von Wasserkraftwerksanlagen unausweichlich. Laufwasserkraftwerke sind ein gutes Beispiel für Kraftwerke mit einer konstanten und regenerativen Energiegewinnung. Sie dienen zur Abdeckung der Grundlasten des Stromnetzes und garantieren zudem eine regionale Versorgungssicherheit. Im Gegensatz zu Pumpspeicherkraftwerken kann die erzeugte Energie bei Flusskraftwerken nicht gespeichert werden. Infolgedessen muss die produzierte Energie unmittelbar nach der Erzeugung auch wieder verbraucht werden.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Ermittlung der baubetrieblichen CO₂-Emissionen infolge der Errichtung eines modernen Flusskraftwerkes sowie die Berechnung der daraus resultierenden baubetrieblichen Amortisationszeit.

Als Basis dafür werden im Rahmen der Arbeit zuerst die Geschichte und Entwicklung des Erdklimas, sowie der Einfluss der Industriellen Revolution auf den Klimawandel (in Hinblick auf deren technische Entwicklungen und die folglich steigende natürliche CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre) behandelt. Anschließend werden die geschichtlichen Entwicklungen der Klima- und Energieziele seit der ersten Weltklimakonferenz in Genf 1979 und die aktuellen Ziele der Europäischen Union für 2030 und 2050 erläutert. Nach der Verdeutlichung der Relevanz regenerativer Energiequellen für die Energiegewinnung und deren verpflichtenden Ausbaus für die Erreichung der Klimaschutzziele wird auf die Wasserkraft als Energiequelle eingegangen. Hierfür werden die wichtigsten wasserwirtschaftlichen Kennzahlen sowie die verschiedenen Wasserkraftwerkstypen allgemein beschrieben. Im Zuge der technischen Erläuterung der Energiegewinnung aus Wasser werden sowohl die

Wasserkraft als Energiequelle als auch der österreichische und europäische Strommix evaluiert. In weiterer Folge werden die Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid beschrieben und der natürliche Kohlenstoffkreislauf erläutert.

Die Kernarbeit für die Ermittlung der baubetrieblichen CO₂-Emissionen eines Murkraftwerks ist die Ermittlung der Emissionsfaktoren. Dafür werden zuerst der Endenergieverbrauch der Baubranche sowie der Energiefluss im Sektor Bau betrachtet. Anschließend werden im Rahmen einer Literaturrecherche inklusive Plausibilitätsprüfung die reinen CO₂-Emissionsfaktoren im Sinne des Baubetriebes ermittelt. Die wichtigsten Energieträger am Bau sind die fossilen Kraftstoffe Benzin und Diesel sowie elektrische Energie. Die Betriebsstoffe werden hauptsächlich für den Antrieb von Baumaschinen und Baugeräten benötigt, wobei die fossilen Kraftstoffe die maßgebenden Emissionen am Bau verursachen. Bezüglich der Baumaterialien werden die Emissionsfaktoren für die Beton- und Stahlherstellung erarbeitet. Bei der Betonherstellung wird nur der direkte Emissionsfaktor der Zementherstellung berücksichtigt. Die Zuschläge für die Betonherstellung werden bei Flusskraftwerken durch Wiederaufbereitung des Aushubmaterials vor Ort recycelt. Die CO₂-Emissionen infolge der hierfür benötigten Energien werden indirekt durch die fossilen Kraftstoffe und den Stromverbrauch mitberücksichtigt.

In dieser Masterarbeit nicht berücksichtigt werden CO₂-Emissionen infolge der Innenausstattung des Krafthauses (gesamte Elektrotechnik und maschinellen Einrichtungen), des Stahlwasserbaus und der Gestaltungsmaßnahmen rund um die Kraftwerke.

Um Verständnis für die Funktions- und Bauweise eines Flusskraftwerks zu gewinnen, werden die drei zuletzt errichteten Murkraftwerke (MKW) südlich von Graz – Puntigam, Gössendorf und Kalsdorf – genauer erläutert. Diese Kraftwerke repräsentieren den aktuellen Stand der Technik im Flusskraftwerksbau. Für die Berechnung der baubetrieblichen CO₂-Emissionen sowie der baubetrieblichen CO₂-Amortisation wird das MKW Puntigam herangezogen.

2. Klimawandel, Klima- und Energieziele

Der Begriff der Nachhaltigkeit gewinnt immer mehr an Bedeutung. Infolgedessen werden der Klimawandel und die Erderwärmung auch immer häufiger in sämtlichen Medien thematisiert. Durch die ständige Konfrontation mit dem Klimawandel und dessen Auswirkungen steigt das Engagement der Menschheit für die Reduktion der Erderwärmung und somit auch die Reduktion der anthropogenen (vom Menschen verursachten) Treibhausgase. Ein großes Potential zur Reduzierung der Treibhausgase liegt in der Energiegewinnung. Durch die vermehrte Nutzung von klimaneutralen Energien und die stetige Reduzierung von fossilen Brennstoffen können Treibhausgasemissionen signifikant reduziert werden. Aktuell ist die Wasserkraft neben der Windenergie, Solarenergie, und Erdwärme die wichtigste erneuerbare Energiequelle.

2.1 Der Klimawandel

Das Klima auf der Erde wechselte im Laufe der Geschichte mehrmals zwischen natürlichen Kalt- und Warmzeiten. Diese Wechsel sind natürlich und geschehen über eine sehr lange Zeitdauer. Heutzutage wird unter dem Begriff „Klimawandel“ die beschleunigte Klimaänderung verstanden, welche von dem Menschen verursacht wird [vgl. [1]].

Die Ursache für den Klimawandel sind in erste Linie Treibhausgase. Der Mensch benötigt für nahezu alle Tätigkeiten Energie, welche meist mit einem CO₂-Ausstoß verbunden ist. Die Aufgaben des Alltags wie zum Beispiel Arbeiten (auch im Home-Office), Kochen, Fortbewegung und viele weitere Aufgaben können ohne die Verwendung von fossilen, atomaren oder klimaneutralen Energien kaum durchgeführt werden. Durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern wie zum Beispiel Öl, Gas und Kohle entsteht jedoch Kohlenstoffdioxid, welches das maßgebendste Treibhausgas in der Atmosphäre ist.

Viele Treibhausgase sind natürliche Bestandteile der Erdatmosphäre. Allerdings führt die stetige Produktion von Treibhausgasen zu einer erhöhten Konzentration dieser Gase. Dies fördert den Treibhauseffekt – er beschreibt das Phänomen der

Erderwärmung infolge der erhöhten Treibhausgase (Abb. 1). Durch die erhöhte Gas-Konzentration in der Atmosphäre wird die Schutzhülle der Erde verdichtet. Die Sonnenstrahlen dringen durch diese Schutzhülle hindurch und werden an der Erdoberfläche reflektiert. Aufgrund der Dichte der Atmosphäre ist die Energie der reflektierten Sonnenstrahlen nicht gleich der Energie der ins Weltall abgeführten Sonnenstrahlen. Die hohe Treibhausgaskonzentration erzwingt eine weitere Reflexion der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre. Infolgedessen verbleibt zusätzliche Energie in Form von Wärme auf der Erde [vgl. [1]].

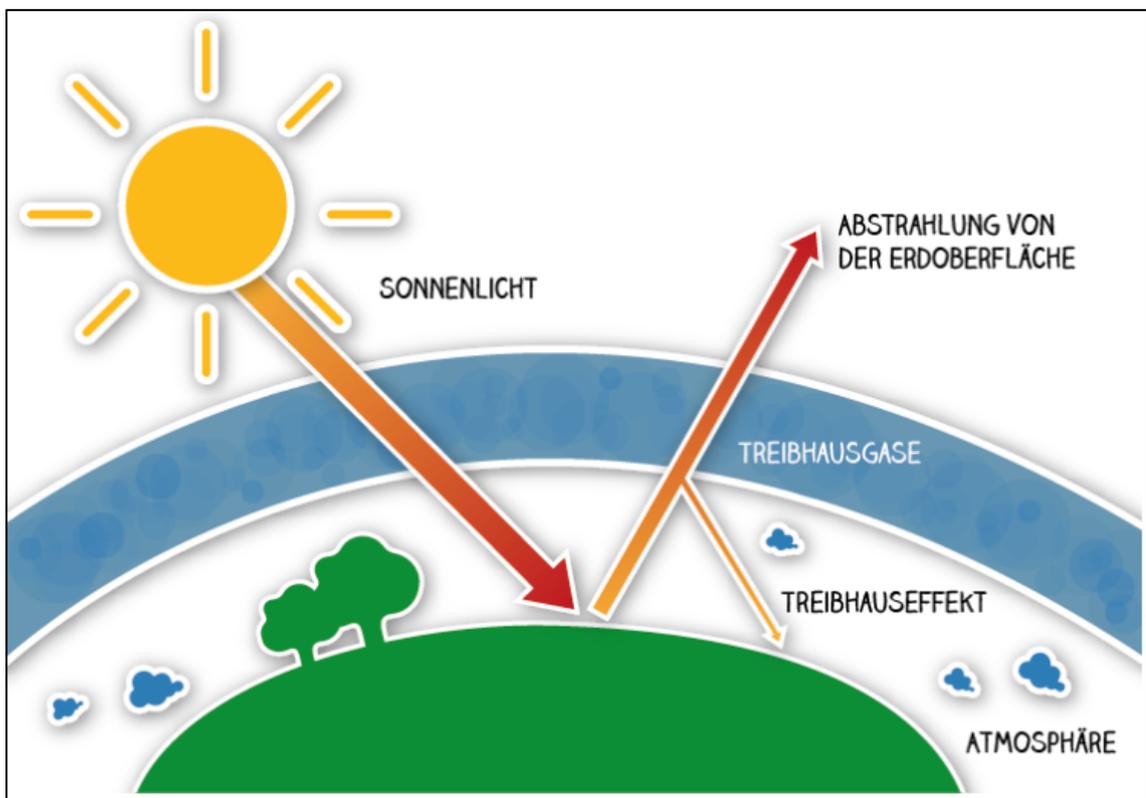


Abb. 1: Treibhauseffekt [2]

Das physikalische Prinzip dieses Effekts ist ähnlich wie in einem Gewächshaus. Sonnenstrahlen gelangen durch die Glasscheibe hindurch und werden reflektiert. Beim Verlassen des Gewächshauses wird ein Teil der Sonnenstrahlen durch die Glasscheibe erneut reflektiert und Wärme bleibt zurück.

Die Treibhausgase, deren Konzentration durch menschliche Aktivitäten am meisten ansteigen, sind Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan, Distickstoffoxid (Lachgas) und fluorierte Gase. Kohlenstoffdioxid ist hierbei das meiste erzeugte

Treibhausgas. Die erhöhte CO₂-Konzentration verursacht rund 63% der anthropogenen Klimaerwärmung. Die restlichen Treibhausgase werden in geringeren Mengen emittiert. Deren Einfluss auf die Klimaerwärmung ist dennoch hoch, da sie die Sonnenstrahlung bis zu tausendfach effektiver zurückhalten als CO₂. Infolgedessen sind 19% des Klimawandels auf Methan zurückzuführen. Distickstoffoxide (Lachgas) sind für rund 6% des Klimawandels verantwortlich [vgl. [3]].

2.2 Die Erderwärmung und ihre Folgen

Die globale Durchschnittstemperatur der Erde wird immer höher. Seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1850 ist festzustellen, dass die letzten drei Jahrzehnte allesamt wärmer waren als die zuvor dokumentierten Jahrzehnte. In Summe hat sich seit 1850 die globale Durchschnittstemperatur um 0,85°C erhöht. Wissenschaftler*innen haben als maximalen Grenzwert der globalen Erderwärmung plus 2°C gegenüber der Durchschnittstemperatur vor industrieller Zeit festgelegt. Wird dieser Wert überschritten vervielfacht sich das Risiko für globale Umweltkatastrophen [vgl. [3]].

2.2.1 Natürliche Kalt- und Warmzeiten

Im Laufe der knapp 4,6 Milliarden Jahre alten Erdgeschichte variierte das Klima mehrmals zwischen Kalt- und Warmzeiten. Diese Wechsel im Klimasystem sind komplex und geschehen aufgrund von Änderungen in der Energiebilanz der Erde. Die vergangenen Klimaextreme liefern grundlegende Informationen zu den aktuellen Klimaänderungen und deren Prognosen. Des Weiteren sollen die Ursachen der vergangenen Klimawandel Aufschlüsse über den anthropogenen Einfluss auf den aktuellen Klimawandel liefern. Im Rahmen der Paläoklimatologie (Wissenschaft des Vorzeitklimas) konnten genauere Informationen zu den Klimaverhältnissen der Erde bis 542 Millionen Jahre vor heute erforscht werden. Noch ältere Rückschlüsse auf das Klima sind aufgrund begrenzter Datierungsmöglichkeiten und bis dato fehlenden, ausreichend detaillierten Tiefseesedimentkernen nicht möglich [vgl. [4]].

Natürliche Klimaänderungen können unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen führen Änderungen in der Umlaufbahn (zyklischen Schwankungen) der Erde um die Sonne zu Klimaänderungen. Zum anderen hat die planetarische Albedo einen maßgebenden Einfluss auf die Entwicklung des Klimas. Hierbei ist die Reflexionsstrahlung der Sonnenenergie infolge der Helligkeit der Erdoberfläche gemeint. Die Polargebiete reflektieren aufgrund ihrer hellen Eisoberflächen das Sonnenlicht vollständig, wogegen Gewässer, Ackerflächen und Städte die Sonnenstrahlen größtenteils absorbieren. Infolgedessen unterstützt die Erdalbedo während einer Kaltzeit die Abkühlung der Erde durch die erhöhte Reflexion der Sonnenstrahlen zufolge der vermehrten Eisbildung. In einer Warmzeit wiederum verstärkt die Erdalbedo die Erderwärmung infolge der fehlenden Eisflächen. Einen weiteren signifikanten Einfluss auf die Klimaentwicklung haben Änderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre. Treibhausgase (Kohlenstoffdioxid, Methan, fluorierte Gase) und Aerosole beeinflussen die Absorption und Reflexion der Wärmestrahlung [vgl. [4]].

Die Ursachen der vergangenen Klimaänderungen im Laufe der Erdgeschichte können grob in drei Zeitabschnitten unterteilt werden: „kurzfristig auftretende, Jahrzehnte andauernde und Jahrtausend bis Jahrhunderttausend lange Ereignisse.“ Auch kurzfristig auftretenden Ereignisse wie zum Beispiel Meteoriteneinschläge, massive und kurzweilige Vulkanausbrüche sowie kürzere, zyklische Meeresströmungsänderungen können langandauernde Klimaänderungen bewirken. Hierbei liegt die Zeitdauer der auslösenden Ursachen im Bereich von wenigen Sekunden bis hin zu einigen Jahren. Lang andauernde Vulkanausbrüche, kürzere Schwankungen in der Erdumlaufbahn oder auch Variationen in der Solarstrahlung durch den Sonnenfleckenzyklus (Zyklusdauer circa elf Jahre) sind allesamt Beispiele für Jahrzehnte andauernde Ereignisse. Jahrhunderttausend lange Ereignisse, welche Klimaänderungen hervorrufen sind vor allem plattentektonische Prozesse. Durch die Verschiebung der Kontinentalplatten kommt es zu Änderungen in der Ozeanzirkulation und globalen Energieverteilung. In Abb. 2 (Seite 7) sind die plattentektonischen Bewegungen vergangener erdgeschichtlicher Perioden dargestellt [vgl. [4]].

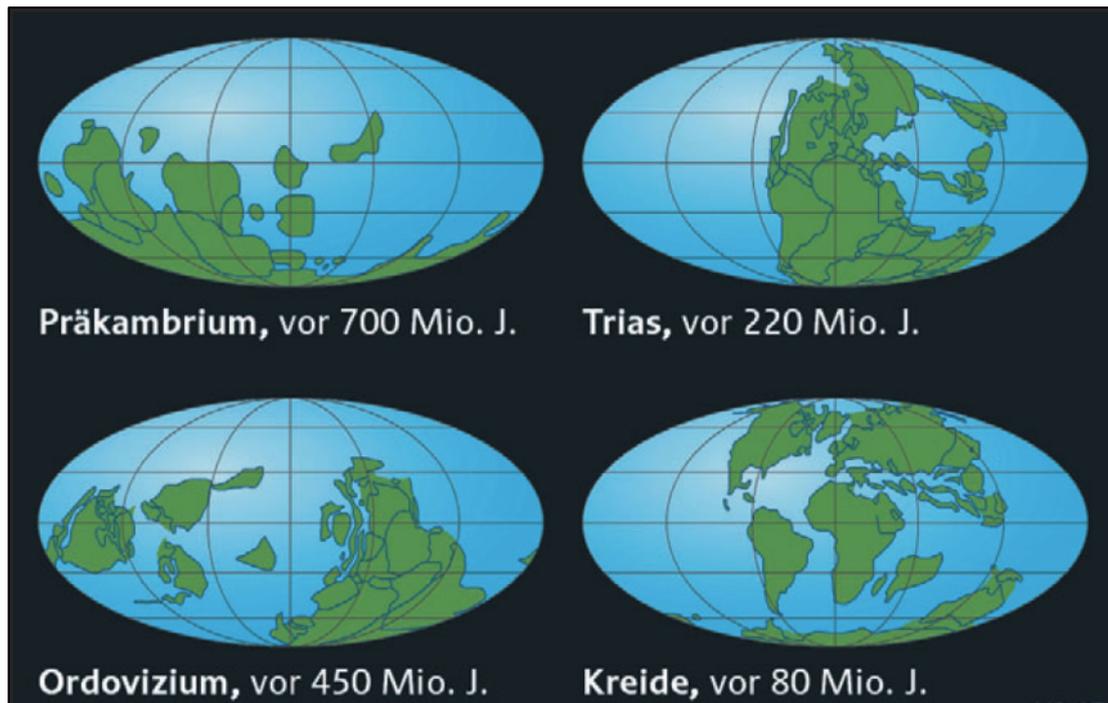


Abb. 2: Vergangene Plattentektonische Bewegungen [4]

In den vergangenen Warmzeiten war die Erde eisfrei. Infolgedessen war der Meeresspiegel rund 80 m höher als heute. Die globale Durchschnittstemperatur lag sechs bis acht Grad Celsius höher als die heutige. Die Konzentration der Treibhausgase in der Erdatmosphäre war allgemein sehr hoch. Der Kohlenstoffdioxidgehalt war mit mehr als 1000 ppm wesentlich höher als jener von heute. Der derzeitige natürliche CO_2 -Gehalt liegt ungefähr bei 400 ppm. Im Erdmittelalter (Mesozoikum) lebten die Dinosaurier zu den oben beschriebenen Bedingungen der Warmzeit. Katastrophale Meteoriteneinschläge beendeten diese Epoche. Durch große Mengen an Aerosolen in der Erdatmosphäre wurde die einkommende Sonnenstrahlung stark geschwächt und die Erde abgekühlt. Infolgedessen wurde das von heute betrachtet letzte Eiszeitalter vor rund 65 Millionen Jahren eingeleitet [vgl. [4]]. In den drei Abbildungen auf Seite 8 sind die bekannten globalen Temperaturen der Erdgeschichte dargestellt. Die Temperaturen vor Beginn des letzten Eiszeitalters bis heute sind in Abb. 4 und Abb. 5 fokussiert dargestellt. Die Mittellinie in den Abbildungen repräsentiert den Mittelwert der heutigen globalen Durchschnittstemperatur.

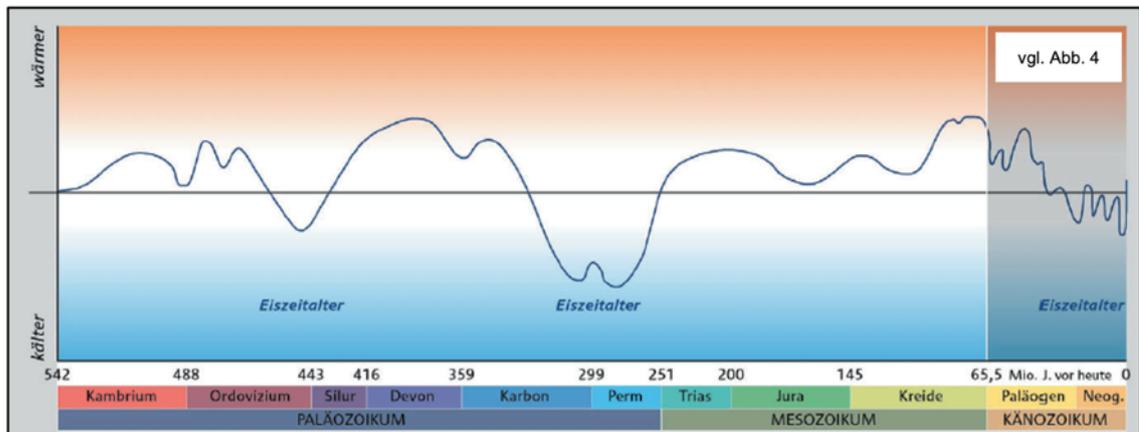


Abb. 3: Globale Temperaturen der letzten 542 Mio. Jahren [4]

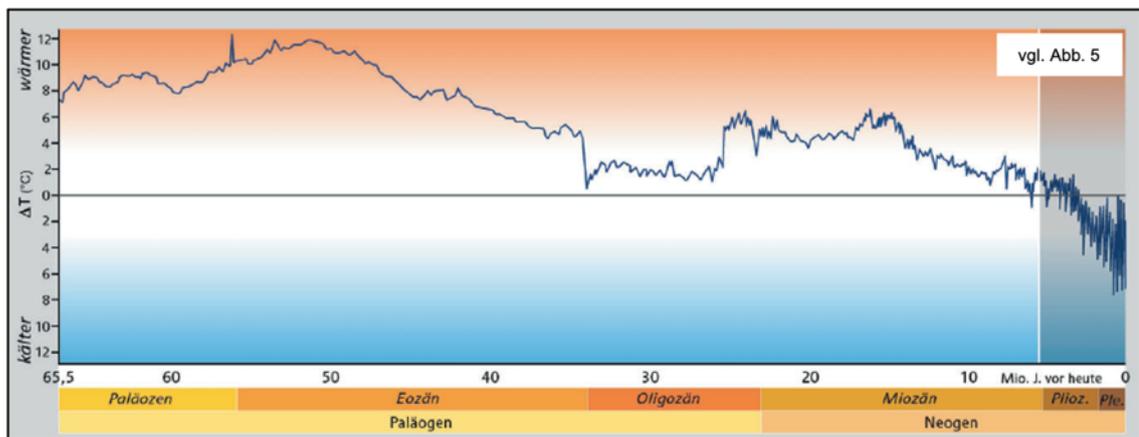


Abb. 4: Globale Temperaturen der letzten 65,5 Mio. Jahren [4]

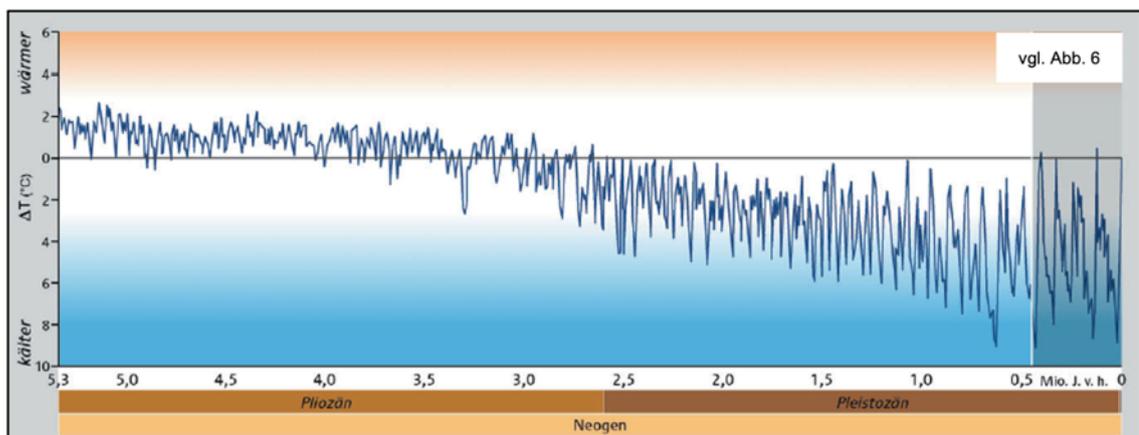


Abb. 5: Globale Temperaturen der letzten 5,3 Mio. Jahren [4]

Die Abbildungen auf Seite 8 basieren allesamt auf den Auswertungen von Tiefseesedimentdaten. Abb. 3 (Seite 8) zeigt, dass es in der Paläoklimatologie drei bekannte Eiszeitalter gibt.

In Abb. 6 sind die Temperaturänderungen in der Antarktis aus den letzten 420.000 Jahren dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass es im letzten Eiszeitalter zu drei Kaltzeiten sowie drei kurzandauernde Warmzeiten kam. Des Weiteren ist zu sehen, dass die globale Durchschnittstemperatur der letzten circa 8.000 Jahre ähnlich dem Mittelwert der heutigen Durchschnittstemperatur ist.

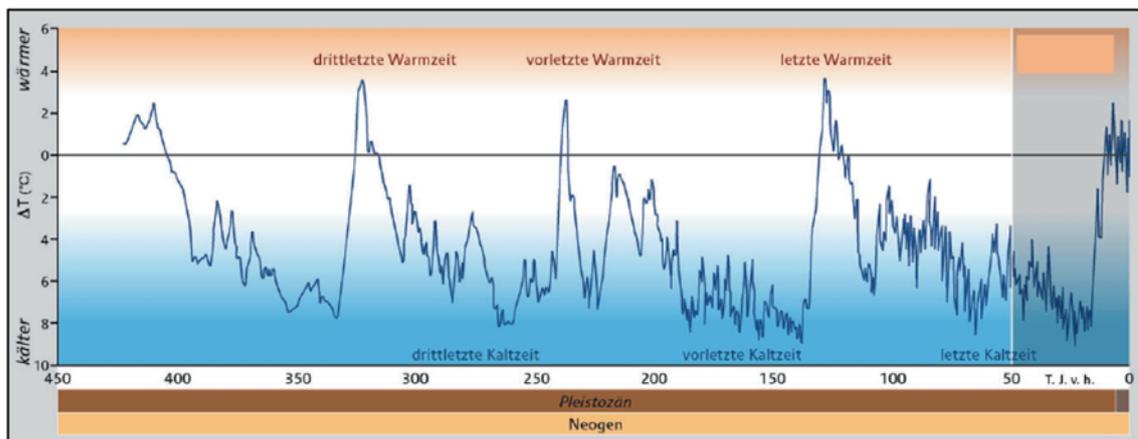


Abb. 6: Temperaturen der Antarktis der letzten 0,42 Mio. Jahren [4]

Analog zu dem globalen Temperaturverlauf der Erdgeschichte verhält sich die dazugehörige natürliche Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Erdatmosphäre. Der CO₂-Gehalt auf der Erde betrug zu Lebzeiten der Dinosaurier 1000 bis 1500 ppm. Infolge des Meteoriteneinschlags und des anschließenden Eiszeitalters kam es während der Kaltzeiten zu Eisbildungen in den Polargebieten wodurch sich der natürliche CO₂-Gehalt in der Atmosphäre auf circa 300 ppm signifikant reduzierte. Demgemäß sind die arktischen und vor allem die antarktischen Vereisungen große Kohlenstoffdioxidspeicher.

In Abb. 7 (Seite 10) ist die CO₂-Konzentration der Atmosphäre im Verlauf der vergangenen 800.000 Jahre dargestellt. Die Messdaten zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Temperaturänderungen zu gleicher Zeit in Abb. 6.

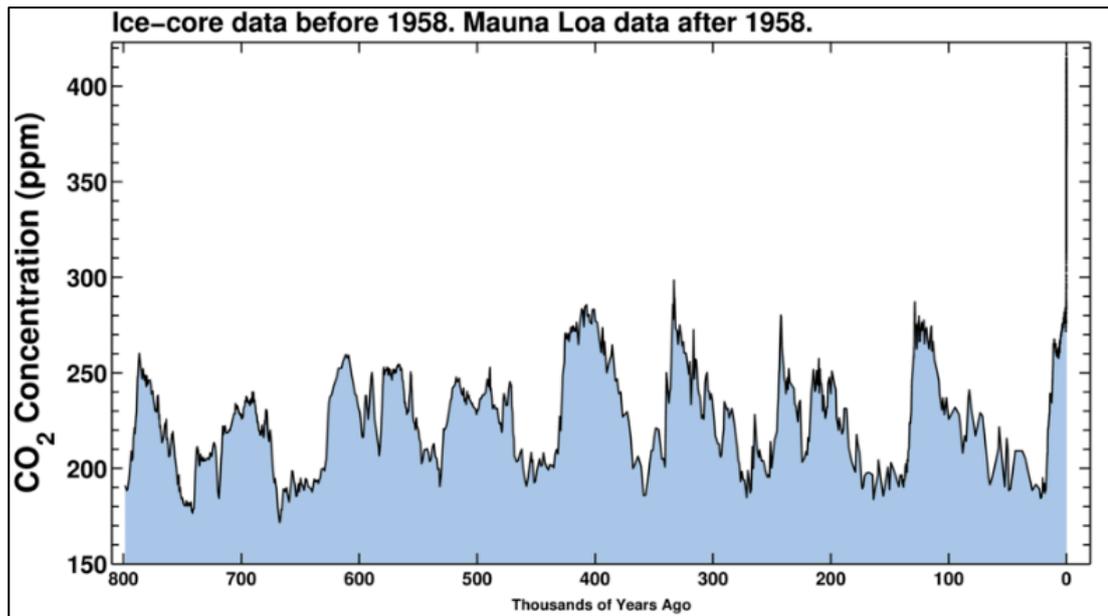


Abb. 7: CO₂-Konzentration der letzten 0,8 Mio. Jahren [5]

2.2.2 Einfluss der Industriellen Revolution

Der Grundstein der Industriellen Revolution wurde zu Beginn des 18. Jahrhunderts in Großbritannien gelegt. Innovative Persönlichkeiten Englands erreichten beachtliche technische Fortschritte. Abraham Darby produzierte in seinem Hochofen in der Stadt Coalbrookdale Eisen bester Qualität, indem er anstatt der gebräuchlichen Holzkohle Koks verwendete. Thomas Newcomen erfand die erste Dampfmaschine, deren Zweck das Abpumpen von Wasser aus Bergwerken war. James Watt revolutionierte die Dampfmaschine und meldete diese 1769 zum Patent an. Durch die Verwendung eines separaten Kondensators und Zylinders konnte Watt 60% an Steinkohle einsparen. Die verbesserten Dampfmaschinen wurden unter anderem als Antrieb für Spinnmaschinen genutzt. Die revolutionären Erfindungen führten zu einer Explosion der Produktivität in Großbritannien, wodurch dieses in Forschung und Entwicklung gegenüber dem restlichen Europa ein halbes Jahrhundert Vorsprung hatte. Aufgrund dessen gilt Großbritannien als Mutter der Industrie [vgl. [6]].

Die Industrielle Revolution wird als eine der tiefgreifendsten Umstellungen der Menschheitsgeschichte gesehen. Der signifikante Fortschritt der Technik führte zu einer Verschiebung der Arbeit von der Landwirtschaft in die Industrie.

Infolgedessen wuchsen die Städte enorm. London erreichte um 1800 die Millionengrenze und war dazumal die größte Stadt Europas. Im Vergleich dazu hatte Berlin zu dieser Zeit ungefähr 100.000 Einwohner*innen. Das rasante Wachstum führte zu sozialen Problemen. Die Arbeiter*innen wurden in Kasernen mit miserablen Bedingungen untergebracht. Kinder und Frauen mussten für eine geringerer Bezahlung ebenso hart arbeiten, wie die Männer. Zudem waren die Arbeitsbedingungen in den Fabriken extrem hart. Die menschenverachtenden Bedingungen führten oft zu blutigen Aufständen. Daraufhin versuchte der Staat die Bedingungen zu verbessern und die Not zu lindern. Diese Versuche waren die ersten Anfänge des späteren Sozialstaats [vgl. [6]].

Mit dem Fortschritt der Technik veränderte sich auch der Lebensstil der Menschen. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurden die ersten Eisenbahnstrecken hergestellt. Die mit fossilen Energieträgern (Kohle) betriebenen Dampflokomotiven förderten weltweit das wirtschaftliche Wachstum. Dementsprechend entwickelten sich Technologien jeglicher Art bis heute stetig weiter. In vielerlei Hinsicht wurde während dieser Zeit auf den Umweltschutz vergessen. Durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern (Kohle, Öl und Gas) in großen Mengen stiegen die Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre stark an. In Abb. 8 ist der markante Anstieg der CO₂-Konzentration seit Beginn der Industriellen Revolution dargestellt.

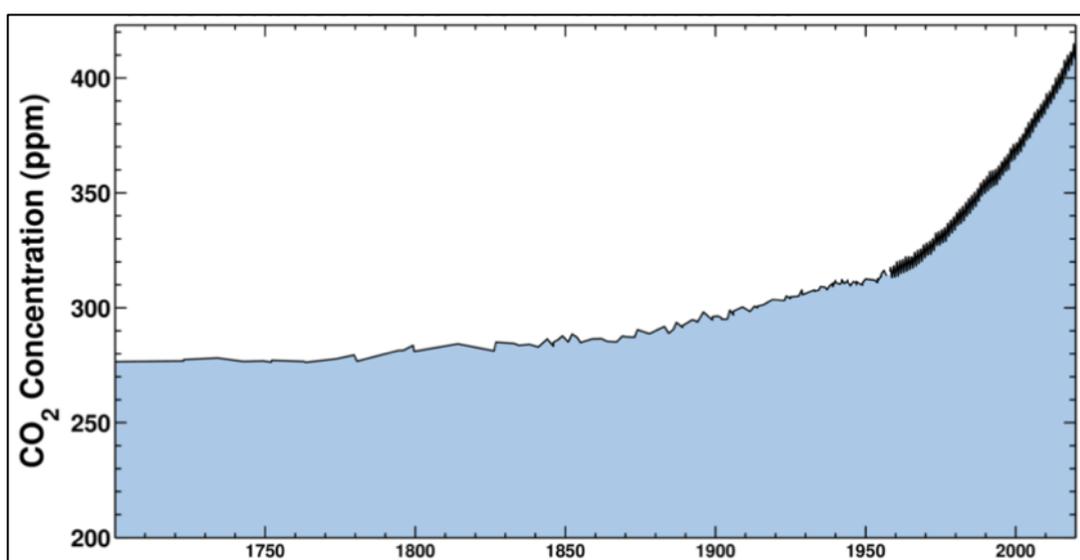


Abb. 8: Anstieg der CO₂-Konzentration seit dem 18. Jahrhundert [5]

Der steigende Kohlenstoffdioxidgehalt in der Atmosphäre hat aber mehrere Ursachen. Beispielweise ist die Abholzung der Wälder eine impulsive Ursache für steigende Treibhausgasemissionen. Jährlich werden rund 30 Millionen Hektar Waldfläche gerodet. Das entspricht in etwa der Landesfläche von Deutschland. Bäume nehmen Kohlenstoffdioxid auf und wirken daher klimaregulierend. Aufgrund der großflächigen Rodung geht diese Wirkung verloren und große Mengen an gespeichertem Kohlenstoffdioxid werden freigesetzt. [vgl. [3]].

Der wachsende Wohlstand und damit verbundene Lebensstil in den westlichen Ländern führt zu einem Überkonsum an tierischen Nahrungsmitteln. Infolgedessen wird der Ausbau der Viehzucht vorangetrieben, welcher sich negativ auf die Treibhausgasbilanz auswirkt. Kühe und Schafe produzieren während der Verdauung ihres Futters sehr große Mengen an Methan. Zudem werden für die Tiere Weiden und Feldfutter benötigt. Hierfür werden die Wiesen mit stickstoffhaltigem Dünger gedüngt, um den Futterertrag zu steigern. Die Verwendung von solchem Dünger erhöht aber die Stickstoffoxidemissionen [vgl. [3]].

Durch den fortschreitenden Ausbau der Nutzung von Energien aus erneuerbaren Quellen können jedoch in der Energiegewinnung die Treibhausgasemissionen erheblich reduziert werden.

2.2.3 Folgen der Erderwärmung

Die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels betreffen sämtliche Regionen weltweit. Die steigende globale Durchschnittstemperatur bringt Veränderungen mit sich, welche für einige Lebewesen existenzbedrohend sind. Vor allem das Schmelzen des Eises in den Polargebieten und der daraus resultierende Anstieg des Meeresspiegels sind mit immer höher werdenden Temperaturen unaufhaltbar. Neben der Tatsache, dass viele Tiere in der Arktis und Antarktis dadurch ihren natürlichen Lebensraum verlieren, führt der steigende Meeresspiegel zu weltweiten Überflutungen und Erosionen in den Küstengebieten. Es schmelzen jedoch nicht nur die polaren Eiskappen, sondern auch sämtliche Gletscher. Dadurch wird der Meeresspiegelanstieg zusätzlich beschleunigt. Am deutlichsten sieht man den Effekt der globalen Erderwärmung

in der Arktis. Die folgenden Abbildungen zeigen das Schwinden des Meereises am Nordpol. Abb. 9 zeigt die Arktis vor 40 Jahren, Abb. 10 zeigt die Arktis im Jahr 2015 und Abb. 11 (Seite 14) zeigt, wie die Arktis in 40 Jahren aussehen wird.



Abb. 9: Die Arktis vor 40 Jahren [1]



Abb. 10: Die Arktis im Jahr 2015 [1]



Abb. 11: Die Arktis in 40 Jahren [1]

Aufgrund der fortschreitenden Eisschmelze ist der Anstieg des Meeresspiegels unausweichlich. Der Meeresspiegel lag während des letzten Eiszeitalters in etwa 125 m unter dem heutigen Meeresspiegel. Als Vergleich hierzu lag der Meeresspiegel vor dem letzten Eiszeitalter – also zu einer Zeit, in der die Erde eisfrei war – rund 80 m über dem heutigen Meeresspiegel. Daraus ergibt sich zwischen dem Eiszeitalter und einer vollkommenen eisfreien Erde eine Schwankung in der Meeresspiegelhöhe von 205 m [vgl. [7]].

Der Weltklimarat „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC), sowie andere Forscher*innen untersuchten den kontinuierlichen Anstieg des Meeresspiegels. Die Experten*innen prognostizieren aufgrund der Ergebnisse aus Forschungsarbeiten eine Erhöhung des Meeresspiegels bis 2050 von 30 bis 50 cm. Zum Ende des 21. Jahrhunderts wird ein globaler Anstieg des Meeresspiegels zwischen 80 bis 180 cm erwartet. In Abb. 12 (Seite 15) ist die prognostizierte Zunahme des Meeresspiegels dargestellt. Die Abbildung zeigt die Bandbreite der Ergebniswerte zwischen den unterschiedlichen Wissenschaftler*innen. Diese Schwankungen ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Studien und Szenarien, welche als Basis für diese Prognosemodelle verwendet wurden [vgl. [7]].

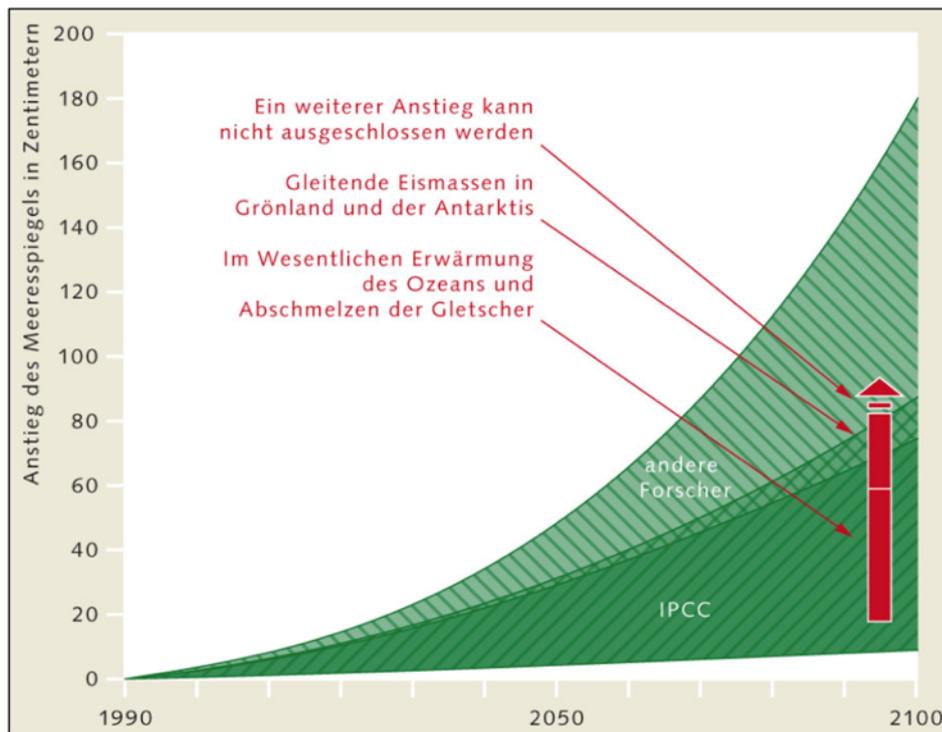


Abb. 12: Prognostizierter Anstieg des Meeresspiegels [7]

Der steigende Meeresspiegelanstieg verursacht in vielen Metropolen und Städten Überflutungen. Unter anderem werden in den nächsten Jahrzehnten in Europa Städte wie zum Beispiel London, Amsterdam, Rotterdam, Bremen und Venedig überflutet [vgl. [8]]. Abb. 13 zeigt die Überflutungsflächen zwischen England und dem Festland an der Nordsee zufolge des Meeresspiegelanstiegs bis 2050.



Abb. 13: Überflutungsflächen (rot) an der Nordsee im Jahr 2050 [8]

Abhängig von den geographischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen kann die Überflutung manch einer betroffenen Stadt durch die Errichtung von technischen Bauwerken wie zum Beispiel Dämmen vermieden beziehungsweise hinausgezögert werden.

Die Überflutungen infolge des globalen Meeresspiegelanstiegs treffen vor allem östlich gelegene Metropolen und Städte wie zum Beispiel Mumbai, Kalkutta, Dhaka, Bangkok, Hanoi und Shanghai [vgl. [8]]. Aufgrund mangelnder wirtschaftlicher Kapazitäten mancher Länder können notwendige Hochwasserschutzprojekte nicht realisiert werden. Infolgedessen werden einige Städte bis 2050 größtenteils überflutet sein.

Aufgrund der Erderwärmung werden neben dem Anstieg des Meeresspiegels auch extreme Wetterereignisse immer häufiger. Die erhöhten Starkregenereignisse führen zu vielen Hochwässern, welche zum Teil große Schäden in den Städten und der Landwirtschaft verursachen. In Abb. 14 ist eines der stärksten Starkregenereignisse der vergangenen Jahre in der Stadt Graz zu sehen. Die Regenmassen erreichten innerhalb weniger Stunden mit circa 160 l/m^2 über ein Zehntel des mittleren Jahresniederschlags von Graz. [vgl. [9]].



Abb. 14: Starkregenereignis vom 16. April 2018 in Graz [9]

Des Weiteren kommt es durch die globale Erderwärmung zu einer Verschiebung der Klimazonen. In Süd- und Mitteleuropa steigt die Anzahl der Hitzewellen, wodurch markante Änderungen in Fauna und Flora verursacht werden. Abb. 15 zeigt die Entwicklung der Hitzetage für Österreich. Ein Hitzetag ist ein Tag an dem die Außentemperatur einen Wert von größer gleich 30°C erreicht [vgl. [3]].

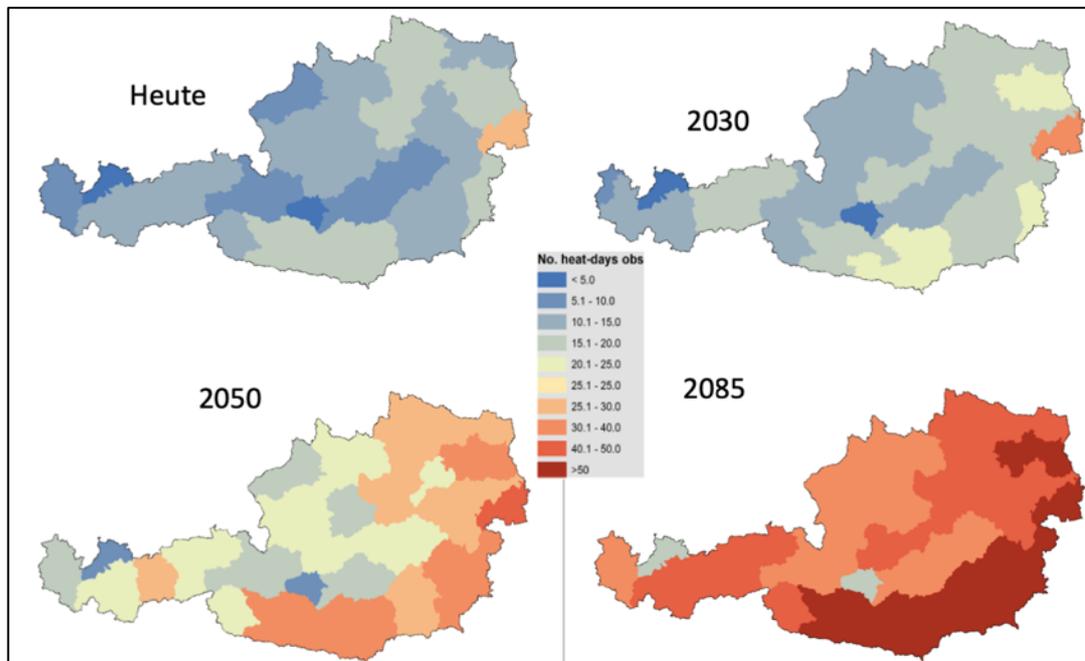


Abb. 15: Hitzetage Szenario Österreich [10]

Während die Anzahl der Hitzetage in Österreich steigt, werden die Eistage – Tageshöchsttemperatur unter 0°C – immer weniger. Tab. 1 (Seite 18) zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Eistage pro Jahr in verschiedenen Städten Österreichs. Grundsätzlich verringert sich die Anzahl der Eistage im ganzen Land. Der Rückgang variiert zwischen 6% und 43%, abhängig von den geographischen Bedingungen der jeweiligen Stadt. In Innsbruck ist zwischen den beiden Betrachtungszeiträumen 1961 bis 1990 und 1991 bis 2020 die durchschnittliche Anzahl der Eistage von 19,2 auf 11 Tage gesunken. Damit verzeichnet Innsbruck den größten Rückgang Österreichs. Graz verzeichnet den zweitgrößten Rückgang Österreichs. Die durchschnittlichen Eistage verringerten sich von 25,3 auf 14,9 Tage. Das entspricht einen Rückgang von 43%. Den geringsten dokumentierten Rückgang hat der Ort Schoppernau mit 6%. Die durchschnittlichen Eistage in Schoppernau (Vorarlberg) reduzierten sich von 35,2 auf nur 33,2 Tage.

Tab. 1: Durchschnittliche Eistage pro Jahr in Österreich [vgl. [11]]

Durchschnittliche Eistage pro Jahr			
Stadt, Bundesland	1961-1990	1991-2020	Änderung
Innsbruck, Tirol	19,2	11	-43 %
Graz, Steiermark	25,3	14,9	-41%
Lienz, Tirol	37	23,5	-36 %
Klagenfurt, Kärnten	37,3	26,5	-29 %
Linz, Oberösterreich	24,2	17,5	-28 %
Hohe Warte, Wien	24,2	18,2	-25 %
Salzburg, Salzburg	24,5	19,2	-22 %
Bad Ischl, Oberösterreich	24,1	19,2	-20 %
Eisenstadt, Burgenland	23,4	19,9	-15 %
Schopfernau, Vorarlberg	35,2	33,2	-6 %

2.3 Entwicklung der Klima- und Energieziele

Um in naher Zukunft nicht das volle Ausmaß der Folgen der globalen Erderwärmung spüren zu müssen, versuchen Politiker*innen weltweit den Klimawandel mit nationalen Maßnahmen zu verlangsamen. Hierfür müssen die durch uns Menschen verursachten Treibhausgase mithilfe von Strategien schnellstmöglich reduziert werden.

2.3.1 Beginn des Umdenkens – Start der Klimapolitik

Im Februar 1979 wurde die erste Weltklimakonferenz in **Genf** abgehalten. Besorgte Wissenschaftler*innen erkannten die Problematik der steigenden

Treibhausgase früh und bestreben daher die Klimakonferenz. Das Allgemeine Interesse an der ersten Weltklimakonferenz war mäßig. Viele Menschen hielten den Klimawandel zu dieser Zeit für unwichtig. Dennoch schaffte es die Weltorganisation für Meteorologie Wissenschaftler*innen, Politiker*innen und Behördenvertreter*innen aus 53 Nationen zusammenzuführen. Am Ende der ersten Weltklimakonferenz wurde eine UN-Umweltschutz-Akte unterzeichnet. Infolgedessen wurde das Ziel – Verständnis für den Klimawandel zu generieren – erfüllt und ein Impuls für fortschreitende Klimakonferenzen geschaffen [vgl. [12]].

Neun Jahre nach der ersten Weltklimakonferenz folgte 1988 die zweite Konferenz in **Toronto**. Veranlasst durch diese Klimakonferenz wurde der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) gegründet. Die Aufgabe der IPCC ist es wissenschaftliche Ergebnisse aus verschiedenen Forschungsbereichen zu bündeln und daraus den aktuellen Wissensstand darzustellen. Nur zwei Jahre nach dieser Weltklimakonferenz präsentierte die IPCC ihre ersten Ergebnisse. Sie verdeutlichten den klar steigenden Trend von Treibhausgasen in der Erdatmosphäre. [vgl. [13]].

1992 fand in **Rio de Janeiro** die nächste große Klimakonferenz statt. Die Konferenz führte zur Gründung der „Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen“ (UNFCCC). Die Nationen beschlossen die Reduzierung ihrer Treibhausgasemissionen auf Basis einer freiwilligen Selbstverpflichtung, da Länder wie zum Beispiel die USA keine bindenden Verpflichtungen eingehen wollten. Hierbei sollen die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2000 auf jene Werte aus dem Jahr 1990 reduziert werden [vgl. [13]].

Kurze Zeit Später wurde 1997 in **Kyoto** das erste verbindliche Klimaabkommen vereinbart. Die bis dahin in Rio beschlossenen Klimavereinbarungen wurden erweitert. Als Referenzwert für die Reduzierung der Emissionen wurden weiterhin die Werte aus dem Jahr 1990 herangezogen. [vgl. [13]].

Der Weltklimarat IPCC meldete sich 2001 erneut zu Wort und bestätigte wiederum die missliche Lage des Anstiegs der Treibhausgasemissionen. Damit einher ging die Feststellung, dass der Mensch definitiv zur Beschleunigung

beiträgt! Unmittelbar nach Veröffentlichung des Berichtes kündigte die USA ihre Unterstützung des Kyoto-Protokolls. Die USA verursachte zu dieser Zeit ein Viertel der weltweiten Treibhausgasemissionen. Daher war der Ausstieg der USA ein großer Rückschlag. Die Fortsetzung des Kyoto-Abkommens wurde dennoch ein paar Monate später auf der Weltklimakonferenz in **Bonn** ratifiziert [vgl. [13]].

2005 trat das 1997 vereinbarte Kyoto-Protokoll in Kraft. Insgesamt ratifizierten 191 Länder die erste Verpflichtungsperiode von 2008 bis 2012. Bis auf die USA unterzeichneten alle großen Industrieländer das Abkommen. Infolgedessen verpflichteten sich die Nationen zu einer Reduzierung der wichtigsten Treibhausgasemissionen wie Kohlenstoffdioxid, Methan und fluoridierte Gase um mindestens fünf Prozent unter dem Emissionsniveau von 1990 [vgl. [13, 14]].

Die Klimakonferenzen in **Posen** 2008 und **Kopenhagen** 2009 brachten keine wesentlichen Erweiterungen der bisher vereinbarten Klimaabkommen. [vgl. [13]].

Die Weltklimakonferenz in **Cancun** 2010 führte zu einigen Änderungen in der Klimapolitik. Zum einen beschlossen die Vereinten Nationen, dass die globale Erderwärmung im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten nicht höher als zwei Grad Celsius sein darf. Zum anderen wurde sowohl eine konsequentere Überwachung als auch Überprüfung der Treibhausgasemissionen sowie eine Berichterstattung über die Finanzierung der Klimaschutzmaßnahmen vereinbart. Des Weiteren wurde die Errichtung von Klimaschutzfonds zur Verstärkung der Unterstützung für Entwicklungsländer veranlasst. Den Entwicklungsländern wurde zudem eine Anschubfinanzierung von knapp 30 Milliarden US-Dollar von den Industrieländern bereitgestellt [vgl. [15]].

In **Durban** 2011 wurden die Vereinbarungen von Cancun konkretisiert und verbessert. Die Weltklimakonferenz in **Doha** 2012 führte zu Unstimmigkeiten in der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Abkommens. Nur wenige Industrieländer akzeptierten die damit verbundenen Verpflichtungen. Große Industrieländer wie zum Beispiel Russland, Kanada und Japan verweigerten die neuen Konditionen der zweiten Verpflichtungsperiode (2013 bis 2020) zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen [vgl. [13, 15]].

Bei den Klimakonferenzen in **Warschau** 2013 und **Lima** 2014 wurden die Staaten aufgefordert ihre Beiträge für das neugeplante, weltweite Klimaschutzabkommen von Paris transparent und verständlich darzulegen. Zudem wurden die Grundzüge für die Vereinbarungen des Übereinkommens und Maßnahmen vor 2020 vereinbart [vgl. [15]].

Nach erhöhtem Druck von Aktivisten*innen führte die Weltklimakonferenz in **Paris** 2015 zu einem neuen Klimaabkommen. Das Übereinkommen ist die erste umfassende, rechtsverbindliche Klimaschutzvereinbarung seit Beginn der Klimapolitik. Im bisherigen Kyoto-Abkommen waren nur einige Industrieländer verpflichtet gewesen die Emissionen zu senken. Die knapp 190 Vertragsparteien – mitunter auch die USA – einigten sich darauf, dass die Erderwärmung deutlich unter der zwei Grad Marke gehalten werden muss. Infolgedessen beschlossen die Staaten mit zusätzlichen Maßnahmen die globale Erderwärmung auf maximal 1,5°C zu begrenzen. Dafür mussten die Länder umfassende nationale Aktionspläne für die Reduzierung ihrer Treibhausgasemissionen vorlegen. Um die Fortschritte der langfristigen Klimaziele bewerten zu können, wurde die Transparenz über die Umsetzung der Klimaschutzziele erweitert: Die Staaten werden in einem Intervall von fünf Jahren zusammenkommen und ihre Fortschritte über die Reduktion der Treibhausgasemissionen präsentieren [vgl. [15]].

Nach ausreichender Ratifizierung der Mitgliedsstaaten konnte das Pariser Übereinkommen am 04.November 2016 in Kraft treten. Nur kurze Zeit später am 01.Juni 2017 verkündete der amerikanische Präsident den Austritt aus dem Pariser Klimaschutzabkommen. Infolgedessen sabotierte er die in Paris 2015 vereinbarten Klimaschutzbemühungen maßgeblich, da die USA nach China für die zweitgrößten Treibhausgasemissionen verantwortlich sind. Das Austreten aus dem Klimaschutzabkommen führte zu viel Kritik innerhalb der Vereinigten Staaten von Amerika. Demzufolge wurden die Klimaschutzziele innerhalb des Landes in viele Städten und Regionen dennoch weiterverfolgt. Nach der Präsidentschaftswahl im vergangenen Herbst führte der neue Präsident Joe Biden am 20.Januar 2021 als eine seiner ersten Amtshandlungen die Rückkehr zum Pariser Klimaabkommen aus [vgl. [13, 15]].

Bei den Weltklimakonferenzen von 2016 bis 2019 in **Marrakesch**, **Bonn**, **Katowice** und **Madrid** wurden konkretere Maßnahmen und Projekte vorgestellt, um die in Paris beschlossene maximale Erderwärmung von 1,5°C einzuhalten. Unter anderem präsentierten die Länder ihre Langzeitstrategien für die Reduzierung der Treibhausgase. Zudem bekräftigten die Industrieländer die Förderung der Entwicklungsländer bezüglich der Klimafinanzierungen [vgl. [16]].

Die für 2020 geplante 26. Weltklimakonferenz in **Glasgow** wurde aufgrund der aktuellen Covid19-Pandemie auf den November 2021 verschoben.

2.3.2 Klimaschutzziele der Europäischen Union

Die Europäische Union (EU) ist seit Anbeginn des 21. Jahrhunderts ein Vorbild in Sachen Umweltschutz und Klimawandel. Im Jahr 2015 wurden nur 10% der weltweiten Treibhausgasemissionen von Mitgliedstaaten der EU verursacht. Folglich ist die EU eine der größten Volkswirtschaften mit den geringsten Emissionen pro Kopf. Um die Klimapolitik stetig weiter zu verbessern und den Anforderungen des Pariser Klimaabkommens gerecht zu werden, hat die EU bereits Langzeitstrategien bis zum Jahr 2050 definiert [vgl. [15]].

Die wichtigsten Strategien der Europäischen Union für eine nachhaltige Zukunft sind folgende [15]:

- Klima- und Energiepaket 2020
- Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030
- Fahrplan für eine CO₂-arme Wirtschaft bis 2050

Die bereits abgelaufenen Ziele von 2020 sowie die Ziele bis 2030 und 2050 werden in den folgenden Abschnitten kurz thematisiert.

2.3.2.1 Klima- und Energieziele 2020

Die Kernziele des Klima- und Energiepakets wurden bereits 2007 festgelegt und 2009 als Rechtsvorschriften erlassen. Die Basisstrategie für ein intelligenteres,

nachhaltigeres und integrativeres Europa 2020 wurde damit geschaffen. Die drei wichtigsten Ziele des Pakets sind [15]:

- Senkung der Treibhausgasemissionen um 20% (gegenüber dem Emissionsniveau von 1990)
- Anteil der Energie aus erneuerbaren Quellen von 20%
- Steigerung der Energieeffizienz um 20%

Zur Einhaltung der oben genannten Ziele wurden in sämtlichen Bereichen Maßnahmen gesetzt. Eines der wichtigsten Instrumente zur kostenwirksamen Verringerung der Treibhausgasemissionen ist das Emissionshandelssystem (EHS). Durch Einführung des EHS sollen die Emissionen von Großkraftwerken, Industrieanlagen und dem Luftverkehr bis 2020 im Vergleich zu 2005 um 21% gesenkt werden. Das Emissionshandelssystem deckt 45% der Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union ab [vgl. [15]].

Die Treibhausgasemissionen zufolge der Wirtschaftszweige, welche nicht dem EHS unterliegen wie zum Beispiel Wohnungsbau, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Verkehr mit Ausnahme des Luftverkehrs werden mithilfe von nationalen Emissionsminderungszielen gesenkt. Dazu hat sich die Europäische Union mit ihren Mitgliedsstaaten auf Lastenteilungsvereinbarungen geeinigt. Mithilfe der Lastenteilungsvereinbarungen werden die restlichen 55% der gesamten Treibhausgasemissionen innerhalb der EU reduziert. Die Länder müssen abhängig von ihrem Wohlstand unterschiedliche, verbindliche Jahresziele erreichen und über ihre verursachten Emissionen der Kommission Rechenschaft ablegen [vgl. [15]].

Neben der Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist die Erhöhung der Energiegewinnung aus regenerativen Energien ein weiteres Ziel. Hierfür wurden wiederum nationale Ziele mit den Mitgliedsstaaten vereinbart. Die Ziele unterscheiden sich je nach Ausschöpfungspotential der klimaneutralen Energien und wirtschaftlichen Möglichkeiten der einzelnen Länder. Zum Beispiel musste Malta die Nutzung seiner klimaneutralen Energien auf 10% erweitern, während Schweden aufgrund seines großen Potentials eine Erhöhung auf 49% erreichen

musste. Infolgedessen soll der Anteil der regenerativen Energien in der EU von 9,8% im Jahr 2010 auf 20% im Jahr 2020 gesteigert werden [vgl. [15]].

In den letzten Jahren zeigte sich ein klar positiver Trend im Sinne des Rückgangs der Treibhausgasemissionen innerhalb der EU. Folglich lohnte sich die konsequente Arbeit der Klimapolitik. Daten zu den Treibhausgasemissionen des Jahres 2020 wurden noch nicht ausgewertet. Jedoch zeigen die aktuell bekannten Daten der vergangenen Jahre, dass die Zielvorgaben für das Jahr 2020 mit sehr großer Wahrscheinlichkeit erreicht wurden.

In Abb. 16 sind die Entwicklungen der Treibhausgasemissionen seit 1990, die Prognose bis 2035 sowie die Ziele 2020 und 2030 der EU graphisch dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Treibhausgasemissionen bereits im Jahr 2018 um 23,2% gegenüber dem Referenzniveau von 1990 reduziert wurden. Des Weiteren zeigen die Prognosen, dass das 2030 Ziel unter Einhaltung der aktuellen Klimaregelungen nicht erreicht wird. Die weiteren Maßnahmen zum Erreichen der 2030 Ziele werden im Abschnitt 2.3.2.2 (Seite 26) thematisiert.

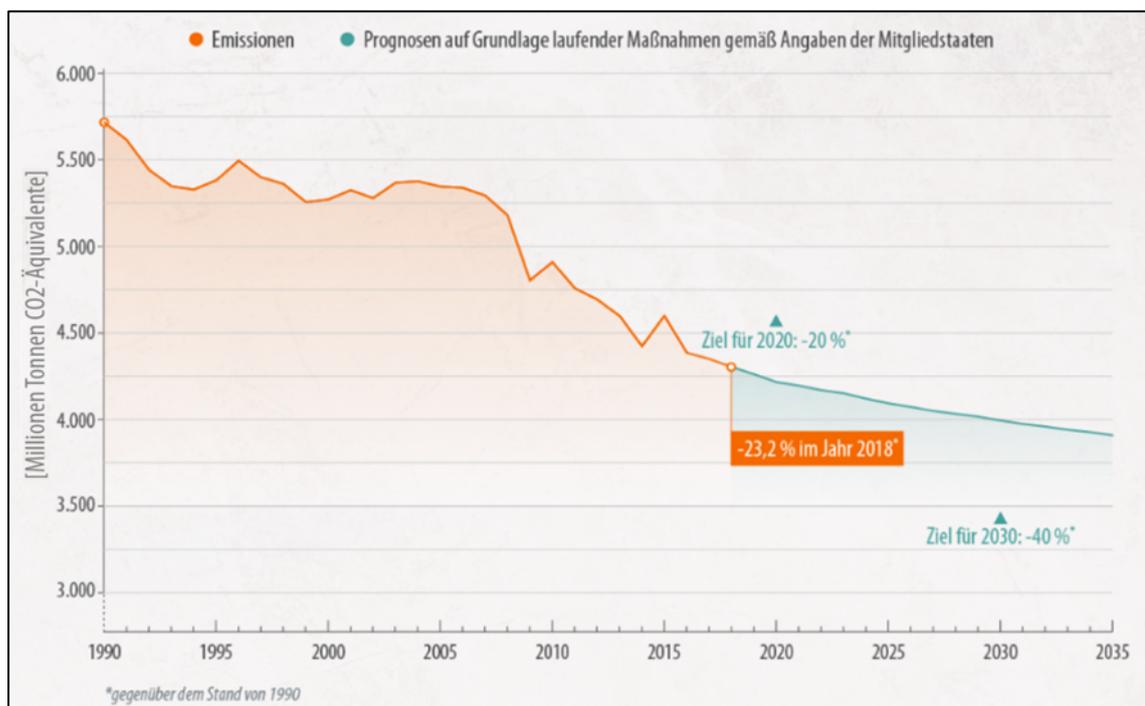


Abb. 16: Emissionen, Prognosen und Ziele der EU [17]

Abb. 17 (Seite 25) zeigt die Treibhausgasemissionen Österreichs von 1990 bis 2018, sowie das zu erreichende Klimaziel 2020 und ursprüngliche Kyoto-Ziel.

Im Gegensatz zur EU erreichte Österreich 2018 nicht das vordefinierte Ziel für 2020. Der Grund hierfür ist der neuerliche Anstieg der Treibhausgasemissionen von 2014 bis 2017. Niedrige Preise für fossile Energieträger und fehlende effektive Klimaschutzmaßnahmen führten zu diesem Anstieg der Treibhausgasemissionen [vgl. [18]].

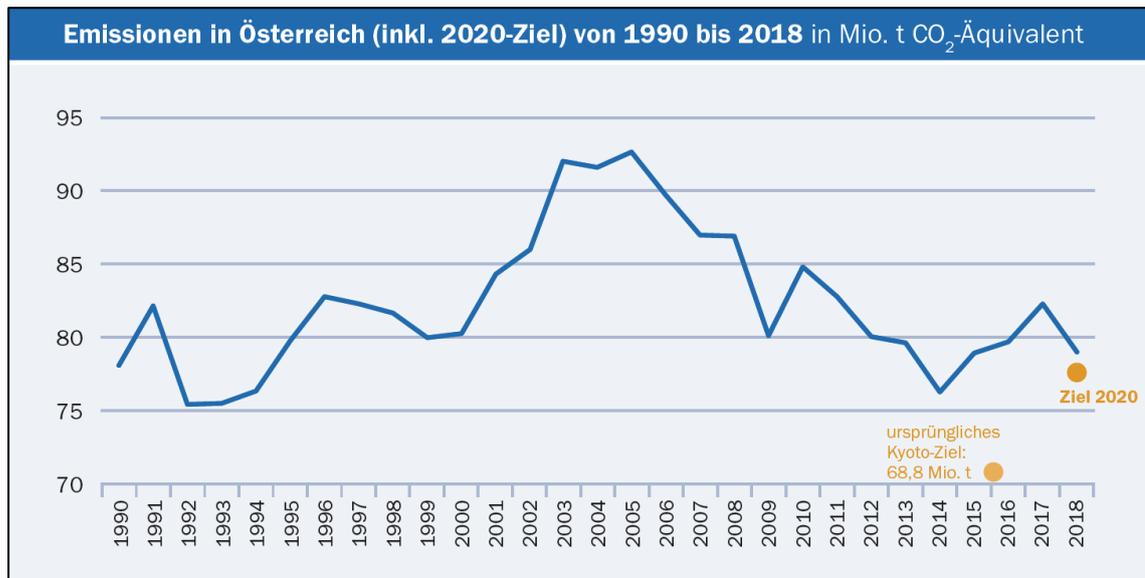


Abb. 17: Emissionen von Österreich von 1990 bis 2018 inkl. 2020 Ziel [19]

In der folgenden Abbildung sind die Anteile der erneuerbaren Energien der 28 EU-Mitgliedsstaaten im Jahr 2018 mit dem Ziel der Europäischen Union für 2020 gegenübergestellt.

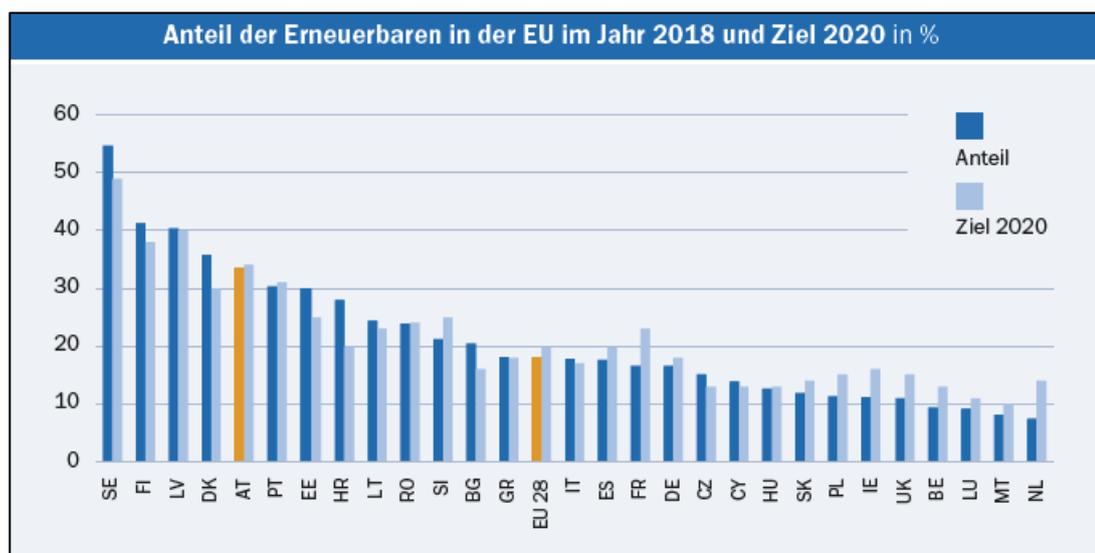


Abb. 18: Erneuerbaren Energien 2018 und 2020 Ziel in der EU [19]

Abb. 18 (Seite 25) zeigt, dass die Ziele der klimaneutralen Energien für 2020 im Jahr 2018 von Österreich sowie der EU noch nicht erreicht wurden.

2.3.2.2 Klima- und Energieziele bis 2030 und 2050

Die Klima- und Energieziele von 2020 und 2030 sollen die Basis für ein klimaneutrales Europa bis 2050 schaffen. Demnach sind die Ziele für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 folgende [15]:

- Senkung der Treibhausgasemissionen um 40% (gegenüber dem Emissionsniveau 1990)
- Anteil der Energie aus erneuerbaren Quellen von 32%
- Steigerung der Energieeffizienz um 32,5%

Um ein noch größeres Ausrufezeichen in der Klimapolitik zu setzen prüft die Kommission weitere Maßnahmen, um den Emissionsrückgang bis 2030 von 40% auf mindestens 55% anzuheben. Im Rahmen des europäischen Green Deals sollen bis Juni 2021 Legislativvorschläge bekannt gegeben werden. Die ehrgeizigen Klimaziele sollen unter anderem mit einer Überarbeitung des bewährten Emissionshandelssystem (EHS) und einer höheren Lastenteilung erreicht werden.

Die Klimapolitik von Europa schlägt – mit der Vorgabe bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu sein – definitiv die richtige Richtung ein, um den anthropogenen Klimawandel zu verlangsamen. Mithilfe realistischer technologischer Lösungen, Maßnahmen in der Industriepolitik und Eigenverantwortung der Bürger*innen soll gemeinsam ein klimaneutraler Kontinent geschaffen werden [vgl. [15]].

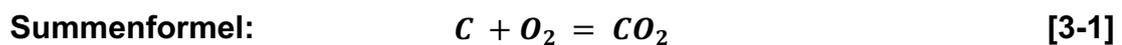
Die ehrgeizigen klimapolitischen Ziele der Europäischen Union scheinen auch Einfluss auf andere Nationen zu zeigen. So kündigte die USA unter der Führung von Joe Biden an, ebenfalls bis 2050 klimaneutral zu werden.

3. Kohlenstoffdioxid CO₂ – Allgemein

3.1 Eigenschaften

Kohlenstoffdioxid (auch Kohlendioxid genannt) gehört zu der Gruppe der Kohlenstoffoxide, welche allesamt chemische Bindungen aus Kohlenstoff und Sauerstoff sind. Neben Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonoxid gehören auch die weniger bekannten Bindungen Kohlenstoffsboxid und das instabile Kohlenstofftrioxid zur Gruppe der Kohlenstoffoxide [vgl. [20]].

Das Kohlenstoffdioxid-Molekül besteht aus drei Atomen: einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen. Die Atome sind linear angeordnet, wobei sich das Kohlenstoffatom in der Mitte befindet. Daraus ergibt sich für Kohlenstoffdioxid folgende Summenformel [vgl. [20]]:



mit: C – Kohlenstoff (Molare Masse: 12,011 g/mol)

O₂ – Sauerstoff (Molare Masse: 31,998 g/mol)

CO₂ – Kohlenstoffdioxid (Molare Masse: 44,009 g/mol)

Unter den natürlichen Umgebungsbedingungen existiert CO₂ im gasförmigen und festen Aggregatzustand. Kohlenstoffdioxid in gasförmiger Form ist farb- und geruchslos und natürlicher Bestandteil der Erdatmosphäre. Die aktuelle Konzentration liegt bei circa 400 ppm (entspricht 0,04%). Ab einer Temperatur kleiner als -78,5°C ändert sich der Aggregatzustand direkt von gasförmig zu fest. Das heißt, Kohlenstoffdioxid kondensiert unter den normalen Umgebungsbedingungen (Atmosphärendruck 1013 mbar) nicht und geht direkt vom gasförmigen in den festen Zustand über. Dieser Prozess wird auch Sublimation genannt. In fester Form ist Kohlenstoffdioxid als Trockeneis bekannt. Trockeneis wird hauptsächlich zur Kühlung verwendet (zum Beispiel in der Medizintechnik). Ab einem Druck von 5,19 bar (entspricht 51,9 mWS) und einer Temperatur von -56,6°C wird CO₂ flüssig [vgl. [21]]. Das Phasendiagramm von Kohlenstoffdioxid

ist in Abb. 19 dargestellt. Die Abbildung zeigt die zuvor beschriebenen Bedingungen für die unterschiedlichen Aggregatzustände von CO₂.

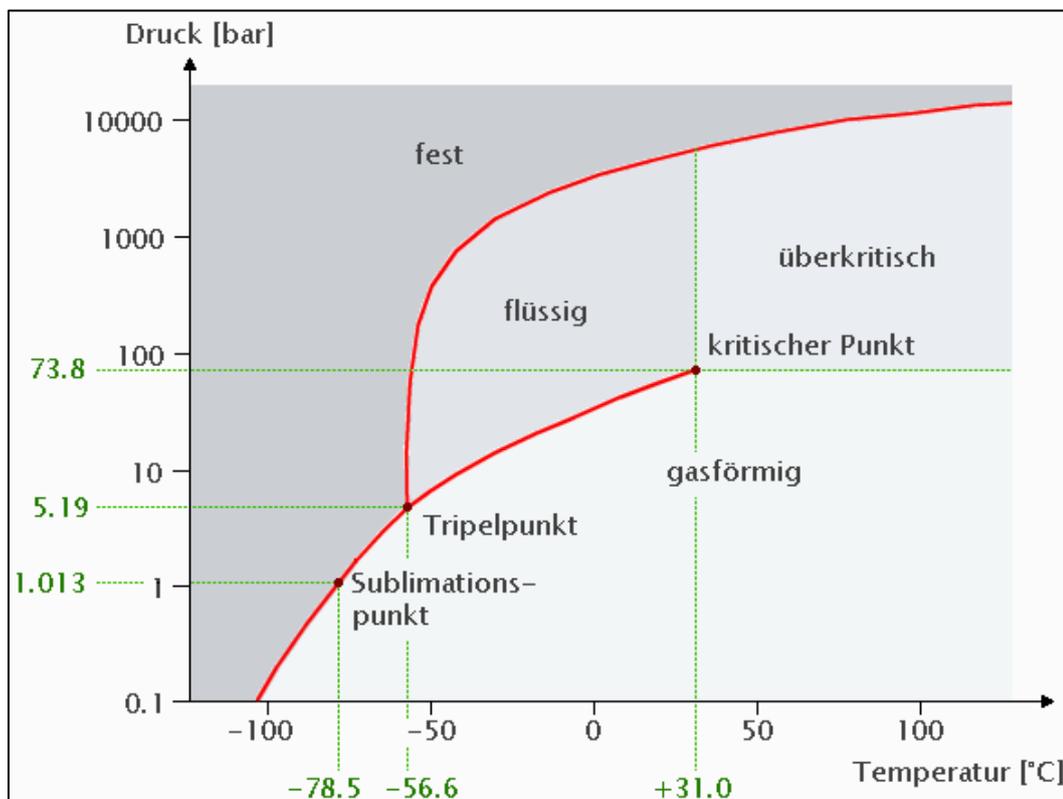


Abb. 19: Phasendiagramm Kohlenstoffdioxid [22]

3.2 Natürlicher Kohlenstoffkreislauf

Der natürliche Kohlenstoffkreislauf berücksichtigt jeglichen Austausch von Kohlenstoff auf der Erde. In Abb. 20 (Seite 29) ist der Kohlenstoffkreislauf mit seinen wichtigsten Teilschritten schematisch dargestellt. Die Teilschrittnummern werden in Reihenfolge ihrer Nummerierung kurz beschrieben [vgl. [23]]:

1. Teilschrittnummer Eins ist die **Assimilation**, welche die Kohlenstoffdioxidaufnahme der Pflanzen aus der Atmosphäre beschreibt. Pflanzen entnehmen das Kohlenstoffatom aus ihrer Umgebungsluft und produzieren Sauerstoff.
2. Der Sauerstoff wird im Luftgemisch von Lebewesen eingeatmet (**Respiration**), wobei beim Ausatmen CO₂ als Kuppelprodukt entsteht.

Insgesamt gibt es auf der Erde 75 Milliarden (10¹⁵) Tonnen Kohlenstoff, wovon 99,8% in Gesteinen (vor allem Kalkstein) gespeichert sind. Die Ozeane sind die zweitgrößten Kohlenstoffspeicher mit 38.000 Milliarden Tonnen (entspricht 0,05% des Gesamtvorkommens). Der drittgrößte Kohlenstoffspeicher ist der Boden mit rund 1.580 Milliarden Tonnen [vgl. [25]].

In Summe ist die natürliche Netto-Bilanz von Kohlenstoff – ohne Berücksichtigung der anthropogenen Emissionen – in etwa null. Die vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen, sowie Emissionen aus Naturereignissen wie zum Beispiel Vulkanausbrüchen und Waldbränden verändern jedoch das natürliche Gleichgewicht. Diese beiden zusätzlichen Quellen verursachen einen Überschuss an Kohlenstoffdioxid, weshalb die natürliche CO₂-Konzentration in der Atmosphäre stetig ansteigt (Abb. 8, Seite 11).

Die globalen anthropogenen Kohlenstoffemissionen betragen jährlich ungefähr 8 Milliarden Tonnen. Das entspricht infolge der Bindung mit Sauerstoff (O₂) in etwa 30 Milliarden Tonnen CO₂. Aufgrund der Diffusion zwischen Oberflächen-gewässern und der Atmosphäre werden jährlich knapp 90 Milliarden Tonnen Kohlenstoff ausgetauscht [vgl. [26]]. Im Vergleich zu diesen enormen Summen scheint der Kohlenstoffausstoß des Menschen mit ungefähr acht Milliarden Tonnen pro Jahr relativ gering. Nichtsdestotrotz sind die vom Menschen verursachten Emissionen bezogen auf die gesamte Kohlenstoffbilanz zu hoch.

3.3 Emissionen verschiedener Brennstoffe und Äquivalenz der THG

Unterschiedliche Brennstoffe verursachen unterschiedliche Kohlenstoffdioxid-emissionen. Grundsätzlich sind die spezifischen Emissionen von Gasen geringer als von Kohle. Die Verbrennung von Holz ist CO₂-neutral sofern nur so viel Holz verbrannt wird, wie auch wieder nachwächst. Holz emittiert – unabhängig davon, ob es verrottet oder verbrannt wird – so viel CO₂, wie es im Laufe seines Lebens bindet. Demnach ist die Verwendung von Biomasse Kohlenstoffdioxidneutral, hingegen wirkt sich die Rodung von Wäldern negativ auf die CO₂-Emissionen aus. In Tab. 2 (Seite 31) sind die CO₂-Emissionen verschiedener Brennstoffe dargestellt.

Tab. 2: CO₂-Emissionen verschiedener Brennstoffe [vgl. [27]]

Spezifische Kohlenstoffdioxidemissionen verschiedener Brennstoffe		
Brennstoff	Emissionen [kgCO₂/kWh]	Emissionen [kgCO₂/GJ]
Holz*	0	0
Holz**	0,39	109,6
Braunkohle	0,36	101,2
Steinkohle	0,34	94,6
Heizöl	0,28	77,4
Diesel	0,27	74,1
Rohöl	0,26	73,3
Kerosin	0,26	71,5
Benzin	0,25	69,3
Raffineriegas	0,24	66,7
Flüssiggas	0,23	63,1
Erdgas	0,20	56,1

* bei nachhaltiger Nutzung

** bei nicht-nachhaltiger Nutzung ohne Wiederaufforstung

Die Treibhausgasemissionen werden in vielen Literaturen in CO₂-Äquivalente umgerechnet, um die gesamte Klimaschädlichkeit einfacher ausdrücken zu können. Infolgedessen werden die Auswirkungen der weniger emittierten Treibhausgase (THG) wie Methan, Lachgas und fluorierte Gase äquivalent in Kohlenstoffdioxid umgerechnet. Die Umrechnungsfaktoren sind folgende [28]:

- CO₂ = 1 CO₂eq
- Methan = 28 CO₂eq
- Distickstoffoxid (Lachgas) = 265 CO₂eq
- Fluorierte Gase = 100-24.000 CO₂eq

4. Wasserkraft als Energiequelle

Die Wasserkraft ist in Österreich und zahlreichen weiteren Ländern auf der ganzen Welt die wichtigste erneuerbare Energiequelle. Die Energiegewinnung mithilfe des Wassers erfolgt praktisch emissionsfrei.

Die Nachhaltigkeit von Energiequellen kann mithilfe der Kennziffer des Erntefaktors dargestellt werden. Der Erntefaktor beschreibt die eingesetzte Energie im Verhältnis zur gesamten bereitgestellten Energieausbeute über die Lebensdauer der Kraftwerksanlage [vgl. [29]]. In Abb. 21 ist der Erntefaktor aus mehreren Anlagen dargestellt.

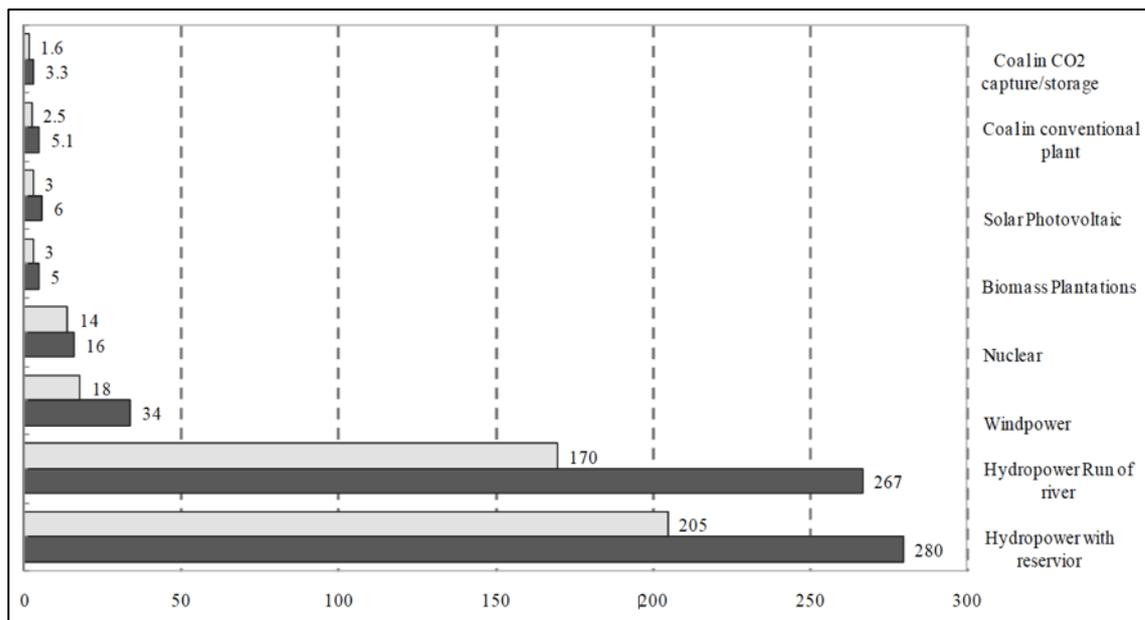


Abb. 21: Erntefaktor in der Energieerzeugung [29]

Die Abbildung zeigt die eindrucksvolle Energiebereitstellung aus Wasserkraftwerken. Der Erntefaktor der Wasserkraft entspricht in etwa dem zehnfachen Erntefaktor von Windkraftanlagen beziehungsweise dem fünfzigfachen Erntefaktor von Photovoltaikanlagen.

4.1 Wasserwirtschaftliche Kennzahlen – Allgemein

4.1.1 Energieumwandlung und Leistung

Wasserkraftwerke nutzen die Energie des fließenden Wassers, um elektrische Energie zu erzeugen bzw. Strom zu produzieren. Die potentielle Energie wird in kinetische Energie umgewandelt. Dabei werden Turbinen durchströmt, welche wiederum Generatoren antreiben. Die Menge der nutzbaren Energie ist unter anderem von den Parametern der potentiellen Energie abhängig. Die Formel der potentiellen Energie lautet:

$$E_P = m * g * h \quad [2-1]$$

mit: E_P – potentielle Energie [Nm]

m – Masse [kg]

g – Erdbeschleunigung [$m*s^{-2}$] = 9,81 [$m*s^{-2}$]

h – Höhendifferenz der Wasserspiegel = Fallhöhe [m]

Aufgrund der steilen Sohlgefälle der Flüsse in Österreich und der Anwendung von technischen Bauwerken und Maßnahmen können größere Höhendifferenzen zwischen Oberwasser und Unterwasser erreicht werden. Je größer die Höhendifferenz (Fallhöhe), desto höher ist die nutzbare Energie. Infolgedessen können auch Kleinwasserkraftwerke mit geringeren Abflüssen ökonomisch klimaneutrale Energie erzeugen. Unter Zuhilfenahme der Dichte ρ und des Volumenstroms Q kann der Massenstrom \dot{m} wie folgt ermittelt werden:

$$\dot{m} = \rho * Q \quad [2-2]$$

mit: \dot{m} – Massenstrom [kg/s]

ρ – Dichte Wasser [kg/m^3]

Q – Volumenstrom [m^3/s]

Allgemein: Leistung = Arbeit pro Zeit. Durch Einsetzen des Massenstroms in die Gleichung der potentiellen Energie erhält man die Leistung des Kraftwerks. Zudem berücksichtigt man bei einer Energieumwandlung die Effizienz der Umwandlung durch den Wirkungsgrad η . Der Wirkungsgrad η gibt an, wie viel der zugeführten Energie in nutzbare Energie umgewandelt wird. Bei Wasserkraftwerken ist der Wirkungsgrad mit ungefähr 90% allgemein sehr hoch. Die Formel zur Berechnung der Leistung lautet:

$$N = \rho * Q * g * h * \eta \quad [2-3]$$

mit: N – Leistung [W]

ρ – Dichte Wasser [kg/m³]

Q – Volumenstrom [m³/s]

g – Erdbeschleunigung [m*s⁻²] = 9,81 [m*s⁻²]

h – Fallhöhe [m]

η – Wirkungsgrad [-]

4.1.2 Jahresarbeitsvermögen

Das Arbeitsvermögen beziehungsweise die Regelarbeit eines Kraftwerks entspricht der elektrischen Arbeit, die im Laufe eines Zeitabschnittes erzeugt werden kann [vgl. [30]]. Infolgedessen ist das Jahresarbeitsvermögen (meist in GWh) neben der Engpassleistung ein weiterer wichtiger Indikator für die Klassifizierung einer Wasserkraftanlage.

4.2 Wasserkraftwerkstypen

Wasserkraftwerke können in der Regel in Laufwasserkraftwerke und Speicherbeziehungsweise Pumpspeicherkraftwerke unterteilt werden (abgesehen von Sonderformen).

4.2.1 Laufwasserkraftwerke

Bei Laufwasserkraftwerken kommt es im Allgemeinen zu keiner weiteren Speicherung des Wassers. Infolgedessen nutzen die Laufwasserkraftwerke das ständige, natürliche Wasserdargebot des Flusses und erzeugen rund um die Uhr Strom. Durch die permanente Erzeugung von Strom eignen sich Laufwasserkraftwerke besonders zur Deckung der Grundlast. Charakteristisch für diesen Kraftwerkstyp sind große Wassermengen und geringe Fallhöhen. Des Weiteren wird bei Laufwasserkraftwerken zwischen Flusskraftwerken und Ausleitungskraftwerken unterschieden. Bei Ersterem wird das Wasserkraftwerk direkt in den Flusslauf gebaut (Abb. 22) [vgl. [31]].



Abb. 22: Flusskraftwerk Gmunden, eigene Aufnahme

Bei Ausleitungskraftwerken ist das Kraftwerk bis zu mehreren Kilometern von der Wehranlage entfernt (Abb. 23, Seite 36).

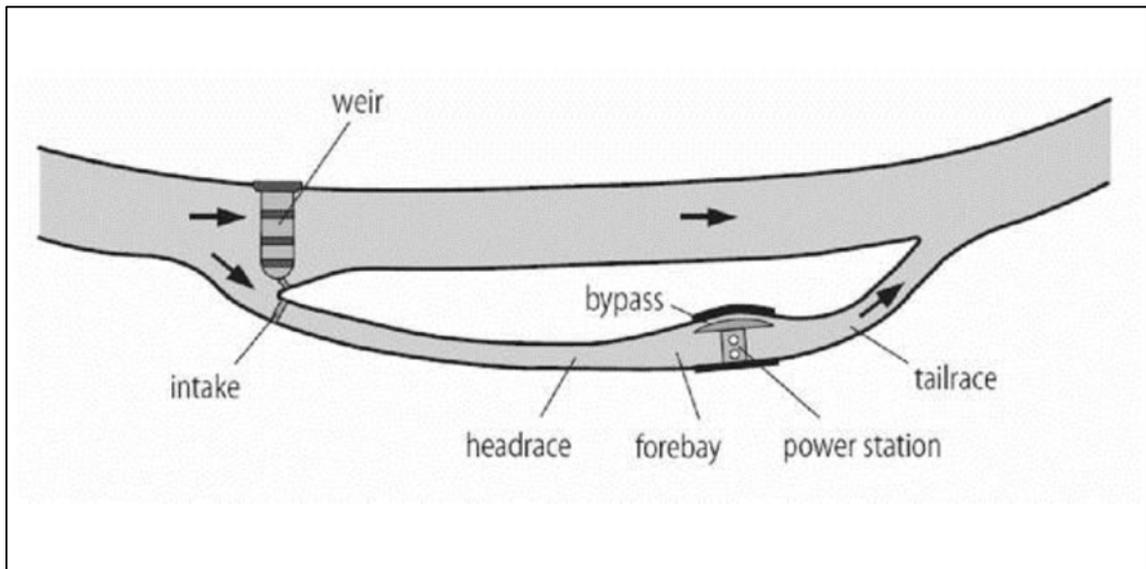


Abb. 23: Schematische Anordnung eines Ausleitungskraftwerkes [31]

4.2.2 Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke

Speicherkraftwerke sammeln das Wasser aus natürlichen Zuflüssen und speichern es. Dabei wird zwischen den Speichergrößen Tages-, Wochen-, Jahres und Mehrspeicher unterschieden. Der Speicher ist entweder natürlich oder künstlich geschaffen. Künstliche Speicher sind jene, deren Aufstau nur durch technische Bauwerke wie Staumauern, Talsperren oder Dämme ermöglicht wird. Speicherkraftwerke wurden konzipiert, um die elektrische Stromversorgung jederzeit sicherzustellen. Die potentielle Energie kann auf Abruf in elektrische Energie umgeformt werden. Das bedeutet, dass Speicherkraftwerke Strom zur Deckung der Spitzenlastzeiten produzieren während Laufwasserkraftwerke zur Deckung der Grundlast dienen. Die charakteristischen Merkmale der Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke sind geringe Wassermengen und große Fallhöhen.

Pumpspeicherkraftwerke sind Speicherkraftwerke mit zusätzlichem Pumpbetrieb. Dementsprechend funktioniert das Prinzip des Speichers und der Triebwasserführung äquivalent zu den Speicherkraftwerken. Der Pumpbetrieb ermöglicht es, das Wasser vom unteren Reservoir in das obere Reservoir zu befördern, um den Speicher zu befüllen. Der Füllprozess geschieht vorwiegend während der Nacht, da zu diesem Zeitraum meist ein Überschuss an elektrischer

Energie vorhanden ist. Pumpspeicherkraftwerke werden angewandt, wenn die natürlichen Zuflüsse nicht ausreichen, um den Speicher zur Gänze zu befüllen [vgl. [31]].

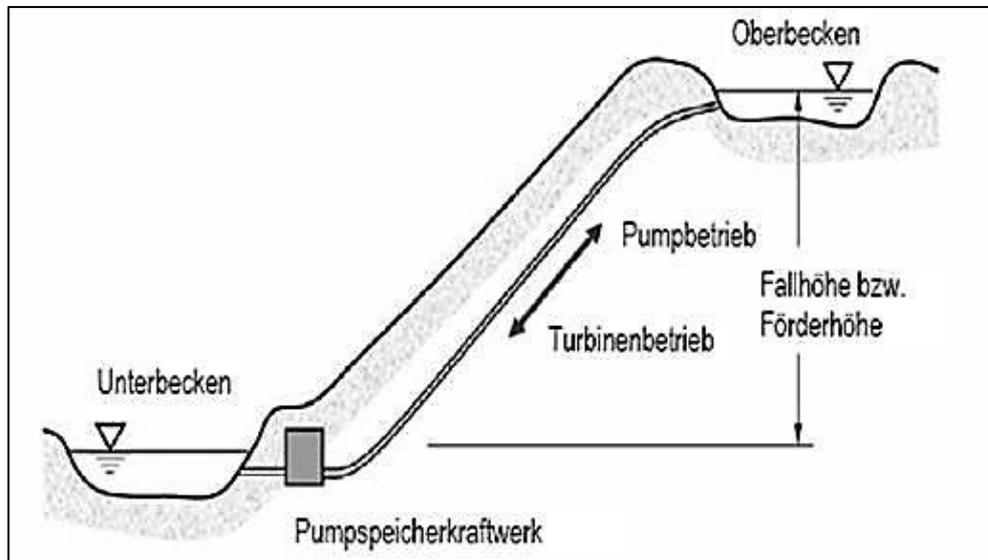


Abb. 24: Prinzipskizze eines Pumpspeicherkraftwerks [31]

4.3 Wasserkraft in Österreich und Europa

4.3.1 Wasserkraft in Österreich

Die Wasserkraft ist die wichtigste Energiequelle Österreichs. Rund zwei Drittel des österreichischen Stromes werden mit Hilfe der Wasserkraft erzeugt. Grund für die hohe Nutzung der Wasserkraft in Österreich ist vor allem die hervorragende Topographie des Landes. Die vielen Berge und Flüsse stellen die Grundlage zur Erzeugung von nachhaltiger, klimaneutraler Energie aus Wasser dar. Ein wesentlicher, geschichtlicher Indikator für die begünstigte topographischen Lage Österreichs ist die Nationalhymne, welche mit den Worten „Land der Berge, Land am Strome“ eingesungen wird.

In Österreich gibt es rund 4000 Kleinwasserkraftwerke und 159 Mittel- und Großwasserkraftwerke. Die Mittel- und Großwasserkraftwerke unterteilen sich in 93 Laufwasser- und 66 Speicherkraftwerke [vgl. [32, 33]].

In Tab. 3 ist die Entwicklung der Engpassleistung der österreichischen Wasserkraftwerke seit dem 21. Jahrhundert aufgelistet. Das Wachstum der installierten Engpassleistung im Betrachtungszeitraum von 19 Jahren beträgt 25,1%.

Tab. 3: Leistungsentwicklung österreichischer Wasserkraftwerke [vgl. [19]]

Engpassleistung Wasserkraftwerke [MW]			
Jahr	Laufkraftwerke	Speicherkraftwerke	Summe
2000	5.256	6.407	11.664
2005	5.347	6.491	11.837
2010	5.412	7.520	12.932
2015	5.662	7.987	13.650
2019	5.795	8.803	14.597

Abb. 25 zeigt die Entwicklung des gesamten österreichischen Kraftwerkparcs seit Beginn der Nachkriegszeit. Die Energiegewinnung aus Wind, Photovoltaik und Geothermie konnte in den letzten Jahren einen steilen Zuwachs verzeichnen.

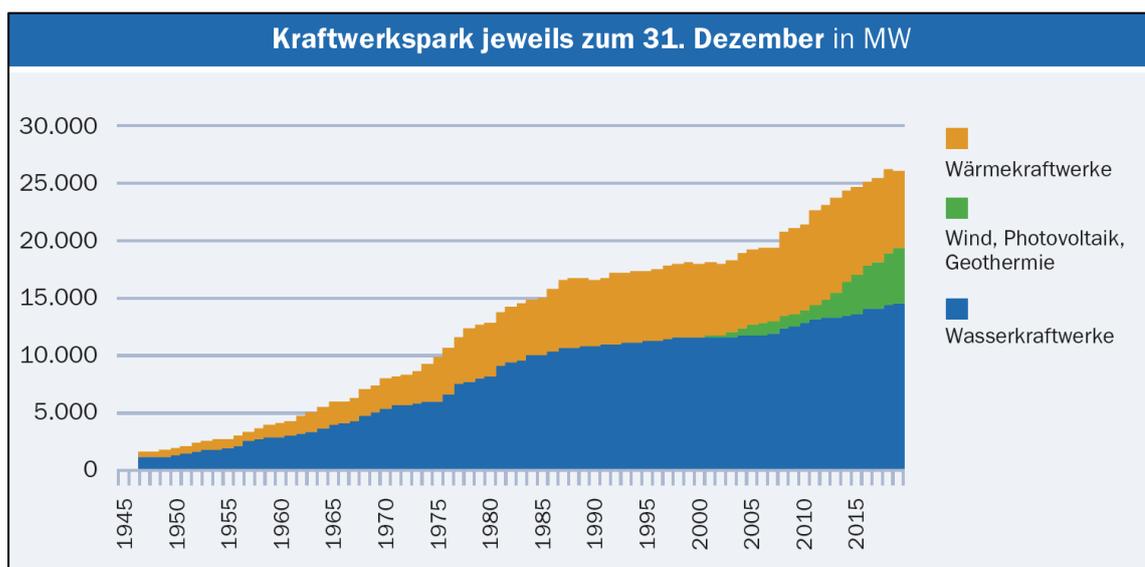


Abb. 25: Entwicklung Kraftwerkspark Österreich [19]

Die Gesamtbruttostromerzeugung von Österreich betrug im Kalenderjahr 2019 73.460 GWh. Davon wurden 44.187 GWh (60,2%) elektrische Energie aus Wasserkraftwerken gewonnen. Die Laufwasserkraftwerke produzierten rund zwei Drittel der Energie aus Wasserkraft. Die restliche Energie aus Wasserkraft wurde mithilfe von Speicherkraftwerken erzeugt. In Tab. 4 werden die Zahlen der Gesamtbruttostromerzeugung aus der Wasserkraft übersichtlich dargestellt. Die Anteile der anderen Primärenergieträger sind in Abschnitt 4.4.1 (Seite 44) ersichtlich. Allgemein werden Wasserkraftwerke bis zu einer Engpassleistung von 10 MW als Kleinkraftwerke bezeichnet. Aus diesem Grund werden die Kleinwasserkraftwerke jeweils separat in Tab. 4 dargestellt. Durch die Trennung der Kleinwasserkraftwerke ist zu sehen, dass diese zur Gesamtstromerzeugung 2019 beachtliche 8,2% (13,5% der Wasserkraft) beitrugen.

Tab. 4: Bruttostromerzeugung Wasserkraft 2019 [vgl. [19]]

Bruttostromerzeugung der Wasserkraft von Österreich 2019				
Wasserkraftwerke		[GWh]	Absolut [%]	Relativ [%]
Laufkraftwerke	bis 10 MW	5.417	7,4	12,3
	über 10 MW	24.534	33,4	55,5
Speicherkraftwerke	bis 10 MW	554	0,8	1,2
	über 10 MW	13.628	18,6	31,0
Summe Wasserkraftwerke		44.187	60,2	100,0
Gesamtbruttostromerzeugung		73.460	100	/

4.3.2 Wasserkraft in Europa

Wie in Österreich ist auch in Europa die Wasserkraft die wichtigste regenerative Energiequelle (siehe Kapitel 4.4.2 Strommix Europäische Union, Seite 45). Die installierte Engpassleistung aller Wasserkraftwerke in Europa beträgt in Summe 221.802 MW (ohne Berücksichtigung der Eurasischen Länder Russland und Türkei). Die installierte Engpassleistung der 27 europäischen Mitgliedsstaaten beträgt nur 151.624 MW. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Wasserkraft-

Nationen wie zum Beispiel Norwegen und Schweiz keine EU-Mitgliedstaaten sind und dementsprechend nicht berücksichtigt werden. Daraus folgend ist die installierte Engpassleistung der EU circa zehnmal größer als jene von Österreich. Die Daten sind in Tab. 5 nochmals zusammengefasst.

Tab. 5: Wasserkraft Europa und EU – Installierte Leistung 2019 [vgl. [34]]

Wasserkraft in Europa und EU – Leistung 2019 [MW]	
Europa	221.802
EU-27	151.624
Russland/Türkei	53.935/28.503

In Abb. 26 sind die Länder Europas sortiert nach der installierten Engpassleistung dargestellt. Berücksichtigt wurden nur jene Länder mit einer Kraftwerksleistung größer 2.000 MW. Die Abbildung zeigt, dass Österreich absolut betrachtet mit einer Engpassleistung von 14.597 MW den siebtgrößten Wasserkraftwerkspark in Europa aufweist. Die größte installierte Engpassleistung besitzt Norwegen mit 32.592 MW.

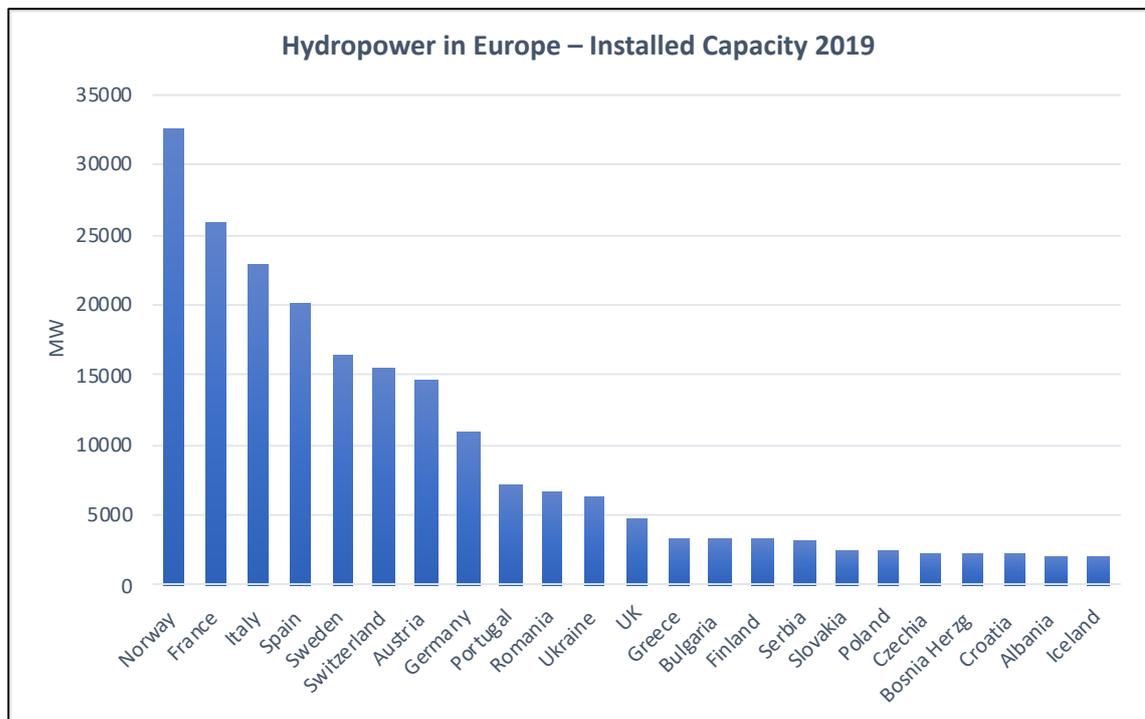


Abb. 26: Wasserkraft Europa – Installierte Leistung 2019 [vgl. [34]]

Wird die installierte Leistung der Länder in Europa durch die Landesfläche dividiert, so erhält man als Referenzwert die Leistung pro Fläche. Angesichts dieser Betrachtungsweise besitzt Österreich mit 174 kW/km² die drittgrößte installierte Leistung pro Fläche in Europa.

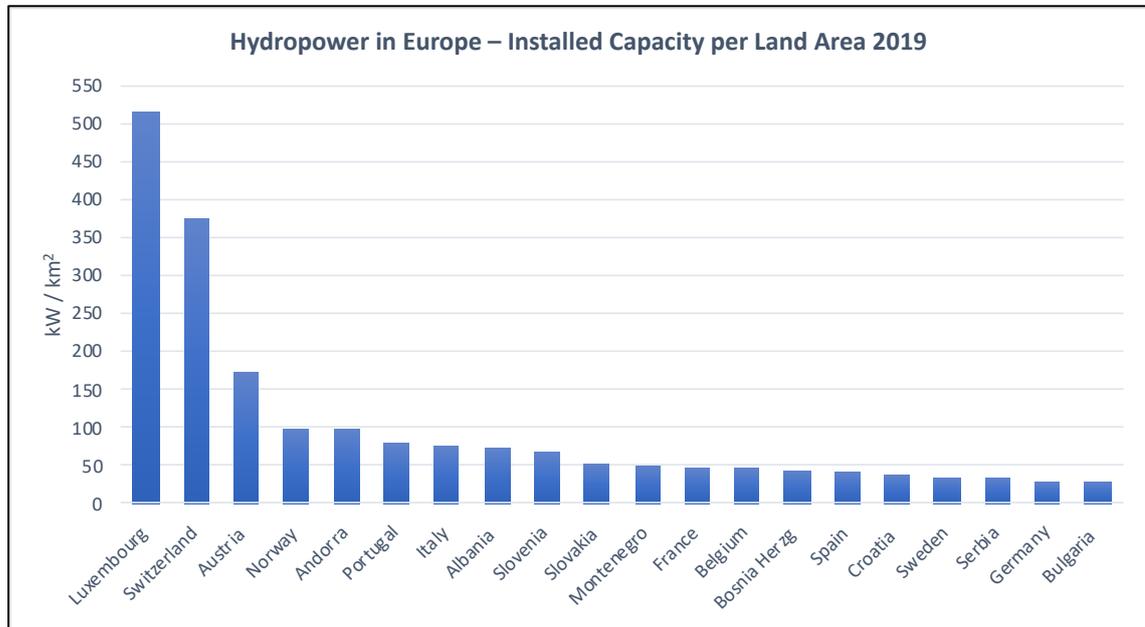


Abb. 27: Wasserkraft Europa – Installierte Leistung/Fläche [vgl. [34, 35]]

Mithilfe von Wasserkraftwerken wurden in Europa im Jahr 2018 insgesamt 613.125 GWh elektrische Energie erzeugt. Die Eurasischen Länder Russland und Türkei wurden hierbei nicht berücksichtigt. Gemeinsam produzierten die beiden Länder 254.179 GWh Strom aus Wasserkraft. Die Wasserkraftwerke innerhalb der Europäischen Union produzierten in Summe 371.832 GWh elektrische Energie. In Tab. 6 werden die Zahlen der Stromerzeugung in Europa und der EU dargestellt.

Tab. 6: Wasserkraft Europa und EU – Bruttostromerzeugung 2018 [vgl. [36]]

Wasserkraft in Europa und EU – Stromerzeugung 2018 [GWh]	
Europa	613.125
EU-27	371.832
Russland/Türkei	194.241/59.938

In Europa leistete Norwegen 2018 mit eindrucksvollen 139.509 GWh den höchsten Beitrag an elektrischer Energie aus der Wasserkraftnutzung. Österreich erzeugte insgesamt 41.216 GWh Strom mithilfe der Wasserkraft. Demnach ist Österreich der fünftgrößte Energieerzeuger mit Wasserkraft. In Abb. 28 sind alle Länder mit einer Bruttostromerzeugung größer 10.000 GWh dargestellt.

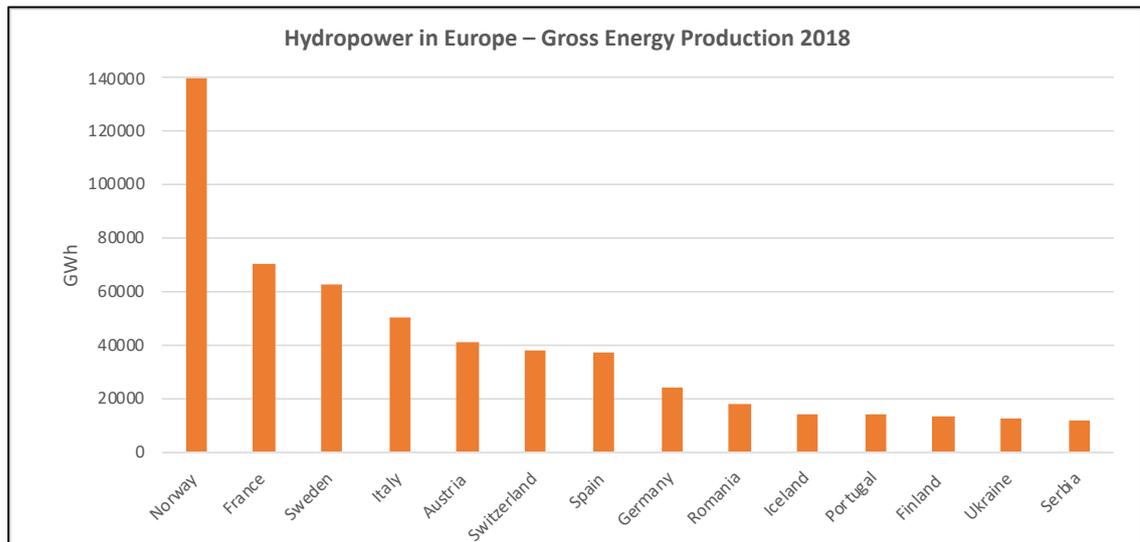


Abb. 28: Wasserkraft Europa – Bruttostromerzeugung 2018 [vgl. [36]]

In Abb. 29 ist die Bruttostromerzeugung der europäischen Länder pro Landesfläche in MWh/km² abgebildet.

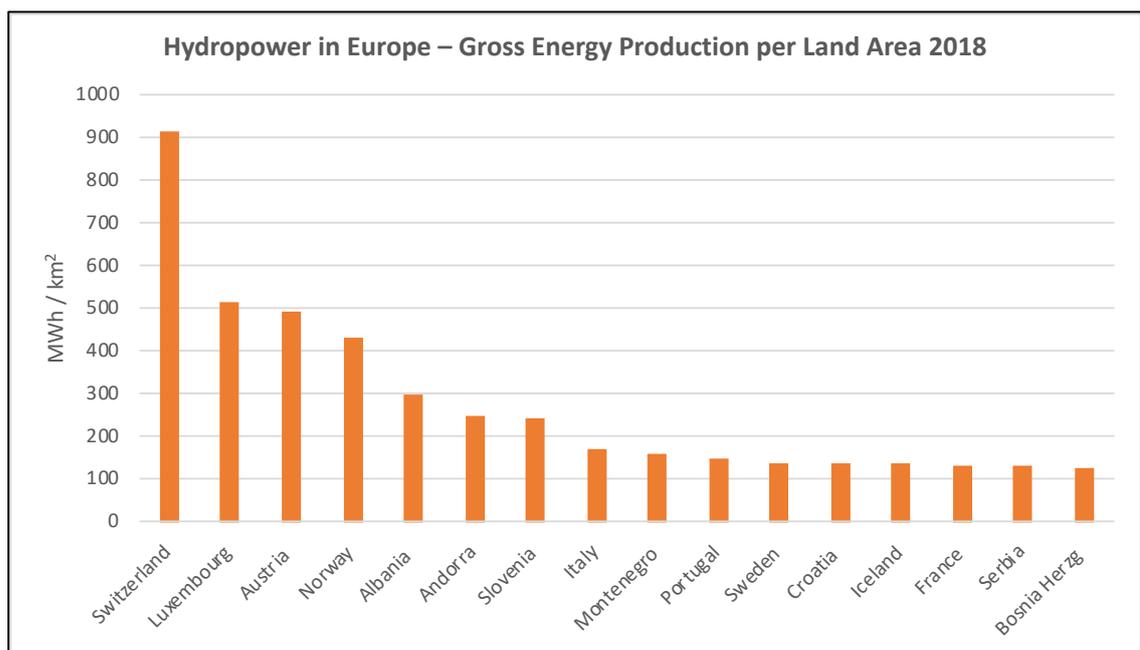


Abb. 29: Wasserkraft Europa – Bruttostromerzeugung/Fläche [vgl. [36, 35]]

Abb. 29 (Seite 42) zeigt, dass die Schweiz mit 915 MWh/km² die höchste Bruttostromerzeugung pro Landesfläche aufweist. Österreich liegt mit 491 MWh/km² an dritter Stelle. Daraus ergibt sich folgendes Bild: Österreich liegt nach der installierten Leistung pro Landesfläche als auch nach der Bruttostromerzeugung pro Landesfläche in der Wasserkraftnutzung innerhalb Europas an dritter Stelle. Nur die Schweiz und Luxemburg liegen vor Österreich. Norwegen liegt nach diesen Betrachtungsmethoden jeweils direkt hinter Österreich an vierter Stelle.

4.4 Österreichischer und Europäischer Strommix

Der Strommix gibt die Anteile der unterschiedlichen verwendeten Energiequellen in Prozent an, welche für die Stromerzeugung eingesetzt wurden. Somit können über den Strommix Rückschlüsse auf die Treibhausgasemissionen der erzeugten und verbrauchten elektrischen Energien gewonnen werden. Im Gegensatz zur erzeugten elektrischen Energie werden bei der verbrauchten Energie die Stromimporte und -exporte mitberücksichtigt [vgl. [37]].

Allgemein wird der Strommix in *Erzeugermix* und *Versorgermix* unterschieden. Der Erzeugermix gibt die Zusammenstellung der genutzten Energieträger für eine bestimmte erzeugte elektrische Energiemenge an. Hierbei kann sich die erzeugte elektrische Energie auf ein Land oder ein stromproduzierendes Unternehmen beziehen. Der Versorgermix entspricht dem verwendeten Strommix eines Stromlieferanten an den Endverbraucher. Aufgrund dessen wird der Versorgermix auch *Lieferantenmix* genannt. Seit dem Jahr 2010 sind Stromhändler und sonstige Lieferanten verpflichtet den Versorgungsmix zu kennzeichnen. Die Kennzeichnung vom Versorgermix ist auf jeder zugestellten Jahresrechnung eines Stromlieferanten vermerkt [vgl. [37]].

Der momentane Strommix kann zur Berechnung der Treibhausgasemissionen herangezogen werden. Aktuell können online Informationen bezüglich der Stromerzeugung und den zugehörigen spezifischen CO₂-Emissionen in über 223 Länder in Echtzeit abgerufen werden [vgl. [38]].

4.4.1 Strommix Österreich

Die Zusammenstellung der verschiedenen österreichischen Primärenergieträger für die Bruttostromerzeugung wird in Abb. 30 dargestellt. Die Gesamtenergieerzeugung betrug im Kalenderjahr 2019 insgesamt 73.460 GWh.

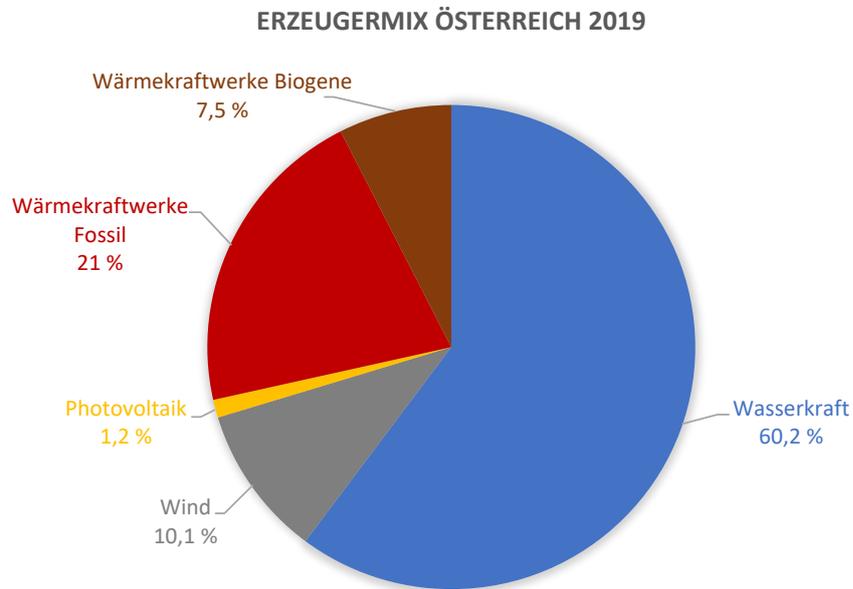


Abb. 30: Erzeugermix Österreich 2019 [vgl. [19]]

Die obige Abbildung zeigt, dass 2019 mithilfe der erneuerbaren Energieträger Wasserkraft, Wind, Wärmekraftwerke Biogene und Photovoltaik in Summe 79% des österreichischen Stromes erzeugt wurde. Demnach wurden 58.033 GWh elektrische Energie mit erneuerbaren Energieträgern und 15.427 GWh mit nicht klimaneutralen Energieträgern (fossilen Brennstoffen) erzeugt.

Die Bruttostromerzeugung von Österreich reicht jedoch nicht aus, um das Land ganzjährig mit Strom zu versorgen. Österreich verbrauchte 2019 insgesamt 99.507 GWh elektrische Energie (Stromerzeugung inklusive Bruttostromimport). Berücksichtigt man hierzu die Stromexporte von in Summe 22.918 GWh, so verbrauchte Österreich nur 76.589 GWh Strom. Das heißt, dass der Nettostromimport von 2019 insgesamt 3.129 GWh betrug [vgl. [39]]. Die importierten Energieträger setzten sich wie folgt zusammen: Fossil 15%, Kernenergie 6%, Erneuerbare 6% und Sonstige 1% [vgl. [37]].

In Abb. 31 sind die physikalischen Stromimporte und -exporte im Zeitraum von 1945 bis 2016 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass Österreich seit Beginn dieser Aufzeichnungen – Ende des zweiten Weltkriegs – bis zum Ende der achtziger Jahre und zum Teil auch in den neunziger Jahren elektrische Energie exportierte, anstatt sie zu importieren.

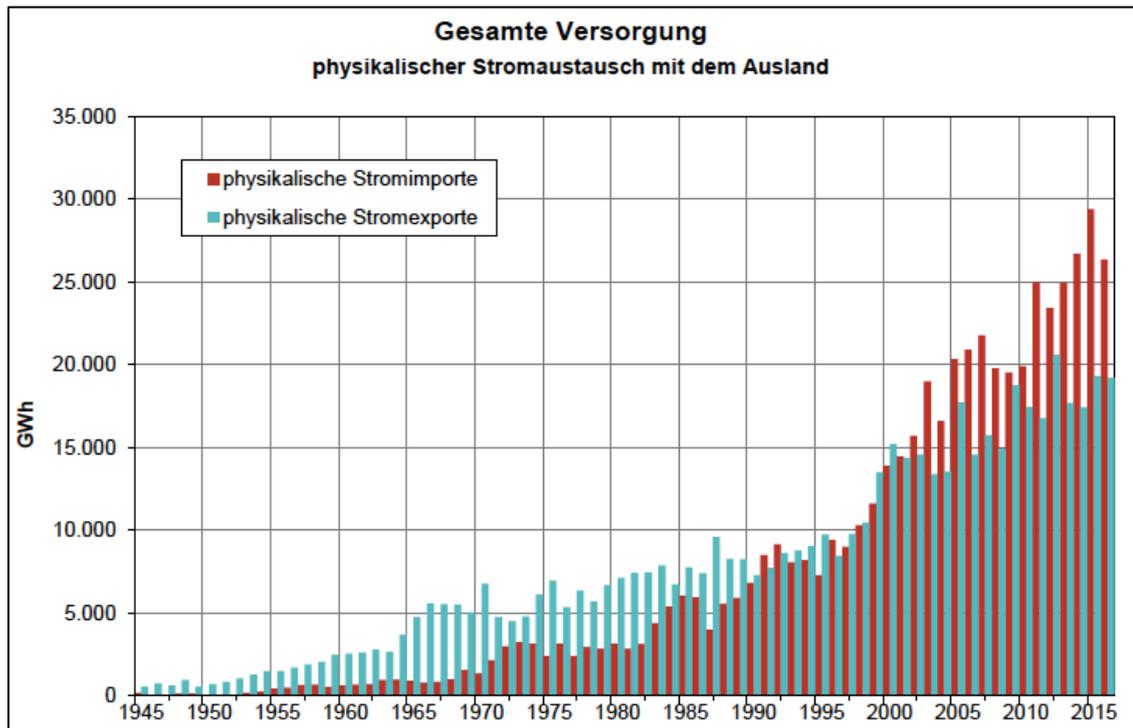


Abb. 31: Stromimporte und -exporte von 1945 bis 2016 [37]

Seit Anbeginn des dritten Jahrtausends ist die Stromerzeugung Österreichs nicht mehr ausreichend, um das ganze Land selbstständig mit Strom zu versorgen. Die Gründe hierfür sind unter anderem die enormen Fortschritte der Technik sowie die stetig steigende Population.

4.4.2 Strommix Europäische Union

Der Erzeugermix der Europäischen Union von 2018 ist in Abb. 32 (Seite 46) dargestellt. Mit knapp 46% sind die fossilen Brennstoffe die maßgebenden Energieträger in der EU. In Summe sind die klimaneutralen Energien Wasserkraft, Wind, Photovoltaik und Geothermie mit rund 29% die zweitgrößte Energieträgergruppe. Mithilfe der Atomenergie wird knapp 26% der elektrischen Energie innerhalb der Europäischen Union erzeugt.

NET ELECTRICITY GENERATION EU-27, 2018

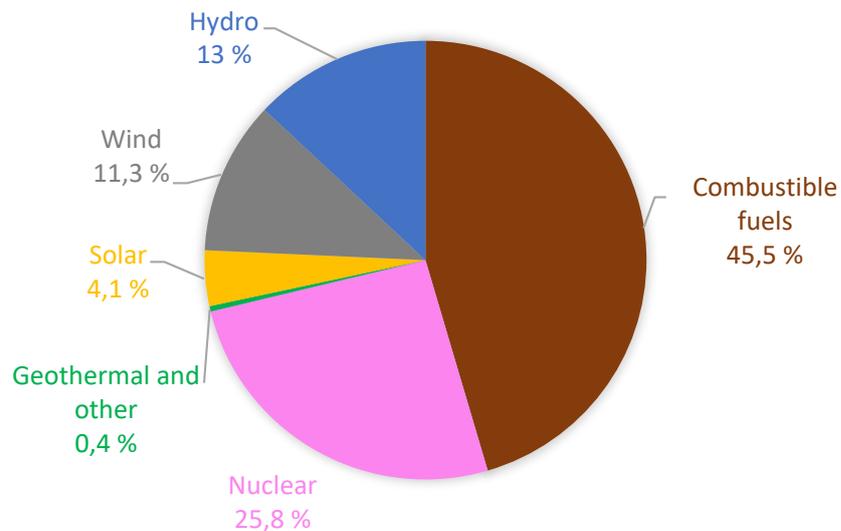


Abb. 32: Erzeugermix – EU-27, 2018 [vgl. [41]]

Der Beitrag der klimaneutralen Energien zur Stromerzeugung im Jahr 2019 wird detailliert in Abb. 33 dargestellt.

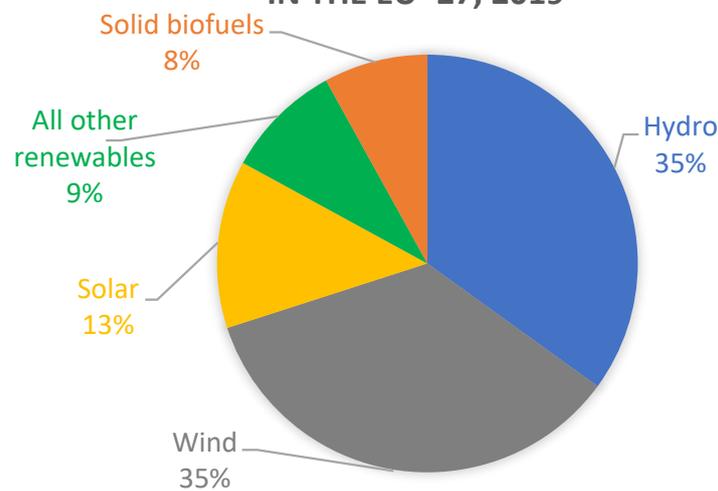
RENEWABLE SOURCES GENERATING ELECTRICITY
IN THE EU -27, 2019

Abb. 33: Erzeugermix – Erneuerbare Energien EU-27, 2019 [vgl. [42]]

Die Abbildung zeigt, dass sowohl die Wasser- als auch Windkraft mit jeweils 35% die maßgebenden klimaneutralen Energien in der EU darstellen. In ganz Europa ist dennoch die Wasserkraft die am meisten genutzte erneuerbare Energiequelle. Große Wasserkraftnationen wie zum Beispiel Norwegen und die

Schweiz sind Nichtmitglieder der Europäischen Union. Durch die fehlenden Wasserkrafterträge dieser Nationen wird in der EU gleichermaßen Energie aus Wasser- und Windkraft produziert. In Europa ist die Energiegewinnung mithilfe der Photovoltaiktechnik (Nutzung der Sonneneinstrahlung) die am schnellsten wachsende Energiequelle. Der Beitrag aus dieser erneuerbaren Energiequelle wuchs von einem Prozent im Jahr 2008 auf beeindruckende dreizehn Prozent im Jahr 2019 [vgl. [42]].

In Abb. 34 ist die Echtzeitdarstellung der CO₂-Emissionen zufolge der momentanen Stromerzeugung in Europa dargestellt. Die CO₂-Intensität in den skandinavischen Ländern Norwegen und Schweden sowie Island sind im Allgemeinen sehr gering. Österreich liegt mit rund 250 g CO₂eq/kWh unter dem Durchschnitt.

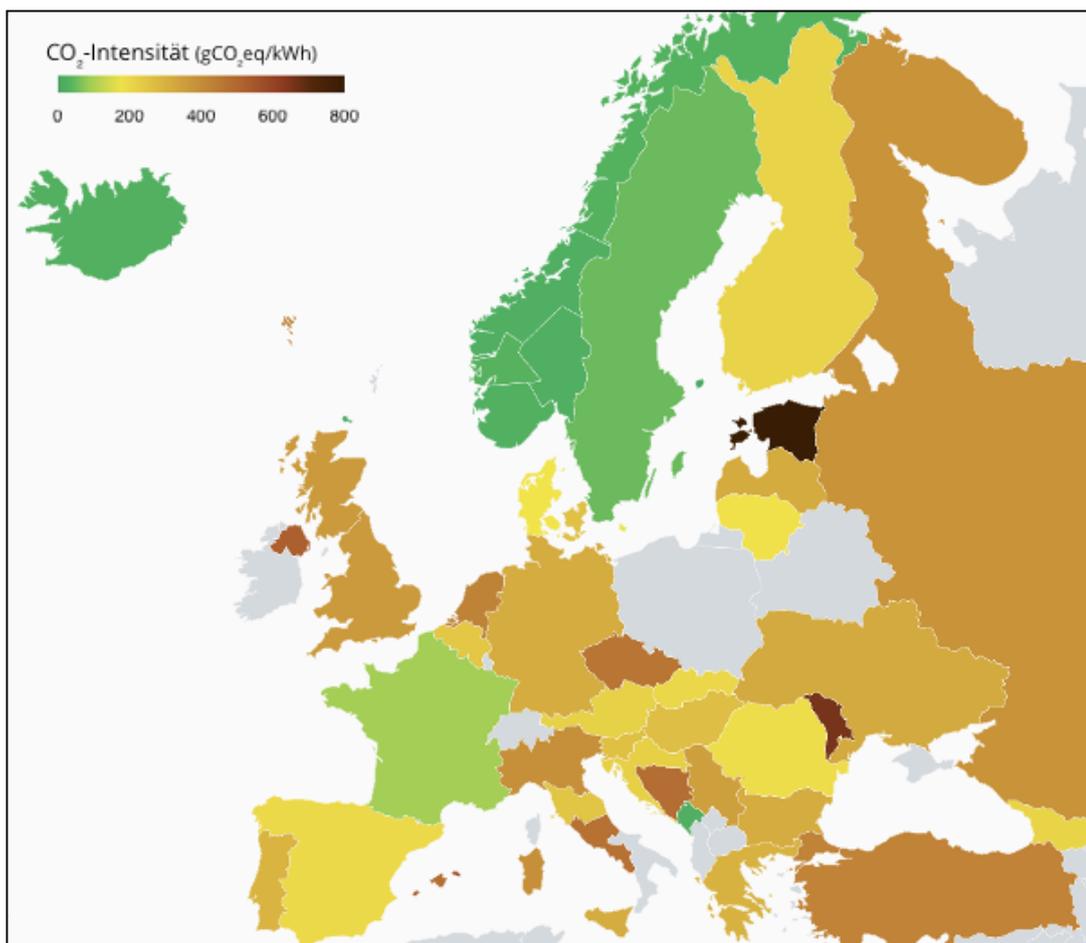


Abb. 34: Echtzeitdarstellung der CO₂-Emissionen in Europa, Erzeugung [38]

5. Ermittlung baubetrieblicher CO₂-Emissionsfaktoren

5.1 Endenergieverbrauch der Baubranche

In der Baubranche ist die Streuung der Treibhausgasemissionen im Allgemeinen sehr hoch. Die maßgebenden Emissionsquellen während der Errichtung eines Bauwerks ergeben sich im Wesentlichen aus der benötigten Energie für die Bauausführung und den verwendeten Baumaterialien.

Der Energieverbrauch für die Herstellung von Bauwerken unterscheidet sich nach Größe und Art des Bauwerks (Gebäude, Verkehrsbauwerke, Kraftwerke, etc.), sowie nach den individuellen Rahmenbedingungen des Baugrundes. Folglich unterscheiden sich die Bauwerke bereits bei den Baugrubensicherungen und Gründungsmethoden. Beispielsweise wird durch den niedrigeren Energieaufwand bei der Herstellung von Flachgründungen weniger CO₂ emittiert als bei Tiefgründungen (Pfehlgründungen). In Tab. 7 ist der Endenergiebedarf verschiedener Industriebranchen dargestellt. Der energetische Endenergieverbrauch im Bausektor betrug im Jahr 2017 laut der österreichischen Bundesregierung insgesamt 4.898 GWh.

Tab. 7: Energetischer Endenergieverbrauch der Industrien 2017 [vgl. [43]]

Energetischer Endenergieverbrauch der Industrien nach Sektoren 2017					
Sektor		EEV [GWh]	Sektor		EEV [GWh]
1	Papier und Druck	21.066	8	Bau	4.898
2	Chemie und Petrochemie	12.520	9	Sonst. produzierender Bereich	3.220
3	Eisen- und Stahlerzeugung	10.416	10	Nichteisenmetalle	2.601
4	Steine und Erden, Glas	10.213	11	Bergbau	2.167
5	Maschinenbau	8.341	12	Fahrzeugbau	1.953
6	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	8.024	13	Textil und Leder	968
7	Holzverarbeitung	7.390			

Der Energieverbrauch der Baubranche liegt im Vergleich zu den anderen Industriebranchen im unteren Mittelfeld. Der Endenergieverbrauch (EEV) in der Eisen- und Stahlerzeugungsindustrie beträgt laut Tab. 7 (Seite 48) rund 10,4 TWh. Jedoch wurde hierbei der Primärenergieeinsatz in den Hochöfen und Kokereien nicht berücksichtigt. Unter Einbezug des Primärenergieeinsatzes (ca. 21 TWh) hat die Eisen- und Stahlerzeugung den höchsten Energiebedarf aller Industriebranchen [vgl. [43]].

Abb. 35 zeigt den relativen EEV nach Energieträgern und industriellen Sektoren. Die Grüntöne repräsentieren die Verwendung von klimaneutralen Energien, wobei die Rottöne fossile Energieträger darstellen. Die Abbildung zeigt, dass die Anteile der klimaneutralen Energien im Sektor Bau sowie Eisen- und Stahlerzeugung mit rund 20% am niedrigsten sind. Des Weiteren zeigt die Abbildung, dass der Energieträger „fossile Kraftstoffe (flüssig)“ mit knapp 55% des Gesamtenergiebedarfes (4.898 GWh) in der Baubranche maßgebend ist. In der gesamten Industrie beträgt der Anteil der regenerativen Energien an dem EEV in Summe 45% [vgl. [43]].

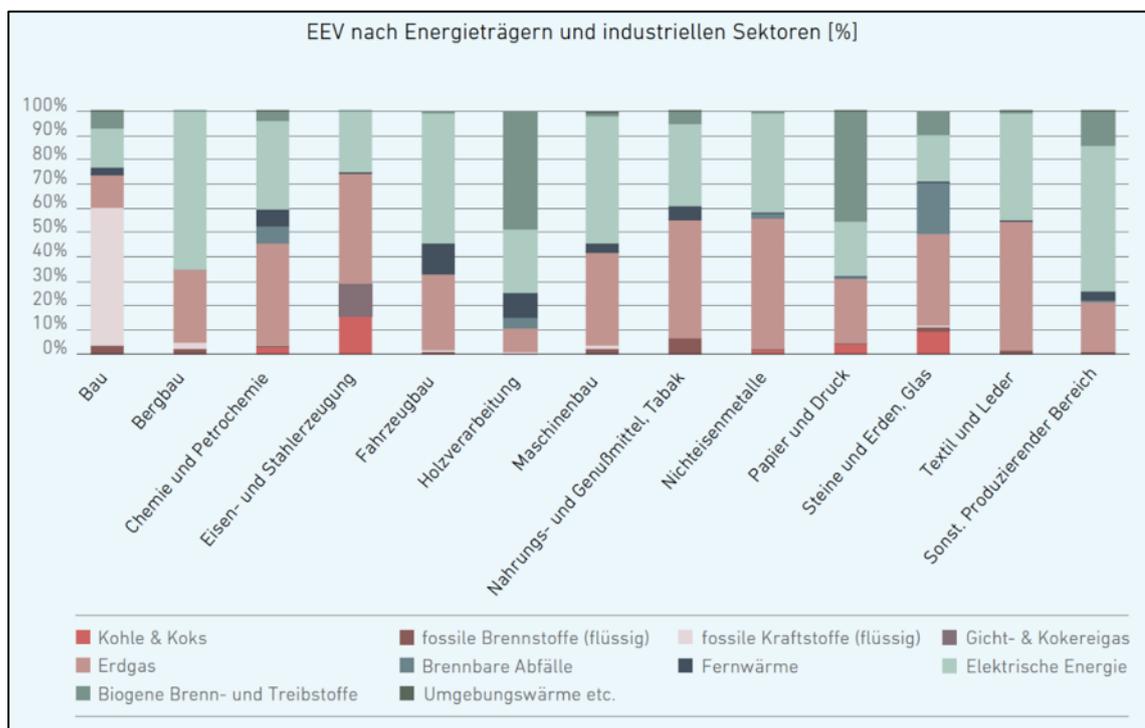


Abb. 35: EEV nach Energieträgern und industriellen Sektoren [43]

Die Energieträger im Sektor Bau sind in Abb. 36 mittels eines Energieflussbildes dargestellt. Das Energieflussbild beschreibt den Fluss der Energieträger zu den unterschiedlichen Nutzkategorien. Die Abbildung zeigt, dass im Sektor Bau die Kategorie Standmotoren mit 3.170 GWh (65%) stark dominierend ist. Der Energieverbrauch für Raumheizung und Klimaanlage beträgt 983 GWh (20%). Die Industrieöfen beanspruchen 466 GWh (10%) und die Beleuchtung und EDV 277 GWh (5%) der gesamten Endenergie.

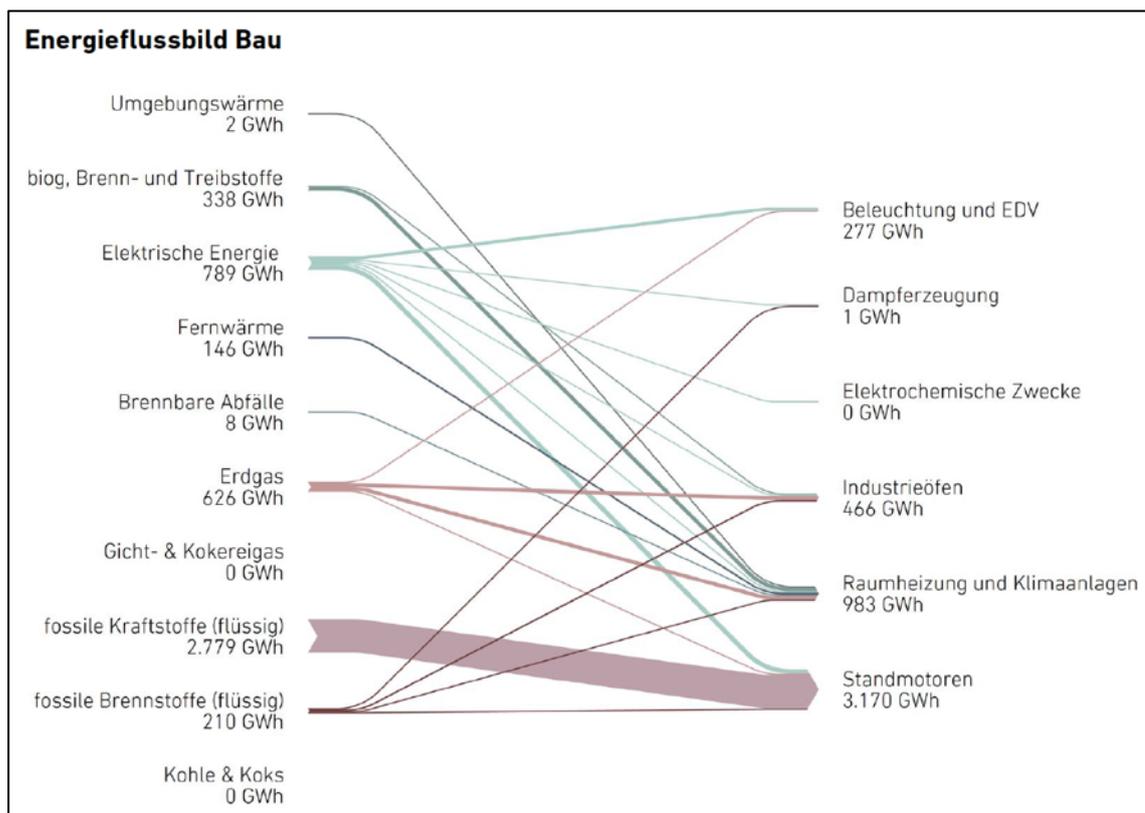


Abb. 36: Energieflussbild im Bau [43]

Mithilfe einer genauen Dokumentation der verwendeten Energieträger können die CO₂-Emissionen jeder Baustelle berechnet werden. Die größte Energiegruppe sind die fossilen Energieträger, insbesondere die flüssigen fossilen Kraftstoffe (Nutzungsverhältnis Diesel/Benzin für Standmotoren: 38/1 [44]). Die CO₂-Emissionen durch elektrische Energie und Fernwärme können anhand ihrer Anteile an klimaneutralen Energien im Strommix ermittelt werden. Der Anteil an klimaneutralen Energien beträgt im Erzeugermix 79% (Abb. 30, Seite 44) und 45% in der Fernwärme [43].

5.2 CO₂-Emissionen infolge der Verbrennung fossiler Kraftstoffe

Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert, verursachen die Standmotoren auf einer Baustelle den höchsten Energieverbrauch. Die meisten Baumaschinen und Baugeräte einer Baustelle werden mit Verbrennungsmotoren angetrieben. Demnach benötigen die Geräte fossile Kraftstoffe, um Arbeit verrichten zu können.

Baumaschinen und Baugeräte werden für den Erdbau, Transport, als Hebezeuge und für die Betonverarbeitung benötigt. Typische Geräte mit Verbrennungsmotoren auf einer Baustelle sind:

- **Bagger:** Hydraulikbagger, Seilbagger, Grabenbagger
- **Lade- und Planiergeräte:** Radlader, Laderaupe, Planierraupen, Grader
- **Walzen:** Statische Walzen, Vibrationswalzen
- **Transportgeräte:** Lastkraftwagen, Muldenkipper
- **Hebezeuge:** Fahrzeugkrane
- **Betonpumpen** (auch mit elektrische Antriebsmotoren)

Besonders energieintensiv sind Erd- und Spezialtiefbauarbeiten. Beispielsweise werden für den Aushub des Bodenmaterials Bagger für das Lösen und Fördern des Materials benötigt. Das gelöste Material wird danach mit einem Lade- und Planiergerät (z.B. Radlader) auf ein Transportmittel verladen. Abhängig von der Lade- und Entladestelle, sowie der Länge der Transportstrecke und dem zur Verfügung stehenden Straßennetz wird das Material transportiert. Lastkraftwagen werden für den Massentransport von Aushubmaterial in die nächstgelegene Deponie verwendet. Auf Großbaustellen mit eigenem Lagerplatz kommen zudem die für den Verkehr auf öffentlichen Straßen nicht zugelassenen Muldenkipper zum Einsatz. Für effiziente Aushubarbeiten müssen die Transport- und Erdbaugeräte der Transportkette optimal aufeinander abgestimmt werden.

Die Errichtung eines Flusskraftwerkes ist ein gutes Beispiel für eine Baustelle mit großen Erd- und Tiefbauarbeiten. Aufgrund der Flussumleitung während der Bauphase, der zu erreichenden Fallhöhe zwischen Ober- und Unterwasser und des erweiterten Flussquerschnitts fallen größere Aushubmengen an. Die Baugruben müssen zudem gegen Versagen (Einstürzen) gesichert werden und drückendes Grundwasser zurückhalten. Hierfür werden Dichtwände wie zum Beispiel Schlitzwände und Spundwände in Kombination mit Ankern verwendet, welche den wirkenden Erd- und Wasserdruck aufnehmen und die Baugrube sichern.

Abb. 37 zeigt Erdarbeiten auf einer MKW-Baustelle. Auf der Baustelle sind mehrere Hydraulikbagger, ein Muldenkipper, sowie ein Schlitzwandgreifer zu sehen. Die Abbildung soll einen Eindruck von der Intensität der verwendeten Baugeräte auf der Baustelle vermitteln.



Abb. 37: Erdarbeiten MKW Puntigam vom 03. Juni 2017 [45]

Bei Baustellen mit großen Betonmengen wie z.B. bei Flusskraftwerken hat die Betonherstellung vor Ort sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile. Ein Fahrmischer liefert bis zu 10 m³ Fertigbeton auf die Baustelle. Demzufolge sind

für die Errichtung größerer Bauwerke bis zu mehrere tausend LKW-Fahrten notwendig, weshalb eine Betonherstellung vor Ort dementsprechend CO₂-Emissionen einspart. Für die Betonherstellung auf der Baustelle kann das Aushubmaterial wiederverwendet werden. Das Aushubmaterial wird vor Ort aufbereitet und als Zuschlagmaterial genutzt.

Bei der Errichtung von Bauwerken ist zudem die Nutzung regionaler Unternehmen vorteilhaft. Neben der Förderung der heimischen Wirtschaft werden zusätzliche CO₂-Emissionen durch weiter entfernte Anfahrten auf die Baustelle vermieden und somit die CO₂-Bilanz verbessert.

5.2.1 Emissionsfaktoren Benzin und Diesel

Verbrennungsmotoren können in Benzinmotoren (Ottomotoren) und Dieselmotoren unterschieden werden. Der Zusammenhang zwischen der Verbrennung von Kraftstoffen in Motoren und den dabei entstehenden CO₂-Emissionen wurde bereits vielfach untersucht. Jedoch gibt es nur wenig ausreichend detaillierte Literatur hierzu. Weder das österreichische Bundeskanzleramt, noch die Bundesministerien oder das Umweltbundesamt stellen ausreichende Datensätze zu den spezifischen Emissionsfaktoren der Verbrennung von fossilen Kraftstoffen öffentlich zugänglich zur Verfügung. Viele Literaturwerke beziehen ihre Emissionswerte bei der Nutzung fossiler Kraftstoffe auf die gesamten THG-Emissionen in CO₂-Äquivalenten pro Liter Treibstoff, ohne Auflistung der einzelnen spezifischen Emissionen wie z.B. Kohlenstoffdioxid. Aus diesem Grund war die Suche nach plausiblen Emissionsfaktoren für fossile Kraftstoffe mit hohem Aufwand verbunden.

Grundsätzlich können die bei der Nutzung fossiler Kraftstoffe die entstehenden Emissionen in drei Emissionskategorien unterteilt werden: Well-to-Tank, Tank-to-Wheel und Well-to-Wheel (Abb. 38, Seite 54).

Well-to-Tank (WTT) Emissionen sind jene Emissionen, welche durch Gewinnung, Transport, Verteilung sowie Herstellung der Treibstoffe in den Raffinerien entstehen. Durch die global betrachtet hohe Anzahl an Erdölraffinerien mit unterschiedlichsten Randbedingungen ist die einheitliche

Erfassung der WTT-Emissionen sehr komplex. Infolgedessen würde eine detaillierte Erfassung und Aufschlüsselung der WTT-Emissionen den Aufwand im Rahmen dieser Masterarbeit übertreffen.

Tank-to-Wheel (TTW) Emissionen berücksichtigen jene Emissionen, die durch die Verbrennung des Kraftstoffes im Motor entstehen. Diese Emissionen verursachen den maßgebenden Emissionsanteil bei der Nutzung fossiler Kraftstoffe.

Well-to-Wheel (WTW) Emissionen ergeben sich aus der Summe der WTT und TTW-Emissionen.



Abb. 38: Emissionskategorien fossiler Brennstoffe [46]

Laut dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik an der TU Graz sind die TTW-CO₂-Emissionen (Emissionen durch Verbrennung) von Benzin 2,32 kg CO₂/l und Diesel 2,63 kg CO₂/l [47]. Diese Werte stimmen mit den spezifischen Emissionswerten aus dem Verein der Automobilindustrie (VDA) von 2019 überein [48]. In den folgenden zwei Tabellen auf Seite 55 und 56 sind die Emissionsfaktoren vom VDA zu Benzin und Diesel für die jeweiligen Emissionskategorien WTT, TTW und WTW aufgelistet. Die spezifischen Emissionswerte sind in g/kWh und g/l für die Abgasnormen Euro 0 und Euro 6 dargestellt und beziehen sich auf die EU-28 von 2016.

Tab. 8: Emissionsfaktoren Benzin [vgl. [48]]

Emissionsfaktoren für Benzin (100% fossil) – Europäische Union (EU-28) 2016					
Emissionskategorien	Emissionsfaktoren	[g/kWh]		[g/l]	
		Euro 0	Euro 6	Euro 0	Euro 6
Well-to-Tank Kraftstoffbereitstellung (Vorkette)	CO₂ fossil	52	52	465	465
	Kohlenstoffmonoxid CO	0,0533	0,0533	0,4766	0,4766
	Schwefeldioxid SO₂	0,1380	0,1380	1,2336	1,2336
	Stickstoffoxide NO_x	0,0056	0,0056	0,0501	0,0501
	Staub (unspezifisch)	0,0078	0,0078	0,0695	0,0695
	Methan CH₄	0,4355	0,04355	3,8934	3,8934
	Lachgas N₂O	0,0023	0,0023	0,0203	0,0203
	NM VOC	0,1814	0,1814	1,6213	1,6213
Tank-to-Wheel Kraftstoffeinsatz (Verbrennung)	CO₂ fossil	261	261	2.336	2.336
	Kohlenstoffmonoxid CO	1,6624	1,0491	14,8621	9,3788
	Schwefeldioxid SO₂	0,0017	0,0017	0,0149	0,0149
	Stickstoffoxide NO_x	0,4947	0,0326	4,4230	0,2913
	Staub (unspezifisch)	0,0081	0,0034	0,0728	0,0307
	Methan CH₄	0,0106	0,0012	0,0948	0,0109
	Lachgas N₂O	0,0101	0,0007	0,0900	0,0064
	NM VOC	0,1319	0,0152	1,1792	0,1358
Well-to-Wheel Gesamt	CO₂ fossil	313	313	2.800	2.800
	Kohlenstoffmonoxid CO	1,7157	1,1024	15,3387	9,8554
	Schwefeldioxid SO₂	0,1397	0,1397	1,2485	1,2485
	Stickstoffoxide NO_x	0,5003	0,0382	4,4731	0,3413
	Staub (unspezifisch)	0,0159	0,0112	0,1423	0,1002
	Methan CH₄	0,4461	0,4367	3,9882	3,9043
	Lachgas N₂O	0,0123	0,0030	0,1102	0,0267
	NM VOC	0,3133	0,1965	2,8005	1,7571

Tab. 9: Emissionsfaktoren Diesel [vgl. [48]]

Emissionsfaktoren für Diesel (100% fossil) – Europäische Union (EU28) 2016					
Emissions- kategorien	Emissionsfaktoren	[g/kWh]		[g/l]	
		Euro 0	Euro 6	Euro 0	Euro 6
Well-to-Tank Kraftstoff- bereitstellung (Vorkette)	CO₂ fossil	30	30	301	301
	Kohlenstoffmonoxid CO	0,0375	0,0375	0,3739	0,3739
	Schwefeldioxid SO₂	0,0982	0,0982	0,9784	0,9784
	Stickstoffoxide NO_x	0,0055	0,0055	0,0549	0,0549
	Staub (unspezifisch)	0,0066	0,0066	0,0653	0,0653
	Methan CH₄	0,4031	0,4031	4,0148	4,0148
	Lachgas N₂O	0,0010	0,0010	0,0096	0,0096
	NM VOC	0,1020	0,1020	1,0162	1,0162
Tank-to-Wheel Kraftstoff- einsatz (Verbrennung)	CO₂ fossil	266	266	2.645	2.645
	Kohlenstoffmonoxid CO	0,7927	0,0552	7,8956	0,5495
	Schwefeldioxid SO₂	0,0017	0,0017	0,0166	0,0166
	Stickstoffoxide NO_x	1,0610	1,0011	10,5686	9,9719
	Staub (unspezifisch)	0,1752	0,0039	1,7452	0,0389
	Methan CH₄	0,0034	0,0003	0,0337	0,0032
	Lachgas N₂O	0,0000	0,0096	0,0000	0,0952
	NM VOC	0,1400	0,0135	1.3949	0,1344
Well-to-Wheel Gesamt	CO₂ fossil	296	296	2.946	2.946
	Kohlenstoffmonoxid CO	0,8302	0,0927	8,2695	0,9235
	Schwefeldioxid SO₂	0,0999	0,0999	0,9950	0,9950
	Stickstoffoxide NO_x	1,0665	1,0066	10,6235	10,0286
	Staub (unspezifisch)	0,1818	0,0105	1,8105	0,1042
	Methan CH₄	0,4064	0,4034	4,0486	4,0181
	Lachgas N₂O	0,0010	0,0105	0,0096	0,1048
	NM VOC	0,2421	0,1155	2,4111	1,1506

Tab. 8 und Tab. 9 zeigen, dass die Emissionen aus der Kraftstoffbereitstellung (WTT) von Benzin mit 465 g CO₂/l höher als jene von Diesel mit 301 g CO₂/l sind. Jedoch erzeugt Benzin bei der Verbrennung des Kraftstoffes deutlich geringere Emissionen als Diesel, weswegen die Gesamtemissionen von Diesel höher sind. Zudem zeigen die Tabellen, dass sich der spezifische CO₂-Emissionsfaktor innerhalb der verschiedenen Abgasnormen nicht ändert. In Summe entstehen bei **Benzin 2,80 kg CO₂/l** und bei **Diesel 2,95 kg CO₂/l**.

Um bei größeren Dieselmotoren (LKW, Bagger, etc.) die THG-Emissionen zu reduzieren beziehungsweise die Abgaswerte zu verbessern, wurde 2009 vom VDA die AdBlue-Technologie für LKW-Motoren mit Euro 6 Abgasnormen eingeführt. AdBlue (auch als „Diesel Exhaust Fluid“ bekannt) ist ein Gemisch aus Harnstoff und demineralisiertem Wasser, welches zur Abgasnachbehandlung in SCR-Systemen (Selective Catalytic Reduction) eingesetzt wird. Die Aufgabe von AdBlue ist es, die Stickstoffoxid-Emissionen zu reduzieren (bis zu 90%). Der Nachteil von AdBlue ist jedoch, dass es nicht Kohlenstoffdioxidneutral hergestellt wird. Für die Herstellung von einem Liter AdBlue wird rund ein Kilogramm Erdgas benötigt. [vgl. [49, 50]]. Das heißt, dass durch die Verwendung von AdBlue die CO₂-Emissionen steigen, wohingegen die Stickstoffoxid-Emissionen sinken. Heutzutage wird die AdBlue-Technologie auch bei vielen PKW-Motoren eingesetzt.

Ein Kilogramm Erdgas enthält eine Energie von 13,89 kWh [51] und emittiert laut Tab. 2 (Seite 31) 0,20 kg CO₂/kWh. Infolgedessen werden durch die Nutzung von einem Kilogramm Erdgas beziehungsweise einem Liter AdBlue 2,78 kg CO₂ freigesetzt. Der AdBlue-Verbrauch liegt zwischen 4-6% des Kraftstoffverbrauches eines Fahrzeuges, wodurch zusätzliche CO₂-Emissionen in Höhe von 0,14 kg CO₂/l Diesel entstehen. Folglich erhöhen sich bei **Dieselmotoren** durch Verwendung von AdBlue die CO₂-Emissionen auf insgesamt **3,09 kg CO₂/l**.

Demnach werden beispielsweise bei einer Autofahrt mit einem PKW mit Euro 6 Dieselmotor und AdBlue (Annahme: Kraftstoffverbrauch von 6 l/100km) von Graz nach Wien (Distanz 200 km) in Summe 37,1 kg CO₂ emittiert.

5.3 CO₂-Emissionen infolge der Betonherstellung

Beton ist das meistverwendete Baumaterial in der Bautechnik und wird aus Zement, Zuschlägen (Gesteinskörnungen) und Wasser hergestellt (Abb. 39). Zur Verbesserung der Eigenschaften des Betons werden zudem oftmals Zusatzmittel und Zusatzstoffe hinzugefügt. Bei der Betonherstellung dient Zement als Bindemittel. Vermengt mit den anderen Baustoffen (Wasser und Gesteinskörnungen) leitet der Zement die Hydratation ein. Unter Hydratation wird die chemische Reaktion des Zements, in deren Folge der Beton erhärtet, verstanden. Dabei bilden die Klinkermineralien des Zements mit dem Wasser feine Kristalle. Die Kristalle wachsen in dem mit Wasser gefüllten Raum und durchdringen sich gegenseitig, wodurch ein festes Gefüge entsteht. Die Normfestigkeit der gewählten Festigkeitsklasse erreicht der Beton nach 28 Tagen [vgl. [52]].

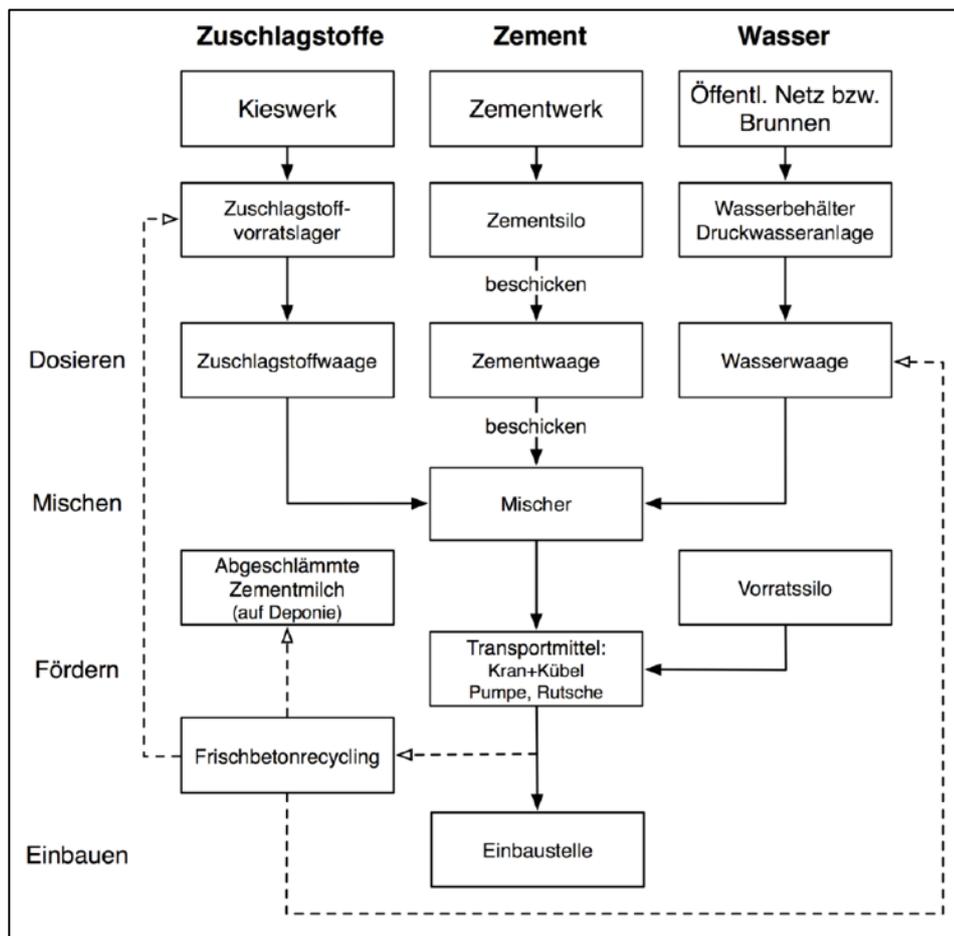


Abb. 39: Fertigungsfluss der Betonherstellung [53]

Beton besitzt eine hohe Druckfestigkeit und eine geringe Zugfestigkeit. Durch die Kombination von Beton und Stahl in Form von Stahlbeton (bewehrter Beton) können sowohl hohe Druck- als auch Zugspannungen aufgenommen werden. Der Verbundwerkstoff Stahlbeton kombiniert die hervorragenden Eigenschaften beider Baustoffe und wird im Abschnitt 5.3.2 (Seite 64) detaillierter beschrieben.

Der Einsatz von Beton – bewehrt als auch unbewehrt – ist im Bauwesen heutzutage nahezu unumgänglich. Beton ist ein wichtiger Baustoff für Gründungen von Bauwerken (Fundamente, Stützbauwerke, etc.) sowie in der Massivbauweise. Zur Errichtung eines Flusskraftwerkes ist Beton ein fundamentaler Baustoff. Abb. 40 zeigt Betonkonstruktionen der Baustelle MKW Puntigam (Ansicht: Unterwasserseite). Zu sehen sind die Wehrpfeiler der drei Wehrfelder mit Anschluss an das Krafthaus, sowie die Endschwelle des Tosbeckens und eine verankerte Schlitzwand an der rechten Seite der Baugrube.



Abb. 40: Baustelle MKW Puntigam vom 05. Juli 2018, eigene Aufnahme

5.3.1 Emissionsfaktor der Zementherstellung

Zement wird in Zementwerken hergestellt. Die Hauptbestandteile von Zement sind Kalkstein, Ton und Quarz. Die Rohstoffe werden in Steinbrüchen gewonnen und mittels Brechen, Trocknen und Mahlen zu Rohmehl verarbeitet. Das Rohmehl wird in Drehöfen bei bis zu 1450°C gebrannt (Austreiben von CO₂), wodurch Zementklinker entstehen. Die Zementklinker werden anschließend mit Zusatzstoffen (Gips, Anhydrit, etc.) vermischt und erneut gemahlen (Abb. 41). Der österreichische Zement hat einen durchschnittlichen Zementklinkeranteil von 69,6% [vgl. [54]].

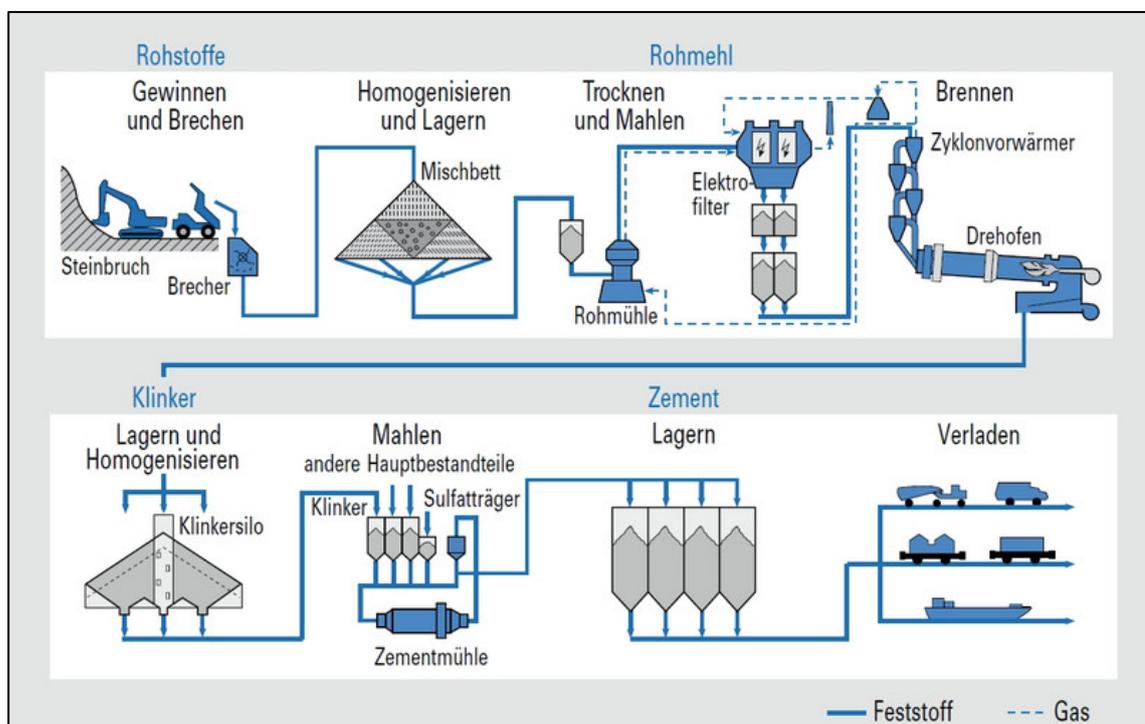


Abb. 41: Herstellungsprozess Zement [55]

Durch die energieintensive Zementherstellung sowie das Trocknen des Kalksteins werden große Mengen an CO₂ freigesetzt. Aufgrund dessen stellt der Zement die maßgebende Emissionsquelle der Betonherstellung dar. Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen infolge der Zementherstellung werden auf den nächsten Seiten genauer erläutert.

Die Entwicklung des spezifischen Energiebedarfes (GJ/t Zement) der heimischen Zementindustrie ist in Abb. 42 (Seite 61) dargestellt.

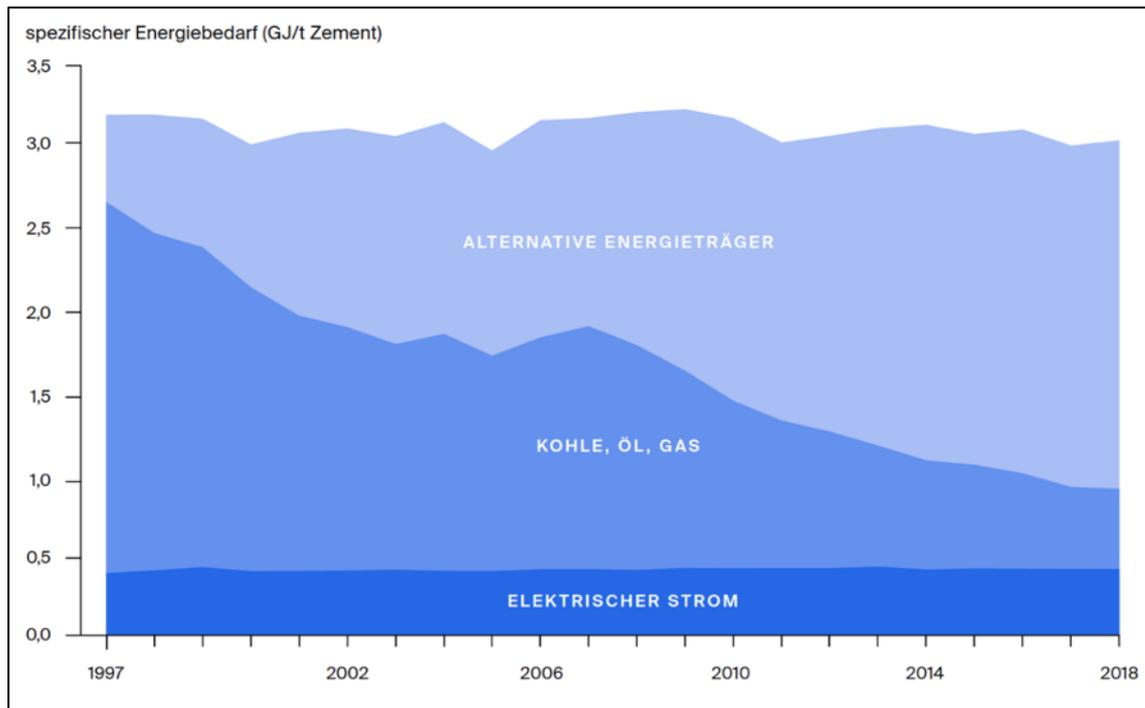


Abb. 42: Spezifischer Energiebedarf Zementherstellung [54]

Die Abbildung zeigt, dass sich der spezifische Energiebedarf der Zementherstellung in den letzten Jahren kaum verändert hat. Jedoch gibt es bezüglich der verwendeten thermischen Energieträger maßgebliche Änderungen. Die Anteile der fossilen Energieträger und alternative Energien haben sich über den Betrachtungszeitraum von 1997 bis 2018 umgekehrt. Alternative Brennstoffe sind organische Abfälle, Kunststoffabfälle, Papierfaserreststoffe, Autoreifen, Altöle und Sonstige. Der Anteil der elektrischen Energie ist über den Zeitraum konstant geblieben.

Eine signifikante Reduzierung des Energieverbrauchs in der Zementherstellung ist nach aktuellem Stand der Technik nicht möglich. Die Nutzung der anfallenden Abwärme der Drehöfen für eine Vorerwärmung und Trocknung des Rohmehls führte in den vergangenen Jahren zu einer geringen Senkung des Energieverbrauchs [vgl. [54]].

Im Jahr 2018 betrug der spezifische Energiebedarf für die Herstellung einer Tonne Zement in Summe 846,16 kWh (davon 733,06 kWh thermische Energie, entspricht 2,639 GJ und 113,1 kWh elektrische Energie [vgl. [54]]). Im Vergleich

dazu verbraucht ein durchschnittlicher Haushalt pro Jahr zwischen 3.500 und 5.500 kWh an elektrischer Energie [30].

Der höchste Anteil an elektrischer Energie bei der Zementherstellung wird für die Rohstoff- und Zementmahlung benötigt und beträgt rund 65% des gesamten Strombedarfes [vgl. [55]].

Wie bereits erwähnt werden bei der Zementherstellung CO₂-Emissionen durch den hohen Energieverbrauch sowie durch die chemische Reaktion des Rohstoffes Kalkstein erzeugt (Abb. 43).

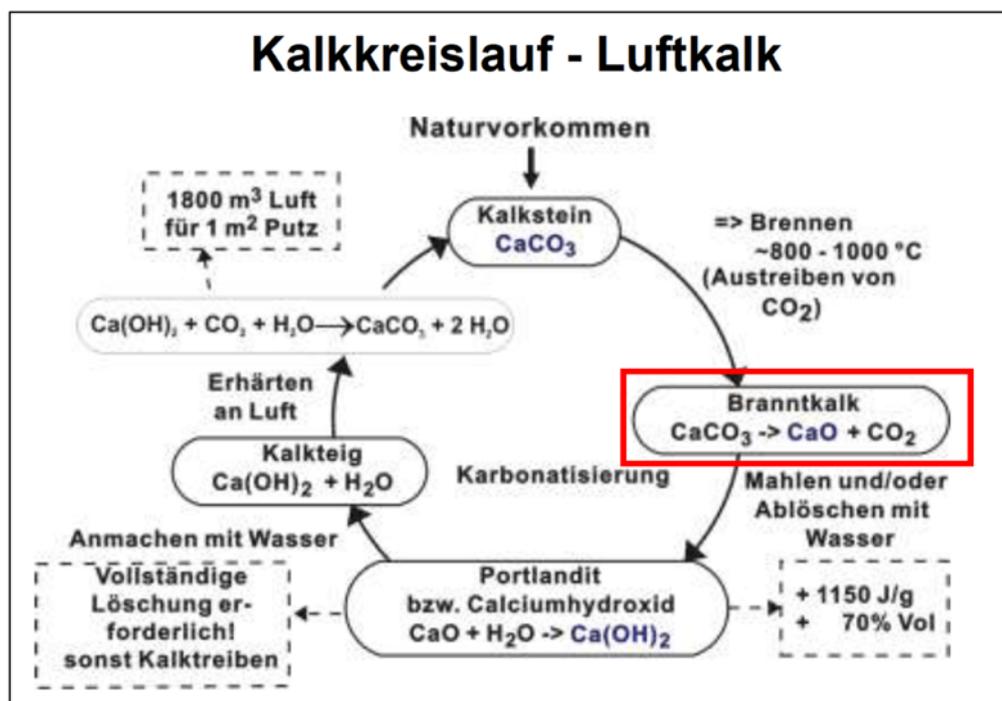


Abb. 43: Kalkkreislauf [52]

Abb. 43 zeigt den natürlichen Kalkkreislauf. Durch den Trocknungs- und Brennvorgang von Kalkstein im Drehofen wird Kohlenstoffdioxid freigesetzt. Demnach wird Kalkstein (CaCO_3) durch das Entweichen von CO_2 zu Branntkalk (CaO), welcher Hauptbestandteil im Zementklinker ist. Im Fachjargon wird die Austreibung von CO_2 auch Entsäuerung genannt. Das durch die Erzeugung von Branntkalk freigesetzte Kohlenstoffdioxid ist für rund zwei Drittel der gesamten CO₂-Emissionen des Zements verantwortlich [vgl. [54]].

Österreich hat im Vergleich mit anderen Nationen die niedrigsten CO₂-Emissionen in der Zementherstellung. Laut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ, TU Wien Science Center) betragen die CO₂-Emissionen der heimischen Zementindustrie im Jahr 2017 **539 kg CO₂/t Zement**. Im Vergleich hierzu liegen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der EU-28 bei 619 kg CO₂/t Zement. Die USA sind mit 764 kg CO₂/t Zement das Schlusslicht bezüglich der CO₂-Emissionen in der Zementindustrie [vgl. [54]].

Die Gründe für die niedrigeren CO₂-Emissionen in der österreichischen Zementindustrie sind unter anderem der hohe Anteil an alternativen Energien für die thermische Energieaufwendung und der durchschnittlich geringe Zementklinkeranteil von 69,6% im Zement. Damit hat Österreich einen der niedrigsten Klinkergehalte. Der Klinkeranteil des durchschnittlichen europäischen Zementes liegt bei 76,4%. Im Rahmen der europäischen Klimaschutzziele soll der durchschnittliche Klinkeranteil der einzelnen Mitgliedsstaaten bis 2050 maximal 70% betragen. Demnach liegt Österreich bereits heute schon unter diesem Zielwert [vgl. [54]].

Der Zementgehalt für einen Kubikmeter Beton wird mithilfe des Wasserzementwertes (Wasserbindemittelwert W/B-Wert) bestimmt. Der Wert gibt das Masseverhältnis des wirksamen Wassergehaltes zum Zementgehalt im Frischbeton an. Der minimale Zementgehalt sollte im Regelfall mindestens 250 kg/m³ betragen. Bei Pumpförderungen soll der Zementgehalt nicht höher als 350 kg/m³ sein, um die Gleitfähigkeit des Frischbetons nicht negativ zu beeinflussen [vgl. [56]].

Für die Berechnung der CO₂-Emissionen in Kapitel 7 wird der Emissionsfaktor aus der Zementherstellung als einziger Faktor für die Emissionen aus der Betonherstellung herangezogen. Direkte spezifische Emissionsfaktoren für die Bereitstellung der Zuschläge in der Betonherstellung werden nicht angeführt. Der Grund hierfür ist, dass das Aushubmaterial auf der Baustelle recycelt und als Zuschlagstoff für die Betonherstellung in der Betonmischanlage vor Ort wiederverwendet wird. Der benötigte Energiebedarf für den Recyclingprozess (Baumaschinen, Kiessortieranlage, etc.) wird über die Emissionsfaktoren der fossilen Kraftstoffe und des Strombedarfes indirekt mitberücksichtigt.

5.3.2 Emissionsfaktor der Herstellung von Bau- und Bewehrungsstahl

Stahlbeton ist ein Verbundwerkstoff, welcher aus den Komponenten Beton und Stahl besteht. Beton besitzt eine hervorragende Druckfestigkeit und eine niedrige Zugfestigkeit. Stahl hingegen besitzt eine sehr hohe Zugfestigkeit. Folglich ist die Aufgabe der Stahlbewehrung die im Bauteil durch Biegemomente verursachten Zugspannungen aufzunehmen. Abb. 44 zeigt ein Stahlbetonbauteil unter Biegebeanspruchung vor Rissbildung des Betons. Durch eine Stauchung an der Bauteiloberseite wird diese auf Druck beansprucht, während die Bauteilunterseite durch Dehnung auf Zug beansprucht wird. Die Stahlbewehrung wird erst durch Überbeanspruchung (Rissbildung) des Betons auf Zug aktiviert (Abb. 45). Die Menge an Stahlbewehrung in einem Kubikmeter Beton (Bewehrungsgrad) ist von der Größe der Belastung und Art der Bauteilbeanspruchung abhängig.

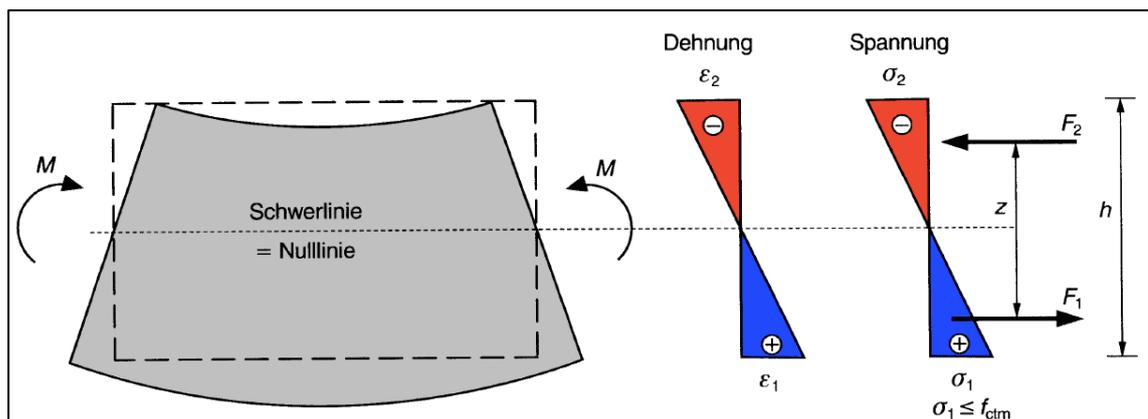


Abb. 44: Stahlbetonbauteil unter Biegung, vor Rissbildung [57]

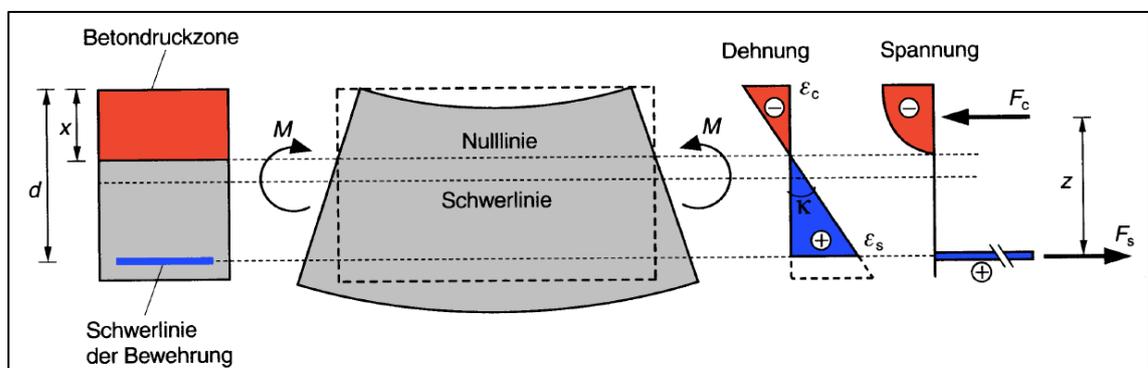


Abb. 45: Stahlbetonbauteil unter Biegung, nach Rissbildung [57]

Aufgrund der Eigenschaften des Verbundwerkstoffes werden Stahlbetonbauteile im Hoch- und Tiefbau häufig angewandt, so auch bei der Errichtung eines Flusskraftwerkes.

Durch den sehr hohen Energiebedarf in der Eisen- und Stahlindustrie (siehe Kapitel 5.1 – Endenergieverbrauch der Baubranche) führt die Verwendung von Stählen in der Bautechnik zu einer signifikanten Erhöhung der CO₂-Emissionen. Grundsätzlich wird Stahl mithilfe von zwei Verfahrensrouten hergestellt: Integrierte Stahlwerke (Hochofenroute) und Elektrostahlwerke. Die Primärproduktion von Stahl erfolgt mit der Hochofenroute (*Fa. Voestalpine Stahl* in Linz und Donawitz) während bei der Stahlerzeugung mit der Elektrostahlroute (z.B. Stahlerzeugung Marienhütte Graz) in den meisten Fällen ausschließlich Eisenträger ausschließlich aus Schrott eingesetzt werden (Sekundärproduktion). Mithilfe der Hochofenroute werden Maschinen, Langprodukte (Schiene, Profile, etc.) und Flachprodukte (z.B. Bleche) hergestellt während in Elektrostahlwerken hochlegierte Edelstähle (Werkzeugstahl, etc.) und Bewehrungsstähle hergestellt werden. Die CO₂-Emissionen durch die Herstellung von Stahl unterscheiden sich sehr stark hinsichtlich der Verwendung von Primär- und Sekundärrohstoffen, weswegen sie in den nächsten zwei Abschnitten separat behandelt werden.

Die Daten zu den CO₂-Emissionen infolge der zwei Herstellungsverfahren von Stahl wurden vom österreichischen Umweltbundesamt mithilfe der GEMIS-Software (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme) bilanziert. Durch GEMIS können sowohl direkte Emissionen vor Ort als auch indirekte Emissionen von erneuerbaren Energieträgern und fossilen Brenn- und Treibstoffen bilanziert werden. In vielen Berichten des Bundeskanzleramtes und der Bundesministerien wird bei den Quellenangaben das Umweltbundesamt und infolgedessen die GEMIS-Software referenziert.

„Das Ökoinstitut e. V. und die Gesamthochschule Kassel (GhK) hat die GEMIS- Basisversion in den Jahren 1987–1989 entworfen und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. Das Umweltbundesamt erstellt seit dem Jahr 1997 Ökobilanzen mittels GEMIS, wobei die GEMIS-Datenbasis mit Bezug auf Österreich vom Umweltbundesamt gewartet und jährlich aktualisiert wird. Auf Basis österreichspezifischer Daten berücksichtigt GEMIS somit die wichtigsten

Prozesse und bietet die Möglichkeit, neben den direkten Emissionen auch vorgelagerte Prozessemissionen in die Kalkulation aufzunehmen.“ [58]

5.3.2.1 Stahlherstellung aus Primärrohstoffen

Bei der Stahlherstellung aus Primärrohstoffen (Primärproduktion Hochofenroute) sind unter Berücksichtigung der Vorkette (Rohstoffgewinnung und -aufbereitung, Transport) und des abfallwirtschaftlichen Rucksacks (Materialaufbereitung, Transport) rund 90% der THG-Emissionen direkte CO₂-Emissionen. Zwei Drittel der CO₂-Emissionen entstehen durch die Herstellung des Roheisens. Infolge der Vorkette fallen weniger als 20% der gesamten CO₂-Emissionen an. In Tab. 10 ist die Summe der CO₂-Emissionen aus Prozess und Vorkette für die Rohstahlherstellung (mit 5% Eigenschrottanteil) dargestellt. Für die Berechnungen der Emissionen wurde der österreichische Strommix (Stromaufbringung) von 2005 herangezogen mit 249 g CO₂/kWh. Zudem ist zu erwähnen, dass der Großteil des Eisenerzes aus Übersee importiert wird. Der heimische Eisenerzanteil beträgt rund 10% [vgl. [40]].

Tab. 10: CO₂-Emissionen Rohstahl primär inkl. Vorkette [40]

CO₂-Emissionen Rohstahlherstellung Primärproduktion inkl. Vorkette		
	CO₂-Emissionen [kg CO₂/t]	Anteil an CO₂- Emissionen [%]
Summe CO₂-Emissionen	2.183	100
Roheisenherstellung	1.479	67,8
davon Kokerei	149	6,8
Sinterherstellung	304	13,9
Branntkalk-Herstellung	110	5,0
Transport (Überseeschiff)	104	4,8
Rest*	186	8,5

* Externe Erzeugung von Strom, Abbau und sonstiger Transport von Rohmaterialien

5.3.2.2 Stahlherstellung aus Sekundärrohstoffen

Sekundärrohstoffe sind aus Recyclingprozessen gewonnene Altstoffe (Eisenschrott). Durch die Wiederverwendung der Altstoffe können die CO₂-Emissionen erheblich reduziert werden. In Tab. 11 sind die CO₂-Emissionen für die Rohstahlherstellung bei Sekundärproduktion in der Hochofenroute und Elektrostahlroute inklusive Vorkette dargestellt. Der Schrottanteil bei der Hochofenroute beträgt 30% (max. Schrottanteil) und bei Elektrostahlroute 100%.

Tab. 11: CO₂-Emissionen Rohstahl sekundär inkl. Vorkette [vgl. [40]]

CO₂-Emissionen Rohstahlherstellung Sekundärproduktion inkl. Vorkette		
	CO₂-Emissionen [kg CO₂/t]	Anteil an CO₂- Emissionen [%]
Hochofenroute (30% Schrottanteil)		
Summe CO₂-Emissionen	1.728	100
Roheisenherstellung	1.163	67,3
davon Kokerei	114	6,6
Sinterherstellung	235	13,6
Branntkalk-Herstellung	95	5,5
Transport (Überseeschiff)	82	4,8
Rest	152	8,8
Elektrostahlroute (100% Schrottanteil)		
Summe CO₂-Emissionen	247	100
Strom	114	46,2
Kalkherstellung	60,1	24,4
Prozessemissionen Stahl	39,7	16,1
Dampferzeugung	12,5	5,1
Zementherstellung für Anlage	7,4	3,0
Sonstiges	12,8	5,2
Transport (Überseeschiff)	0	0

Tab. 11 (Seite 67) zeigt, dass durch die Erhöhung des Schrottanteils von 5% auf 30% die CO₂-Emissionen in der **Hochofenroute** von **2.183** auf **1.728 kg CO₂/t Stahl** gesenkt werden können. In der **Elektrostahlroute** können infolge der Verwendung von 100% Eisenschrott Rund- und Baustähle mit CO₂-Emissionen von nur **247 kg CO₂/t Stahl** hergestellt werden. Die niedrigen CO₂-Emissionen sind unter anderem durch die geringen spezifischen Emissionen der österreichischen Stromaufbringung möglich. Im Vergleich dazu würden sich die CO₂-Emissionen bei der Elektrostahlroute inklusive Vorkette mit 100% Schrotteileil und Verwendung der deutschen Stromaufbringung mit 0,625 kg CO₂/kWh auf 452 kg CO₂/t Stahl erhöhen.

Der Rohstoffeinsatz im Elektrostahlverfahren ist flexibel. Neben einem Schrottanteil von 100% sind sowohl Kombinationen aus Schrott, Eisenschwamm und flüssigem Roheisen (aus der Hochofenroute) möglich. Dennoch werden in den meisten Fällen ausschließlich 100% Schrott als Eisenträger eingesetzt (höchste Ofeneffizienz). In Abb. 46 ist die Massenbilanz eines Lichtbogenofens dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die maximalen Emissionen infolge des Elektrostahlverfahrens mit einem Lichtbogenofen 250 kg/t Stahl betragen (inklusive Sauerstoff). Für die Herstellung von Edelstählen sind mehr legierter Stahlschrott und Legierungszusätze als für Bau- und Bewehrungsstähle einzusetzen.

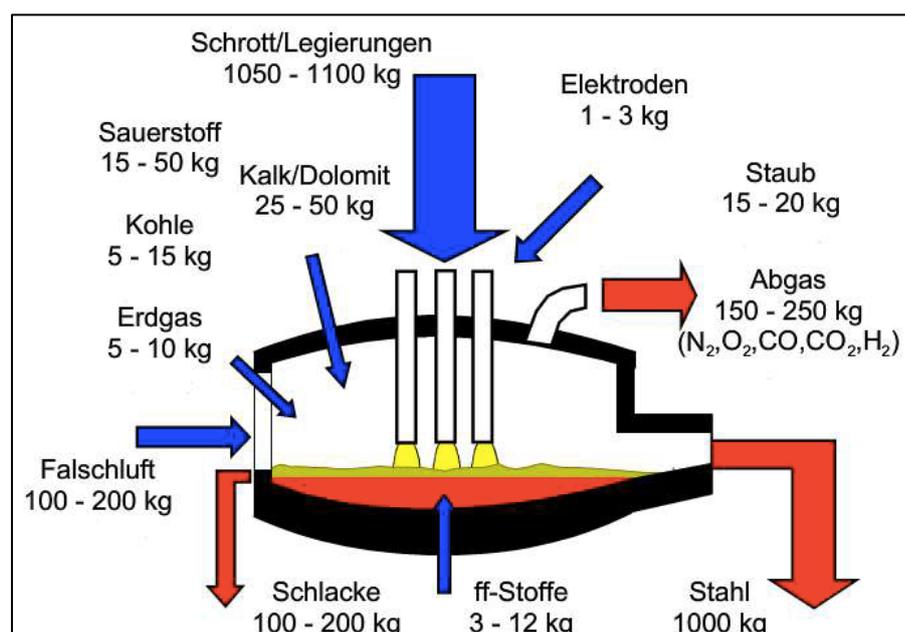


Abb. 46: Massenbilanz Lichtbogenofen – Elektrostahlverfahren [59]

5.3.2.3 Zusammenfassung Bewehrungsstahl

Bewehrungsstähle werden in Elektrostahlwerken mit Sekundärrohstoffen (Schrott) hergestellt. Die CO₂-Emissionen mit einem Schrottanteil von 100% betragen inklusive der Vorkette 247 kg CO₂/t Stahl (siehe Tab. 11, Seite 67).

Für die Berechnungen der baubetrieblichen CO₂-Emissionen des MKW Puntigam (Kapitel 7) werden für den Bewehrungsstahl die Emissionen infolge der Elektrostahlherstellung mit **247 kg CO₂/t Stahl** berücksichtigt. Das bedeutet, dass der Bewehrungsstahl mit 100% Schrottanteil hergestellt wurde. Die CO₂-Emissionen infolge der Primärproduktion des Schrottes mit der Hochofenroute werden nicht berücksichtigt, da der Schrott ursprünglich für einen anderen Zweck produziert und verwendet wurde.

5.4 CO₂-Emissionen infolge des Stromverbrauchs

Elektrische Energie ist ein wichtiger Energieträger in der Baubranche. Diese wird auf einer Baustelle hauptsächlich für den Antrieb von Maschinen und Geräten (Standmotoren), Beleuchtung und EDV sowie für Heizungs- und Klimaanlage in Baustellencontainern (Büro, Aufenthalts- und Sanitärcontainer) benötigt. Der Bedarf an elektrischer Energie unterscheidet sich wiederum nach Baustellenart und Baustellengröße.

Elektrische Antriebsmotoren besitzen gegenüber Verbrennungsmotoren einige Vorteile. Unter anderem zeichnen sich Elektromotoren durch geringere Störanfälligkeiten, weniger Wartungsbedarf, einen größeren nutzbaren Drehmomentbereich und guten Wirkungsgrad aus. Zudem reduzieren Elektromotoren die Luftschadstoffe auf Baustellen, da sie keine THG erzeugen. Typische Tätigkeiten von Maschinen mit Elektromotoren auf einer Baustelle sind [53]:

- **Heben und Fördern von Lasten:** Turmdrehkrane, z.B. Laufkatzausleger
- **Betonherstellung und -arbeiten:** Mischanlage, Rüttler, Verdichter
- **Pumpen:** Beförderung von Beton und Grundwasser
- **Bohren, Schleifen und Schweißen**

5.4.1 Emissionsfaktor Baustellenstrom

Für die Berechnungen der CO₂-Emissionen infolge des Stromverbrauchs einer Baustelle wird die österreichische *Stromaufbringung* (Erzeugermix inklusive Stromimporte) und nicht der Verbrauchermix eines spezifischen Energieversorgers herangezogen.

Für die Stromaufbringung Österreichs werden die Strommengen aus den verschiedenen Primärenergieträgern in das Stromnetz („Stromsee“) eingespeist und an die Endkunden*innen geliefert. Durch die spezielle Zuteilung eines erneuerbaren Energieträgers (z.B. Wasserkraft) werden die THG-Emissionen je bezogener Kilowattstunde reduziert, während die THG-Emissionen der bezogenen Kilowattstunden für die restlichen Kunden*innen erhöht werden (Nutzung anderer Energieträger, z.B. fossile Energie). Aus diesem Grund werden für die Berechnung der CO₂-Emissionen des Baustellenstroms die CO₂-Emissionen der österreichischen Stromaufbringung verwendet. Abb. 47 visualisiert die Einspeisung der unterschiedlichen Primärenergieträger in das Stromnetz und die anschließende Verteilung an die Kunden*innen [vgl. [37]]

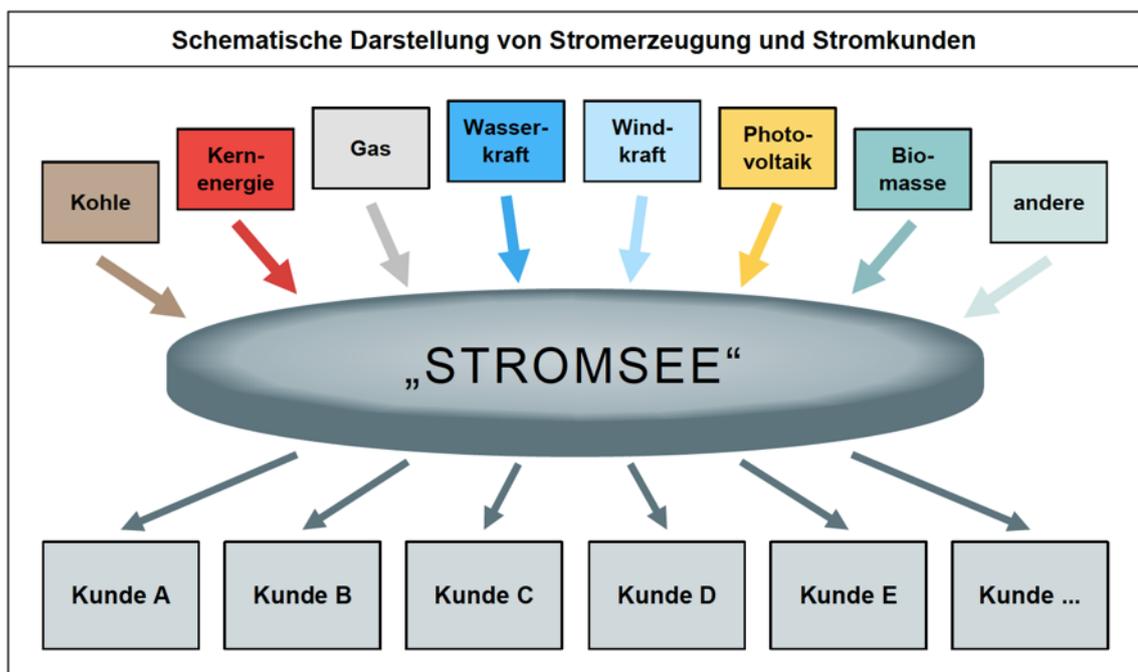


Abb. 47: Darstellung von Stromerzeugung und -kunden [37]

Das österreichische Umweltbundesamt unterscheidet hinsichtlich der THG-Emissionsfaktoren von Strom in drei Kategorien: Stromaufbringung, Kraftwerkspark und Umweltzeichen „Grüner Strom“. Die Basis für die Berechnung der THG-Emissionen des Energieträgers Kraftwerkspark ist der Erzeugermix von Österreich (siehe Abb. 30, Seite 44). Die Stromaufbringung von Österreich inkludiert zusätzlich zu den Emissionen des Kraftwerksparks die Emissionen aus Stromimporten. Der Emissionsfaktor der Stromimporte ergibt sich aus den Emissionsfaktoren der Importländer. Das Umweltzeichen „Grüner Strom“ berücksichtigt THG-Emissionen aus reinen erneuerbaren Energieträgern und wird durch den Stromerzeugungsmix der größten Anbieter ermittelt [vgl. [51]].

In Tab. 12 sind die Treibhausgasemissionsfaktoren Österreichs aus dem Jahr 2019 für die Stromaufbringung, den Kraftwerkspark und das Umweltzeichen „Grüner Strom“ dargestellt.

Tab. 12: THG-Emissionsfaktoren Strom, 2019 [vgl. [51]]

THG-Emissionsfaktoren von Strom in Österreich, 2019	
Energieträger	THG-Emissionen [g CO ₂ eq/kWh]
Stromaufbringung 2019	258
Kraftwerkspark	196
Umweltzeichen Grüner Strom	16

In den aktuellen Publikationen des Umweltbundesamtes sind keine Angaben zu den reinen CO₂-Emissionsfaktoren der Stromaufbringung ersichtlich. Infolgedessen wurde der aktuelle CO₂-Emissionsfaktor via E-Mail an die zuständige Expertin für Energie und Ökobilanzen vom Umweltbundesamt erfragt. Laut dieser beträgt der aktuelle CO₂-Emissionsfaktor für die Stromaufbringung Österreichs **255 g CO₂/kWh** [60]. Dieser Wert wird für die Berechnung der CO₂-Emissionen infolge des Stromverbrauchs auf der Baustelle des MKW Puntigam in Kapitel 7 verwendet.

6. Typische Laufwasserkraftwerke

Die Flusskraftwerke entlang der Mur in der Steiermark sind aufgrund ihrer Ausbauwassermenge von ungefähr $200 \text{ m}^3/\text{s}$ nahezu alle mittelgroße Flusskraftwerke. Infolgedessen ist deren Bauweise sehr ähnlich.

Das jüngst erbaute Murkraftwerk ist das MKW Puntigam. Die Inbetriebnahme des MKW erfolgte am 07. September 2019 nach ca. 33 Monaten Bauzeit der Hauptgewerke. Das MKW Puntigam hat eine Engpassleistung von 17,7 MW und ein Jahresarbeitsvermögen von 82 GWh.

Die Bau- und Funktionsweise des MKW Puntigam basiert auf den zuvor erbauten Wasserkraftwerken Gössendorf (18,75 MW) und Kalsdorf (18,5 MW) südlich von Graz. Die Inbetriebnahme der beiden Kraftwerke erfolgte 2012 beziehungsweise 2013. Die Krafthäuser der drei Murkraftwerke bestehen jeweils aus zwei Maschinensätzen mit Kaplan-Rohrturbinen. Der größte Unterschied zwischen den Kraftwerken liegt in der Wehranlage. Die Wehranlage der Kraftwerke Puntigam und Gössendorf besteht aus drei Wehrfeldern, während die Wehranlage des Kraftwerkes Kalsdorf aus zwei Wehrfeldern besteht [vgl. [61]]. Die wichtigsten Daten der drei zuletzt erbauten Wasserkraftwerke Puntigam, Gössendorf und Kalsdorf sind in Tab. 13 zusammengefasst. Die Kraftwerke sind in den Abbildungen auf der nächsten Seite (Seite 73) dargestellt.

Tab. 13: Daten MKW Puntigam, Gössendorf, Kalsdorf [vgl. [61, 62]]

Technische Daten der Murkraftwerke: Puntigam, Gössendorf, Kalsdorf			
	Puntigam	Gössendorf	Kalsdorf
Inbetriebnahme:	2019	2012	2013
Engpassleistung [MW]:	17,7	18,75	18,5
Regelarbeitsvermögen [GWh]:	82	87	79
Fallhöhe (bei Q_A) [m]:	9,6	11,18	11,21
Ausbauwassermenge Q_A [m^3/s]:	200	200	200
Investition [MEUR]:	85	90	86



Abb. 48: MKW Puntigam vom 15. März 2021, eigene Aufnahme



Abb. 49: MKW Gössendorf [62]



Abb. 50: MKW Kalsdorf [63]

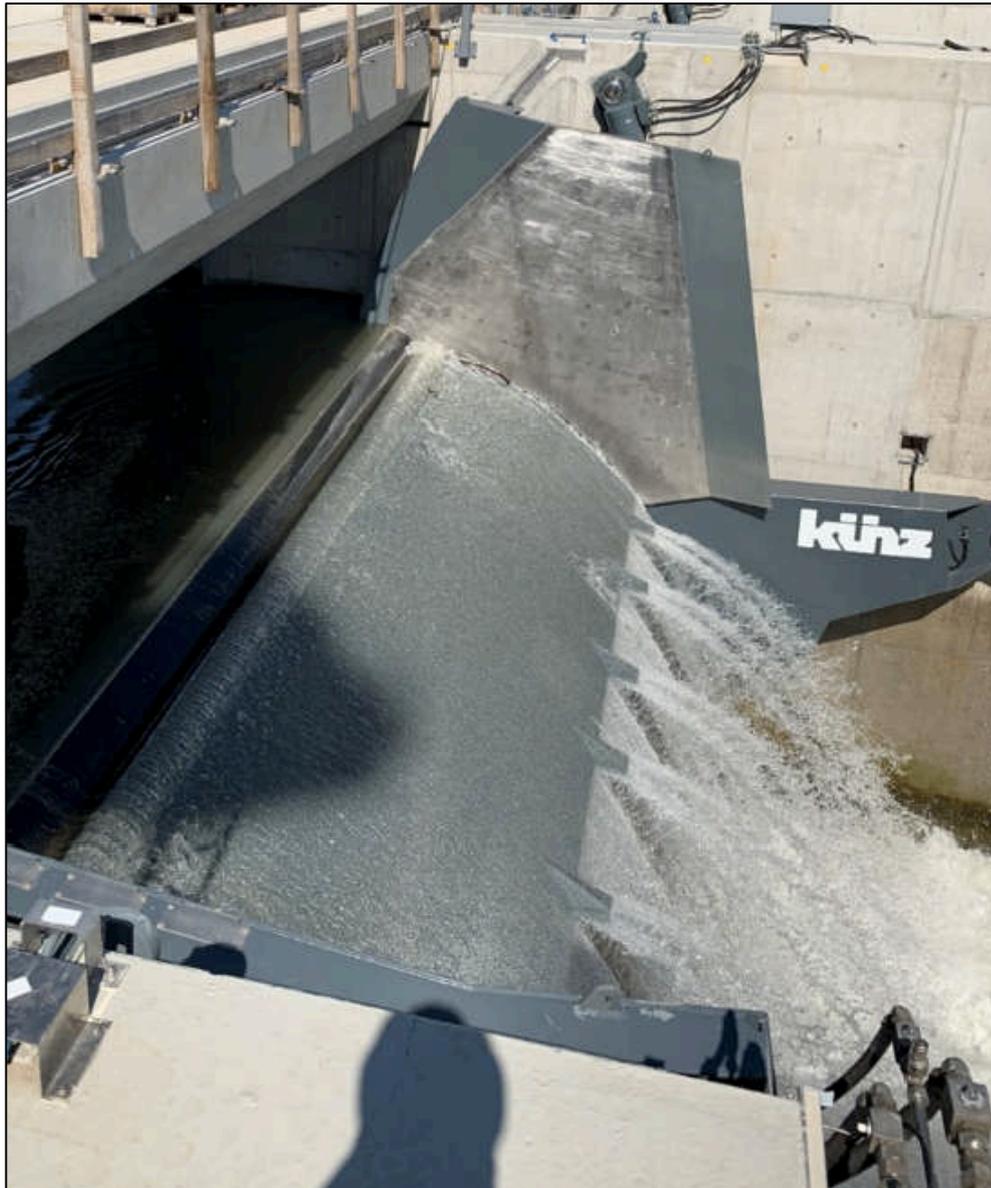


Abb. 52: Wehranlage mit umgelegter Klappe [65]

Die Fallhöhen der Murkraftwerke zwischen Oberwasser und Unterwasser betragen 9,6 m bis 11,2 m. Um diese Fallhöhen generieren zu können wurden im Oberwasser die Dämme entlang des Ufers der Mur um die Höhendifferenz vom Bestand zum Stauziel (inklusive Freibord) aufgeschüttet und die Sohle im Unterwasser eingetieft. Damit der Bestand-Grundwasserspiegel durch den erhöhten Wasserspiegel im Stauraum nicht beeinflusst wird, wurden die Uferbegleitdämme mit Schmalwänden und Drainagen ausgestattet (Abb. 53, Seite 76).

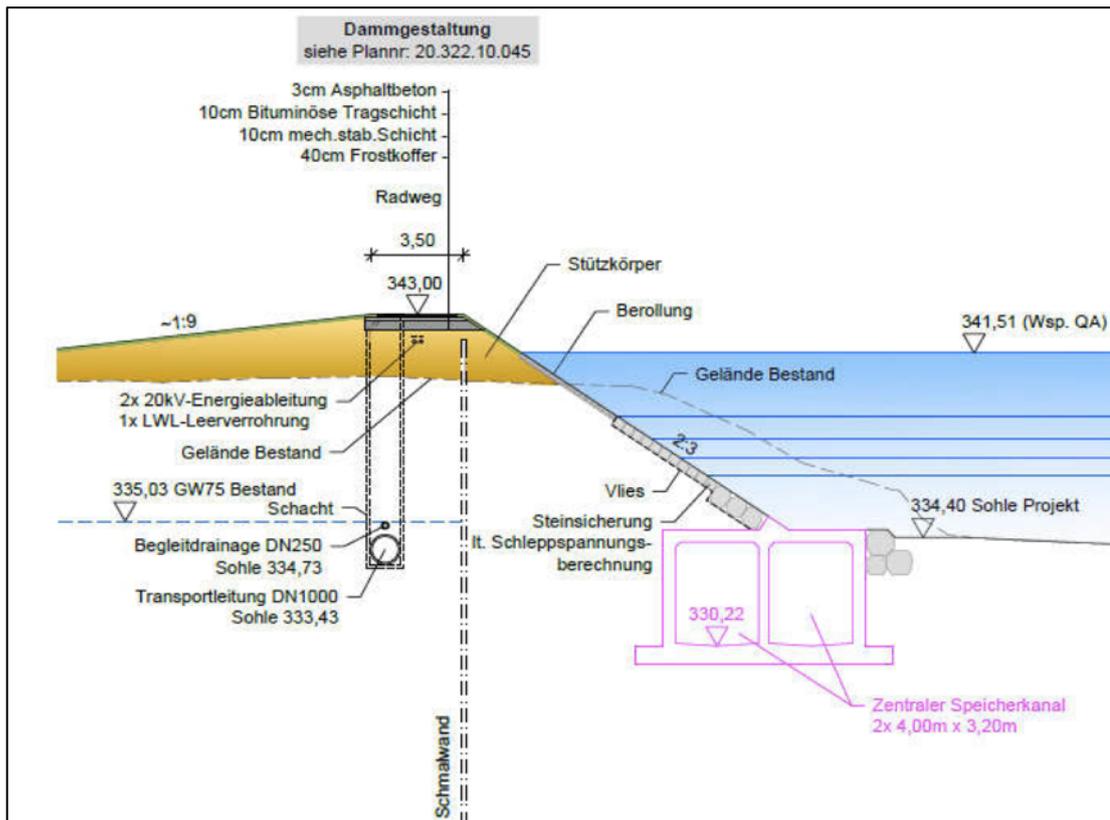


Abb. 53: Dammkörper mit Schmalwand und Drainage [65]

6.1.1 Ökologische Maßnahmen rund um die Murkraftwerke

Bei der Errichtung der Murkraftwerke Puntigam, Gössendorf und Kalsdorf wurden in Summe 45 Millionen Euro des gesamten Investitionsvolumens für ökologische Maßnahmen rund um die Kraftwerke investiert. Diese Maßnahmen gleichen den – durch den Bau der Kraftwerke – verlorenen Lebensraum von Fauna und Flora aus bzw. erweitern ihn. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden nur einige Ökomaßnahmen thematisiert. Auf der Homepage der Energie Steiermark können alle ökologischen Maßnahmen (über 200) in den Maßnahmenkatalogen der Kraftwerke nachgelesen werden [vgl. [61, 62]].

Als ökologische Maßnahmen wurden hauptsächlich neue Habitate für sämtliche Kleinlebewesen mithilfe von Fledermauskästen, Auwäldern, Inseln und Flachwasserzonen mit Versteckplätzen (Stein- und Holzhaufen) errichtet. Anbindungen von neuen Nebengewässern dienen als Laich und Jungfischhabitate. Um den Fischen einen Rückzugsraum bei Hochwasser zu geben, wurden zusätzliche Fischbuchten entlang der Mur errichtet. Zudem wurde auf die

Wiederaufforstung innerhalb des Projektgebiets geachtet. Da für je zwei gerodete Bäume oder Büsche drei nachgepflanzt wurden, erhielt Graz durch die Errichtung des jüngsten Murkraftwerkes in etwa 3.000 zusätzliche Bäume [vgl. [61]]. In den folgenden Abbildungen sind einige Ökomaßnahmen rund um die Murkraftwerke dargestellt. Abb. 54 zeigt Flachwasserzonen im Oberwasserbereich. In Abb. 55 sind Aufweitungen im Unterwasserbereich ersichtlich. Durch die Degradierung der Mur wird die Gewässermorphologie verbessert und die Uferlinien werden verlängert [vgl. [62]].



Abb. 54: Flachwasserzonen im Oberwasser [62]

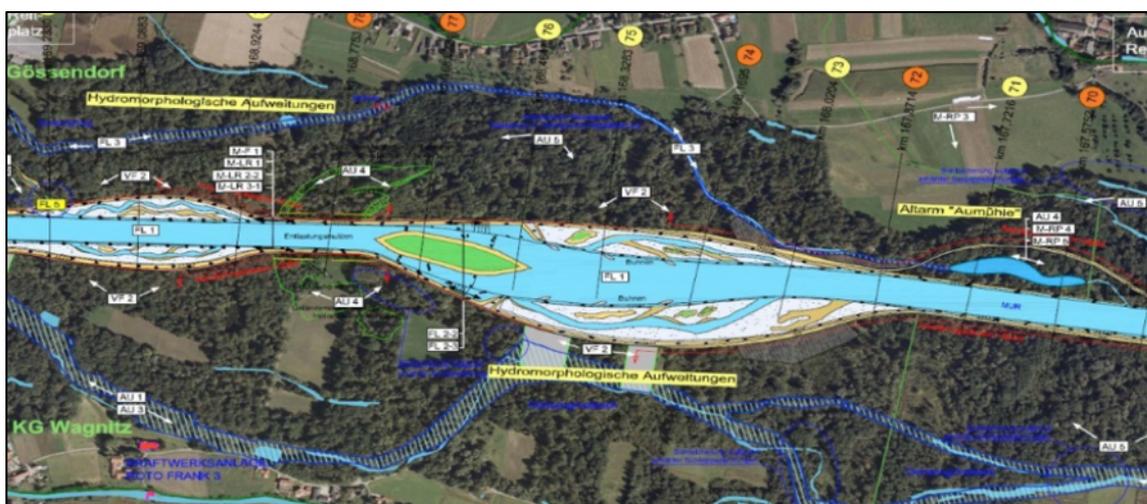


Abb. 55: Aufweitungen der Mur im Unterwasserbereich [62]



Abb. 56: Vernetzung Haupt- und Nebengewässer [62]

Eine der wichtigsten Ökomaßnahmen ist die Erhaltung der Fischwanderung in der Mur. Um diese zu gewährleisten, wurden Fischaufstiege beim Bau der Murkraftwerke mitberücksichtigt. Als Fischaufstiegsbauwerke wurden naturnahe und technische Beckenpässe, sowie Vertical-Slot-Schlitzpässe angewandt (Abb. 57).



Abb. 57: Naturnaher Beckenpass (li.), Vertical-Slot-Schlitzpass (re.) [66]

Des Weiteren wurde versucht bei der Vergabe der Aufträge für die Errichtung des Kraftwerks heimische (steirische) Unternehmen zu bevorzugen. In diesem Sinne wurden etwa 90% der Aufträge an die heimische Wirtschaft vergeben, wodurch sowohl die regionalen Unternehmen gefördert als auch CO₂-Emissionen aufgrund von kürzeren Anfahrten eingespart wurden [vgl. [62]].

Eine baubetriebliche und ökologische Maßnahme beim Bau von Flusskraftwerken ist die Wiederverwendung des Aushubmaterials. Nach dessen Aufbereitung mit der Kiessortieranlage können der wiedergewonnene Kies und Sand als Zuschlagstoffe für die Betonherstellung in der Betonmischanlage vor Ort für das Hinterfüllen von Bauwerken und für Drainagen verwendet werden.

Infolge der Errichtung des Flusskraftwerkes wurden neben den vielen Ökomaßnahmen auch Maßnahmen für Naherholungsgebiete am Murufer geschaffen. Entlang der Mur entstehen unter anderem neue Radwege, Naturerlebnispfade, Promenaden und Badeplätze.

Um die Flussqualität der Mur zu erhöhen, wurde gleichzeitig mit dem Kraftwerksbau Graz-Puntigam auch mit dem Bau eines zentralen Speicherkanals (Sammel- und Entlastungskanal) in der Stadt Graz begonnen. Der Eigentümer des zentralen Speicherkanals ist die Holding Graz. Die Investitionssumme für die Errichtung des zentralen Speicherkanals betrug rund 80 Millionen Euro. Der Speicherkanal verläuft unterirdisch entlang des linken Murufers und verhindert, dass bei Starkregenereignissen das Mischwasser (Schmutz- und Regenwasser) des überlasteten Kanalsystems von Graz in die Mur eingeleitet wird. Hierfür sammelt der Speicherkanal das Mischwasser im Bereich des Kraftwerkstauraumes auf und leitet es kontrolliert zur Kläranlage ab [vgl. [67]]. Der Querschnitt des zentralen Speicherkanals ist in Abb. 53 (Seite 76) ersichtlich.

7. CO₂-Emissionen infolge der Kraftwerkerrichtung

7.1 Ermittlung der baubetrieblichen CO₂-Emissionen

Für die Ermittlung der CO₂-Emissionen infolge der Errichtung eines typischen MKW werden zunächst die in Kapitel 5 erarbeiteten CO₂-Emissionsfaktoren in Tab. 14 zusammengefasst.

Tab. 14: Zusammenfassung der erarbeiteten CO₂-Emissionsfaktoren [e. D.]

Zusammenfassung der erarbeiteten CO ₂ -Emissionsfaktoren			
Energieträger/Materialien		Emissionsfaktor	Einheit
Fossile Kraftstoffe:	Benzin	2,80	[kg CO ₂ /l]
	Diesel	3,09	[kg CO ₂ /l]
Beton:	Zement	539	[kg CO ₂ /t]
Stahl:	Bewehrungsstahl	247	[kg CO ₂ /t]
	Primärstahl Hochofen	2.183	[kg CO ₂ /t]
Baustellenstrom:	Stromaufbringung Ö.	255	[kg CO ₂ /MWh]

Die Tabelle zeigt, wie bereits thematisiert, dass der Emissionsfaktor von Bewehrungsstahl aufgrund der Sekundärherstellung mit 100% Eisenschrottanteil im Elektrostahlverfahren erheblich geringer ist als jener der Primärherstellung im Hochofenverfahren mit 5% Schrottanteil.

Als nächster Schritt werden die Mengen der Energieträger „fossile Kraftstoffe“ und „elektrische Energie“ sowie die Materialmengen von Beton und Bewehrungsstahl des MKW Puntigam in Tab. 15 (Seite 81) zusammengefasst. Die Mengendaten wurden von der Energie Steiermark für das MKW Puntigam überschlägig zur Verfügung gestellt. Aufgrund der vielen Leistungstätigkeiten von Subunternehmen konnten keine detaillierten Mengenangaben über die drei MKW Puntigam, Gössendorf und Kalsdorf bekannt gegeben werden.

Mithilfe der Betonmengen und des durchschnittlichen Zementgehalts kann die Gesamtzementmenge berechnet werden. Als durchschnittlicher Zementgehalt

werden 300 kg pro Kubikmeter Beton angenommen. Der Strombedarf auf der Baustelle betrug mit circa 4,8 GWh rund 1,8% der gesamten Jahresstromerzeugung der Energie Steiermark. Das entspricht einen monatlichen Stromverbrauch der Baustelle von in etwa 145 MWh/Monat (33 Monate Bauzeit).

Tab. 15: Mengenkalkulation MKW Puntigam [vgl. [62]]

Mengkalkulation Murkraftwerk Puntigam		
Energieträger und Materialien		Mengen
Fossile Kraftstoffe:	Diesel	5.000.000 [l]
Beton:	/	40.000 [m ³]
	Zement (300 kg/m ³)	12.000 [t]
Stahl:	Bewehrungsstahl	8.000 [t]
Elektrische Energie:	Stromaufbringung	4.800 [MWh]

Für die Berechnung der CO₂-Emissionen infolge der Errichtung des MKW Puntigam werden die Emissionsfaktoren (Tab. 14, Seite 80) mit den jeweiligen Mengen der Energieträger und Materialien (Tab. 15, Seite 81) multipliziert und anschließend aufsummiert. Die Berechnung ist in Tab. 16 dargestellt.

Tab. 16: Berechnung der baubetrieblichen CO₂-Emissionen [e. D.]

Berechnung der baubetrieblichen CO ₂ -Emissionen				
MKW	Energieträger/ Materialien	CO ₂ - Emissionsfaktor	Menge	tCO ₂ - Emissionen
Puntigam	Diesel	3,09 [kg/l]	5.000.000 [l]	15.450 [tCO ₂]
	Zement (300kg/m ³)	539 [kg/t]	12.000 [t]	6.468 [tCO ₂]
	Bewehrungs- stahl	247 [kg/t]	8.000 [t]	1.976 [tCO ₂]
	Strom- aufbringung	255 [kg/MWh]	4.770 [MWh]	1.224 [tCO ₂]
	Summe			25.118 [tCO₂]

Tab. 16 (Seite 81) zeigt, dass infolge der Errichtung des MKW Puntigam die baubetrieblichen CO₂-Emissionen mit Berücksichtigung der erarbeiteten Emissionsfaktoren in Summe 25.118 t betragen. Bezieht man die entstandenen CO₂-Emissionen auf die Fallhöhe des Kraftwerks von 9,6 m entsteht ein Referenzwert von 2.616 tCO₂/m Fallhöhe. Aufgrund der ähnlichen Bauweisen und Bedingungen der anderen MKW Gössendorf und Kalsdorf wird angenommen, dass die baubetrieblichen CO₂-Emissionen infolge der Errichtung der Kraftwerke einen annähernd vergleichbaren Emissionsfaktor pro Fallhöhe aufweisen.

7.2 Baubetriebliche CO₂-Amortisation

Unter der baubetrieblichen CO₂-Amortisationszeit wird die Dauer bis zur Deckung der CO₂-Emissionen durch die Errichtung eines Kraftwerks mit jenen der eingesparten Emissionen infolge des Betriebes verstanden. Diese ergeben sich aufgrund des praktisch emissionsfreien Betriebes des Kraftwerkes gegenüber einer anderen Kraftwerksanlage.

Die Kohlenstoffdioxideinsparung eines Laufwasserkraftwerkes gegenüber einem anderen Kraftwerkstypen kann mithilfe des Jahresarbeitsvermögens und des spezifischen Emissionsfaktors (in g CO₂/kWh) ermittelt werden. Für den Vergleich der CO₂-Einsparung werden im Regelfall die CO₂-Emissionen des nächstgelegenen Kraftwerks mit fossilem Energieträger herangezogen. Im Fall der Murkraftwerke ist das nächstgelegene fossile Kraftwerk das Fernheizkraftwerk Mellach (Kohlekraftwerk) in der Südsteiermark. Aufgrund der allgemeinen stetigen Reduzierung von Kraftwerken mit fossilem Energieträger wurde im April 2020 der Kohlebetrieb im Fernheizkraftwerk Mellach offiziell eingestellt. Da dieses Kraftwerk das letzte mit Kohle (Steinkohle) betriebene Kraftwerk in Österreich war, war die Schließung des Kraftwerkes ein historisch großer Schritt für Österreich. Die weiteren Kohlekraftwerke Dürnrohr, Voitsberg, Zeltweg und St. Andrä wurden in den vergangenen 15 Jahren stillgelegt [vgl. [68]].

Das Kohlekraftwerk Mellach wurde von 1983 bis 1986 errichtet und produzierte insgesamt 34 Jahre lang Energie (Strom und Wärme) für den Großraum Graz.

Das Fernheizkraftwerk hatte eine elektrische Leistung von 240 MW sowie eine thermische Leistung von bis zu 230 MW. Das Kraftwerk Mellach versorgte rund 80% der Grazer Haushalte mit Fernwärme. Die hohe Wärmelieferung des Kraftwerks diente als Basis für den verstärkten Ausbau der Fernwärmeversorgung. Dies führte zu einem beträchtlichen Rückgang der Schadstoffemissionen infolge der Einzelheizanlagen in Graz. In Summe erzeugte das Fernheizkraftwerk Mellach in der Betriebszeit von 34 Jahren mehr als 30 Milliarden kWh (30 TWh) Strom und 20 Milliarden kWh (20 TWh) Fernwärme [vgl. [68]].

Um einen Engpass an elektrischer Energie zu vermeiden und die Netzstabilität zu erhöhen bleibt das Fernheizkraftwerk Mellach auf der Brennstoffbasis von Erdgas erhalten. Bei Bedarf an elektrischer Energie zur Stromnetzstützung kann das Kraftwerk kurzfristig betrieben werden [vgl. [68]]. Die Energie Steiermark gibt an, dass durch das MKW Puntigam 60.000 tCO₂ pro Jahr im Vergleich zum Fernheizkraftwerk Mellach eingespart werden können. In Relation mit dem Jahresarbeitsvermögen von 82 GWh des MKWs Puntigam ergibt sich für das Fernheizkraftwerk Mellach ein CO₂-Emissionsfaktor von 732 g CO₂/kWh. Die Berechnung des spezifischen Emissionsfaktors vom Kohlekraftwerk Mellach wird detailliert in Tab. 17 dargestellt.

Tab. 17: Emissionsfaktoren KW Mellach und MKW Puntigam [e. D.]

Emissionsfaktoren KW Mellach und MKW Puntigam		
	KW Mellach	MKW Puntigam
Jahresarbeitsvermögen [GWh/a]	82*	82
CO₂-Emissionen Betrieb [t CO₂/a]	60.000	0
Resultierender Emissionsfaktor [g CO₂/kWh]	732 ¹⁾	0

* gleiche Energiemenge für Vergleich

¹⁾ Berechnung: $60.000 \cdot 10^6 \text{ [g CO}_2\text{/a]} / 82 \cdot 10^6 \text{ [kWh/a]} = 732 \text{ [g CO}_2\text{/kWh]}$

Der berechnete Emissionsfaktor von 732 g CO₂/kWh wird in Tab. 19 (Seite 85) auch für die CO₂-Einsparung der anderen MKW Gössendorf und Kalsdorf berücksichtigt.

Die erzeugte Energie von Wasserkraftwerken wird zudem gerne mit der Anzahl von Haushalten, die mit dem erzeugten Strom versorgt werden können, angegeben. Bei diesem Vergleich ist vor allem auf die Angabe des referenzierten Stromverbrauchs zu achten. Der durchschnittliche Verbrauch eines Haushaltes unterscheidet sich nach der Haushaltsgröße, Anzahl und Art der Verbraucher sowie dem individuellen Nutzungsverhalten. Veranlasst durch diese Faktoren liegt der durchschnittliche Verbrauch eines Haushaltes zwischen 3.500 und 5.500 kWh/Jahr [30]. Zum Beispiel gibt die Energie Steiermark an, dass mit dem MKW Puntigam (Jahresarbeitsvermögen von 82 GWh) jährlich 20.000 Haushalte versorgt werden können. Dadurch ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch von 4.100 kWh/Jahr pro Haushalt. Dieser Verbrauch wird als Referenzwert für die Berechnung der jährlich versorgten Haushalte der beiden anderen Murkraftwerke Gössendorf und Kalsdorf herangezogen (Tab. 19, Seite 85).

Des Weiteren wird die regenerative Energieerzeugung von Kraftwerken häufig mit den CO₂-Emissionen von PKWs verglichen. Dahingehend entsprechen laut der Energie Steiermark die 60.000 tCO₂-Einsparung pro Jahr des MKW Puntigam den Emissionen von 36.000 PKW (VW Golf) mit einer Kilometerleistung von 15.000 km pro Jahr [vgl. [62]]. Das entspricht einem CO₂-Ausstoß des PKWs von 111 g CO₂/km. Die Berechnung wird in Tab. 18 dargestellt.

Tab. 18: Vergleich CO₂-Einsparung mit PKW [e. D.]

Vergleich CO₂-Einsparung mit PKW	
	PKW VW Golf
Anzahl [PKW]	36.000
Kilometerleistung pro Jahr [km/a]	15.000
CO₂-Emissionen Betrieb pro Jahr [t CO₂/a]	60.000
Resultierender Emissionsfaktor [g CO₂/PKW*km]	111 ¹⁾

¹⁾ Berechnung: $60.000 \cdot 10^6 \text{ [g CO}_2\text{/a]} / (36.000 \text{ [PKW]} \cdot 15.000 \text{ [km/a]}) = 111 \text{ [g CO}_2\text{/ PKW*km]}$

Die jährlich versorgten Haushalte und CO₂-Einsparungen der drei Murkraftwerke Puntigam, Gössendorf und Kalsdorf sowie die resultierende baubetriebliche Amortisationszeit vom MKW Puntigam sind in Tab. 19 dargestellt. Die zugehörige Berechnung ergibt sich aus den ermittelten CO₂-Emissionen infolge der Errichtung des MKW Puntigam (Tab. 16, Seite 81) dividiert durch die CO₂-Einsparung im Vergleich zum Kohlekraftwerk Mellach.

Tab. 19: Baubetriebliche CO₂-Amortisationszeit MKW Puntigam [e. D.]

	MKW Puntigam	MKW Gössendorf	MKW Kalsdorf
Jahresarbeitsvermögen [GWh]	82	87	79
Leistung [MW]	17,7	18,75	18,5
Jährlich versorgte Haushalte*	20.000	21.220	19.268
CO₂-Einsparung** [t CO₂/a]	60.000	63.684 ¹⁾	57.828 ²⁾
Baubetriebliche CO₂-Emissionen lt. Tab. 16 (Seite 81) [t CO₂]	25.118	/	/
CO₂-Amortisationszeit [Jahre]	0,42 ³⁾	/	/

* 4100 kWh/Jahr und Haushalt

** gegenüber dem Kohlekraftwerk Mellach (732g CO₂/kWh)

¹⁾ Berechnung: $732 \cdot 10^{-6} \text{ [t CO}_2\text{/kWh]} \cdot 87 \cdot 10^6 \text{ [kWh/a]} = 63.684 \text{ [t CO}_2\text{/a]}$

²⁾ Berechnung: $732 \cdot 10^{-6} \text{ [t CO}_2\text{/kWh]} \cdot 79 \cdot 10^6 \text{ [kWh/a]} = 57.828 \text{ [t CO}_2\text{/a]}$

³⁾ Berechnung: $25.118 \text{ [t CO}_2\text{]} / 60.000 \text{ [t CO}_2\text{/a]} = 0,42 \text{ [a]}$

Tab. 19 zeigt, dass sich die baubetrieblich entstehenden CO₂-Emissionen infolge der Errichtung des MKW Puntigam nach 0,42 Jahren bzw. 5,04 Monaten amortisieren. Das bedeutet, dass das MKW Puntigam nach einer nur kurzen Betriebszeit vollständigen, emissionsfreien Strom im Sinne der CO₂-Amortisation erzeugt.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die in der Arbeit thematisierten Klima- und Energieziele zeigen, dass eine klimaneutrale und nachhaltige Energiegewinnung unentbehrlich ist, um dem anthropogenen Klimawandel entgegenzuwirken bzw. diesen zu stoppen. Besonders die Ziele der Europäischen Union für 2030 und 2050 verdeutlichen die Pläne für eine klimaneutrale Zukunft. Infolgedessen hat sich auch Österreich für 2030 eine vollkommen klimaneutrale elektrische Energiegewinnung zum Ziel gesetzt. Global betrachtet fehlen jedoch aktuell Akzeptanz und realistische Maßnahmen zur Umsetzung seitens der Regierungen, um diese Ziele zu erreichen. Beispielsweise ist das Fehlen einer klimaneutralen akzeptierten Fortbewegungstechnologie weiterhin ein großer Problemfaktor in unserer Gesellschaft. Dennoch müssen die Treibhausgasemissionen weiterhin reduziert und der Klimawandel verlangsamt werden, um auch den kommenden Generationen letzten Endes einen lebenswerten Planeten zu hinterlassen.

Die Baubranche weist den achtgrößten Endenergieverbrauch (EEV) aller dreizehn betrachteten Industrien auf (Kapitel 5). Folglich liegt die Baubranche im EEV im unteren Mittelfeld. Rund 55% des gesamten EEV werden durch fossile Kraftstoffe verursacht. Ausgehend von dem hohen Kraftstoffbedarf an Baustellen sind die Treibhausgasemissionen der Baubranche sehr hoch. Möglichkeiten für die Reduktion des fossilen Kraftstoffverbrauchs liegen vor allem in der Antriebstechnik der Motoren. Aktuell gibt es jedoch keine konkurrenzfähigen und klimaneutralen Antriebe für Verbrennungsmotoren auf Baustellen. Dennoch können die Emissionen von Verbrennungsmotoren durch Optimierungen des Fuhrparks (neuere, sparsamere Motoren), der Transportkette und der Geräteauslastung erheblich gesenkt werden. Ein mögliches Nachhaltigkeitskonzept für die Reduzierung von CO₂-Emissionen infolge Verbrennungsmotoren ist die Integrierung des CO₂-Ausstoßes in die Ausschreibung. Zum Beispiel könnten die Auftraggeber eine detaillierte Auflistung der zu erwartenden CO₂-Emissionen anhand der baubetrieblichen Tätigkeiten laut Ausschreibung seitens der Auftragnehmer fordern. Aus den resultierenden CO₂-Emissionen kann Aufschluss über den Fuhrpark des Auftragnehmers erfolgen. Infolgedessen kann

neben den Baukosten (Bestbieterprinzip) auch der CO₂-Ausstoß ein wichtiger Indikator für die Erlangung des Zuschlages bei Bauvergaben werden.

Für die Umsetzung dieses Konzepts wird vorgeschlagen die Baugeräteliste zu modifizieren. Als Beispiel für eine typische Baugeräteliste ist die Geräteliste vom MKW Puntigam im Anhang (Seite 103) dargestellt. In Summe enthält sie 103 Geräte mit folgenden Gerätegruppen (Tab. 20):

Tab. 20: Gerätegruppen MKW Puntigam [e. D.]

Gerätegruppen MKW Puntigam	
Kettenbagger	Minibagger
Radbagger	Raupenbagger
Hydroseilbagger	Radlader
LKW (3 und 4 Achsen)	Dump Truck
Kleindumper	Manitou
Telekran	Grader
Walzen	Rammen
Bohrgeräte	Traktoren

Neben den üblichen Parametern wie **Gerät**, **Type**, **Firma**, **Abgasnorm** und **Leistung** kann die Baugeräteliste mit der **Arbeitszeit**, dem **Auslastungsgrad**, dem **Treibstoffverbrauch** und der **Tankmenge** erweitert werden. Mithilfe der zusätzlichen Parameter können die **tatsächlichen CO₂-Emissionen** durch die Verbrennungsmotoren in regelmäßigen Intervallen ermittelt werden. Das Monitoring-Konzept kann anschließend als Vergleichswert für den in der Ausschreibung angegebenen CO₂-Ausstoß dienen.

Des Weiteren wird durch die Nutzung regionaler Unternehmen die Anfahrt zur Baustelle geringer, wodurch wiederum CO₂-Emissionen eingespart werden können. Neben den fossilen Kraftstoffen verursachen die verwendeten Baustoffe durch den Herstellungsprozess und Prozess aus Vorketten zum Teil hohe CO₂-Emissionen. Zusätzlich zu dem Herstellungsprozess der Baustoffe können auch hohe rohstoffbedingte CO₂-Emissionen entstehen wie zum Beispiel bei Zement

durch Kalkstein. Wie in dieser Arbeit thematisiert entstehen bei Zement rund zwei Drittel der CO₂-Emissionen rohstoffbedingt, wohingegen ein Drittel durch den Energieaufwand entstehen.

Das Ergebnis der baubetrieblichen CO₂-Amortisation vom MKW Puntigam auf Grundlage der ermittelten Emissionsfaktoren Diesel, Zement, Stahl und Stromaufbringung beträgt 0,42 Jahre. Infolgedessen amortisiert sich das MKW Puntigam baubetrieblich knapp unter einem halben Jahr. Im Hinblick auf die Lebensdauer von Laufkraftwasseranlagen (mehr als 100 Jahre) ist die CO₂-Amortisationszeit sehr gering.

Das bedeutet wiederum, dass die baubetrieblichen CO₂-Emissionen für die Errichtung eines Murkraftwerks im Verhältnis zu der CO₂-Einsparung gegenüber einem fossilen Kraftwerk sehr niedrig sind. Der Grund für die geringen CO₂-Emissionen bei der Errichtung eines MKW ist der global betrachtet niedrige Emissionsfaktor der Stromaufbringung in Österreich. Mithilfe des niedrigen Emissionsfaktors werden bereits bei der Herstellung und Bereitstellung von Roh- und Baustoffen CO₂-Emissionen eingespart. Beispielsweise sind in Deutschland alle herstellungsbedingten Emissionen von Baustoffen deutlich höher, da der Emissionsfaktor der deutschen Stromaufbringung im Vergleich zur österreichischen Stromaufbringung um das Zweieinhalb- bis Dreifache höher ist. Das heißt, dass abhängig von dem Emissionsfaktor der Stromaufbringung die entstehenden CO₂-Emissionen durch die Errichtung eines Bauwerks erheblich variieren. Infolgedessen werden durch die geplante, vollkommen regenerative elektrische Energieerzeugung Österreichs bis 2030 die CO₂-Emissionen in der Baubranche signifikant reduziert.

Weiteres Potential zur Minimierung von Treibhausgasemissionen liegt in der konsequenten Aufklärung von Mitarbeiter*innen über Nachhaltigkeit im Allgemeinen und die Nachhaltigkeit auf Baustellen im Speziellen. Gezielte Mitarbeiterschulungen können zu einem ressourcenschonenderen Umgang mit Rohstoffen führen. Durch wirkungsvolle Recyclingprozesse und die Wiederverwendung von Materialien können ebenso die CO₂-Emissionen am Bau reduziert werden. Zudem können durch effizientere Bauteildimensionierungen baustoffbedingte CO₂-Emissionen – gegenüber den heutigen noch meist

konservativ ausgeführten Konstruktionen – eingespart werden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist die Einführung einer einheitlichen CO₂-Steuer. Eine faire CO₂-Bepreisung innerhalb Europas sollte für das Erreichen der Klimaschutzziele angestrebt und so bald wie möglich von der Europäischen Union eingeführt werden. Damit die zukünftige Klimaneutralität jedoch nicht verzerrt wird muss bei der Umsetzung eines CO₂-Steuermodells auf den Import (graue Energie) geachtet werden.

Die klimaneutrale Energiegewinnung mithilfe der Wasserkraft ist fester Bestandteil des globalen Strommix. Daher wird die Erreichung der Klimaschutzziele ohne den weiteren Aus- und Neubau von Wasserkraftwerken nicht möglich sein. Nach aktuellem Stand der Technik fehlen alternative Möglichkeiten und Technologien für eine gleichermaßen effiziente und regenerative Energieerzeugung (im Hinblick auf den Erntefaktor, Seite 32), wie es bei Wasserkraft der Fall ist. In Summe werden der konsequente Ausbau aller bisher etablierten erneuerbaren Energiequellen (wie Wasserkraft, Wind und Photovoltaik), die vollständige Integrierung von Nachhaltigkeit im Alltagsleben sowie die weitere Forschung an und Entwicklung von neuen Technologien der Schlüssel für die Erreichung einer klimaneutralen Zukunft sein.

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Covid19	Corona Virus Disease 2019
EEV	Endenergieverbrauch
e.D.	eigene Darstellung
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
FAH	Fischaufstiegshilfe
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
MKW	Murkraftwerk
NMVOC	Flüchtige organische Verbindungen
PKW	Personenkraftwagen
THG	Treibhausgas
TTW	Tank-to-Wheel
LKW	Lastkraftwagen
USA	United States of America
vgl.	Vergleich
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel
z.B.	zum Beispiel

Einheiten:

a	Jahr
bar	Bar
cm	Zentimeter
CO ₂ eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
GJ	Gigajoule
GWh	Gigawattstunde
kg	Kilogramm
km ²	Quadratkilometer
kW	Kilowatt
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
mbar	Millibar
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
mWS	Meter Wassersäule
müA	Meter über Adria
Nm	Newtonmeter
ppm	Parts per million
t	Tonne
TWh	Terawattstunde

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Treibhauseffekt [2]	4
Abb. 2: Vergangene Plattentektonische Bewegungen [4]	7
Abb. 3: Globale Temperaturen der letzten 542 Mio. Jahren [4]	8
Abb. 4: Globale Temperaturen der letzten 65,5 Mio. Jahren [4]	8
Abb. 5: Globale Temperaturen der letzten 5,3 Mio. Jahren [4]	8
Abb. 6: Temperaturen der Antarktis der letzten 0,42 Mio. Jahren [4]	9
Abb. 7: CO ₂ -Konzentration der letzten 0,8 Mio. Jahren [5]	10
Abb. 8: Anstieg der CO ₂ -Konzentration seit dem 18. Jahrhundert [5]	11
Abb. 9: Die Arktis vor 40 Jahren [1]	13
Abb. 10: Die Arktis im Jahr 2015 [1]	13
Abb. 11: Die Arktis in 40 Jahren [1]	14
Abb. 12: Prognostizierter Anstieg des Meeresspiegels [7]	15
Abb. 13: Überflutungsflächen (rot) an der Nordsee im Jahr 2050 [8]	15
Abb. 14: Starkregenereignis vom 16. April 2018 in Graz [9]	16
Abb. 15: Hitzetage Szenario Österreich [10]	17
Abb. 16: Emissionen, Prognosen und Ziele der EU [17]	24
Abb. 17: Emissionen von Österreich von 1990 bis 2018 inkl. 2020 Ziel [19]	25
Abb. 18: Erneuerbaren Energien 2018 und 2020 Ziel in der EU [19]	25
Abb. 19: Phasendiagramm Kohlenstoffdioxid [22]	28
Abb. 20: Schematische Darstellung Kohlenstoffkreislauf [24]	29

Abb. 21: Erntefaktor in der Energieerzeugung [29]	32
Abb. 22: Flusskraftwerk Gmunden, eigene Aufnahme	35
Abb. 23: Schematische Anordnung eines Ausleitungskraftwerkes [31]	36
Abb. 24: Prinzipskizze eines Pumpspeicherkraftwerks [31]	37
Abb. 25: Entwicklung Kraftwerkspark Österreich [19]	38
Abb. 26: Wasserkraft Europa – Installierte Leistung 2019 [vgl. [34]].....	40
Abb. 27: Wasserkraft Europa – Installierte Leistung/Fläche [vgl. [34, 35]].....	41
Abb. 28: Wasserkraft Europa – Bruttostromerzeugung 2018 [vgl. [36]]	42
Abb. 29: Wasserkraft Europa – Bruttostromerzeugung/Fläche [vgl. [36, 35]] ...	42
Abb. 30: Erzeugermix Österreich 2019 [vgl. [19]].....	44
Abb. 31: Stromimporte und -exporte von 1945 bis 2016 [37].....	45
Abb. 32: Erzeugermix – EU-27, 2018 [vgl. [41]]	46
Abb. 33: Erzeugermix – Erneuerbare Energien EU-27, 2019 [vgl. [42]].....	46
Abb. 34: Echtzeitdarstellung der CO ₂ -Emissionen in Europa, Erzeugung [38] .	47
Abb. 35: EEV nach Energieträgern und industriellen Sektoren [43].....	49
Abb. 36: Energieflussbild im Bau [43]	50
Abb. 37: Erdarbeiten MKW Puntigam vom 03. Juni 2017 [45].....	52
Abb. 38: Emissionskategorien fossiler Brennstoffe [46]	54
Abb. 39: Fertigungsfluss der Betonherstellung [53]	58
Abb. 40: Baustelle MKW Puntigam vom 05. Juli 2018, eigene Aufnahme	59
Abb. 41: Herstellungsprozess Zement [55]	60

Abb. 42: Spezifischer Energiebedarf Zementherstellung [54]	61
Abb. 43: Kalkkreislauf [52].....	62
Abb. 44: Stahlbetonbauteil unter Biegung, vor Rissbildung [57]	64
Abb. 45: Stahlbetonbauteil unter Biegung, nach Rissbildung [57]	64
Abb. 46: Massenbilanz Lichtbogenofen – Elektrostahlverfahren [59]	68
Abb. 47: Darstellung von Stromerzeugung und -kunden [37]	70
Abb. 48: MKW Puntigam vom 15. März 2021, eigene Aufnahme	73
Abb. 49: MKW Gössendorf [62].....	73
Abb. 50: MKW Kalsdorf [63]	73
Abb. 51: Querschnitt durch ein Wehrfeld – Prinzipskizze [64]	74
Abb. 52: Wehranlage mit umgelegter Klappe [65].....	75
Abb. 53: Dammkörper mit Schmalwand und Drainage [65]	76
Abb. 54: Flachwasserzonen im Oberwasser [62].....	77
Abb. 55: Aufweitungen der Mur im Unterwasserbereich [62]	77
Abb. 56: Vernetzung Haupt- und Nebengewässer [62].....	78
Abb. 57: Naturnaher Beckenbass (li.), Vertical-Slot-Schlitzpass (re.) [66].....	78

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Durchschnittliche Eistage pro Jahr in Österreich [vgl. [11]].....	18
Tab. 2: CO ₂ -Emissionen verschiedener Brennstoffe [vgl. [27]]	31
Tab. 3: Leistungsentwicklung österreichischer Wasserkraftwerke [vgl. [19]]	38
Tab. 4: Bruttostromerzeugung Wasserkraft 2019 [vgl. [19]].....	39
Tab. 5: Wasserkraft Europa und EU – Installierte Leistung 2019 [vgl. [34]].....	40
Tab. 6: Wasserkraft Europa und EU – Bruttostromerzeugung 2018 [vgl. [36]] .	41
Tab. 7: Energetischer Endenergieverbrauch der Industrien 2017 [vgl. [43]]	48
Tab. 8: Emissionsfaktoren Benzin [vgl. [48]]	55
Tab. 9: Emissionsfaktoren Diesel [vgl. [48]]	56
Tab. 10: CO ₂ -Emissionen Rohstahl primär inkl. Vorkette [40]	66
Tab. 11: CO ₂ -Emissionen Rohstahl sekundär inkl. Vorkette [vgl. [40]]	67
Tab. 12: THG-Emissionsfaktoren Strom, 2019 [vgl. [51]].....	71
Tab. 13: Daten MKW Puntigam, Gössendorf, Kalsdorf [vgl. [61, 62]]	72
Tab. 14: Zusammenfassung der erarbeiteten CO ₂ -Emissionsfaktoren [e. D.] ..	80
Tab. 15: Mengenkalkulation MKW Puntigam [vgl. [62]].....	81
Tab. 16: Berechnung der baubetrieblichen CO ₂ -Emissionen [e. D.].....	81
Tab. 17: Emissionsfaktoren KW Mellach und MKW Puntigam [e. D.].....	83
Tab. 18: Vergleich CO ₂ -Einsparung mit PKW [e. D.]	84
Tab. 19: Baubetriebliche CO ₂ -Amortisationszeit MKW Puntigam [e. D.]	85
Tab. 20: Gerätegruppen MKW Puntigam [e. D.]	87

Literaturverzeichnis

- [1] GEOlino, „GEOlino,“ [Online]. Available: <https://www.geo.de/geolino/natur-und-umwelt/2875-rtkl-globale-erwaermung-klimawandel-wie-der-mensch-die-erde-veraendert>. [Zugriff am 11. Februar 2021].
- [2] Klimatopia, „Klimatopia.de,“ [Online]. Available: <https://www.klimatopia-os.de/index.php?id=18>. [Zugriff am 11. Februar 2021].
- [3] Europäischen Kommission, „Europäischen Union,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/change/causes_de. [Zugriff am 13. Februar 2021].
- [4] O. Bubbenzer und U. Radtke, „Natürliche Klimaänderungen im Laufe der Erdgeschichte,“ Humboldt-Universität zu Berlin, Köln.
- [5] Scripps Institution of Oceanography, „keelingcurve.ucsd.edu,“ [Online]. Available: <https://keelingcurve.ucsd.edu>. [Zugriff am 16. Februar 2020].
- [6] M. Zimmermann, Allgemeinbildung – Weltgeschichte, Nationalstaaten und Industrialisierung, Würzburg: Arena Verlag GmbH, 2007.
- [7] worldoceanreview, „worldoceanreview.com,“ [Online]. Available: <https://worldoceanreview.com/de/wor-1/kuesten/gefahrdurch-meeresspiegelanstieg/>. [Zugriff am 18. Februar 2021].
- [8] Climate Central, „Coastal Risk Screening Tool,“ [Online]. Available: <https://coastal.climatecentral.org/map>. [Zugriff am 18. Februar 2021].
- [9] M. Kloiber, „Kleine Zeitung,“ 17. April 2017. [Online]. Available: https://www.kleinezeitung.at/steiermark/graz/5407044/Nach-dem-Starkregen_Feuerwehr-rettete-Grazer-in-letzter-Minute-vor. [Zugriff am 22. Februar 2021].

- [10] H. Formayer, „Climate Change Centre Austria,“ 2013. [Online]. Available: https://ccca.ac.at/Formayer_KlimaKonkretStmk_Hitze_Graz.pdf. [Zugriff am 14. Mai 2021].
- [11] ZAMG, „Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik,“ 11. Februar 2021. [Online]. Available: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/eistage-wurden-in-den-letzten-jahrzehnten-weniger>. [Zugriff am 03. März 2021].
- [12] M. Seynsche, „Vor 40 Jahren - Erste Weltklimakonferenz in Genf,“ Deutschlandfunk, 12. Februar 2019. [Online]. Available: https://www.deutschlandfunk.de/vor-40-jahren-erste-weltklimakonferenz-in-genf.871.de.html?dram:article_id=440681. [Zugriff am 20. Februar 2021].
- [13] Greenpeace e. V., „Greenpeace,“ Januar 2019. [Online]. Available: <https://www.greenpeace.de/themen/klimakrise/klimaschutz/internationale-klimakonferenzen>. [Zugriff am 20. Februar 2021].
- [14] P. Jöchle, „Future Aid,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.future-aid.at/future-aid-artikel-kolumnen/future-aid-artikel-teil-1/artikel-16-der-klimawandel-und-die-internationale-klimapolitik/>. [Zugriff am 19. Februar 2021].
- [15] Europäische Kommission, „Europäische Union,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/progress_de. [Zugriff am 20. Februar 2021].
- [16] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, „Ergebnisse der UN-Klimakonferenzen,“ [Online]. Available: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/un-klimakonferenzen/ergebnisse-der-un-klimakonferenzen/>. [Zugriff am 21. Februar 2021].

- [17] Europäisches Parlament, „Klimaziele: Fortschritte der EU,“ 27. Juli 2020. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news>. [Zugriff am 22. Februar 2021].
- [18] Umweltbundesamt, „Klimaschutzbericht 2020,“ REP-0738, Wien, 2020.
- [19] E-Control, „Statistikbroschüre 2020,“ E-Control, Wien, 2020.
- [20] Lunitus, „Chemie,“ [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Kohlenstoffdioxid.html>. [Zugriff am 23. Februar 2021].
- [21] Air Liquide Deutschland, „Kohlendioxid – Ohne CO₂ kein Leben, keine Zivilisation, keine Zukunft,“ Air Liquide, Düsseldorf, 2016.
- [22] H. Lohninger, „Anorganische Chemie,“ [Online]. Available: http://anorganik.chemie.vias.org/phasendiagramm_pt_reinstoffe.html. [Zugriff am 23. Februar 2021].
- [23] Lenntech, „Lenntech,“ [Online]. Available: <https://www.lenntech.de/kohlenstoffkreislauf.htm>. [Zugriff am 24. Februar 2021].
- [24] D. Heinrich und M. Hergt, dtv- Atlas Ökologie, Deutscher Taschenbuch Verlag, 1998.
- [25] J. Paeger, „Ökosystem Erde,“ 2006 - 2015. [Online]. Available: <https://www.oekosystem-erde.de/html/kohlenstoffkreislauf.html>. [Zugriff am 24. Februar 2021].
- [26] Umweltbundesamt DE, 03. August 2013. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/ist-nicht-der-co2-ausstoss-des-menschen-im-rahmen>. [Zugriff am 20. Februar 2021].

- [27] V. Quaschnig, „Erneuerbare-Energien-und-Klimaschutz,“ Juni 2015. [Online]. Available: <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index.php>. [Zugriff am 24. Februar 2021].
- [28] L. Wagener, „co2online,“ 05. Mai 2019. [Online]. Available: <https://www.co2online.de/klima-schuetzen/klimawandel/was-ist-co2/>. [Zugriff am 22. Februar 2021].
- [29] G. Zenz, W. Richter und H. Knoblauch, „Wasserkraft ist klimaschonend durch CO2-Reduktion,“ *Energie für unser Europa*, Nr. 14. Symposium Energieinnovation, pp. 32-33, 2016.
- [30] A. Hammer, „Wasserwirtschaft, VU 213.441, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,“ Technische Universität Graz, Graz, 2019.
- [31] G. Zenz, „Konstruktiver Wasserbau Grundlagen, VU 213.112, Lernbehelf SS 2012,“ Technische Universität Graz, Graz, 2018.
- [32] Kraftwerkskarte Österreich, „oesterreichsenergie.at,“ [Online]. Available: <https://oesterreichsenergie.at/kraftwerkskarte-oesterreich.html>. [Zugriff am 8. Januar 2021].
- [33] Kleinwasserkraft Österreich, „kleinwasserkraft.at,“ [Online]. Available: <https://www.kleinwasserkraft.at/fakten/>. [Zugriff am 8. Januar 2021].
- [34] IRENA, „Renewable Capacity Statistics 2020 International Renewable Energy Agency (IRENA),“ Abu Dhabi, 2020.
- [35] iportale GmbH, „Länder-Lexikon,“ [Online]. Available: https://www.laenderlexikon.de/Europa_Laender_A-Z. [Zugriff am 08. Januar 2021].
- [36] IRENA, „Renewable Energy Statistics 2020 International Renewable Energy Agency (IRENA),“ 2020.
- [37] Umweltbundesamt, „Treibhausgasemissionen von Strom – Empfehlung zur Öko-Bilanzierung,“ REP-0654, Wien, 2018.

- [38] Tomorrow, „Electricity Map,“ [Online]. Available: <https://www.electricitymap.org/zone/AT>. [Zugriff am 12. Januar 2021].
- [39] E-Control, „Gesamte Elektrizitätsversorgung – Jährliche Bilanz elektrischer Energie,“ 2020.
- [40] Umweltbundesamt, „Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich,“ REP-0303, Wien, 2010.
- [41] Eurostat – european statistics, „Energy, transport and environment statistics, 2020 edition,“ 2020.
- [42] Eurostat, „ec.europa.eu,“ 8. Januar 2021. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/products-eurostat-news/-/ddn-20210108-1>. [Zugriff am 9. Januar 2021].
- [43] Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung, „IndustRiES - Energieinfrastruktur für 100% Erneuerbare Energie in der Industrie,“ Wien, 2019.
- [44] Statistik Austria, „Energiestatistik: Energiebilanzen Österreich 1970 bis 2018,“ Wien, 2019.
- [45] Energie Steiermark, „Murkraftwerk Graz,“ 03. Juni 2017. [Online]. Available: http://murkraftwerkgraz.at/e_data/bilder/Default.aspx?ID=13. [Zugriff am 11. März 2021].
- [46] M. Grössing, „Lebenszyklenanalyse von PKW-Antrieben, Masterarbeit,“ Technische Universität Graz, Graz, 2018.
- [47] W. Wachter, „Zukünftige Mobilität – Fragen zu Kraftstoffen und Antrieben, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik,“ Technische Universität Graz, Graz, 2018.
- [48] Verein der Automobilindustrie (VDA), „Emissionsfaktoren für Strom, Fernwärme und Kraftstoffe,“ VDA thinkstep AG, Berlin, 2019.

- [49] Hitachi, „Hitachi Construction Machinery,“ [Online]. Available: <https://www.hitachicm.eu/de/adblue/>. [Zugriff am 13. März 2021].
- [50] H. Wittich, „Auto Motor Sport,“ 01. August 2017. [Online]. Available: <https://www.auto-motor-und-sport.de/kaufberatung/abgasreinigung-nox-diesel-adblue-scr-kat-harnstoffeinspritzung/>. [Zugriff am 13. März 2021].
- [51] Umweltbundesamt, Oktober 2019. [Online]. Available: <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>. [Zugriff am 22. März 2021].
- [52] F. Mittermayr, „Bauchemie, VO 206.200, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie,“ Technische Universität Graz, Graz, 2016.
- [53] D. Heck, „Baubetriebslehre 1, VU 218.103, Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft,“ Technische Universität Graz, Graz, 2019.
- [54] Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) , „Jahresbericht 2018/19,“ TU Wien Science Center, Wien, 2019.
- [55] Verein Deutscher Zementwerke e.V., [Online]. Available: <https://mitglieder.vdz-online.de/zementindustrie/zement/herstellung/>. [Zugriff am 10. April 2021].
- [56] P. Maydl und J. Tritthart, „Baustofflehre GL, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie,“ Technische Universität Graz, Graz, 2013.
- [57] N. V. Tue, „Betonbau GL1, Institut für Betonbau,“ Technische Universität Graz, Graz, 2017.
- [58] Umweltbundesamt, „Ökobilanz alternativer Antriebe,“ REP-0440, Wien, 2014.
- [59] K. H. Heinen, Elektrostahlerzeugung, Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1997.

- [60] S. Kranzl, Interview, *Emissionsfaktor Stromaufbringung – Expertin für Energie und Ökobilanzen des Umweltbundesamtes*. [Interview]. 15. April 2021.
- [61] Energie Steiermark AG, „Energie Steiermark,“ [Online]. Available: <https://www.e-steiermark.com/ueber-uns/energieerzeugung/wasserkraft/>. [Zugriff am 23. März 2021].
- [62] A. Fürst, „Der Baubetrieb im Lichte des Klimawandels,“ Energie Steiermark, Graz, 2020.
- [63] „Geocaching,“ 11. Oktober 2013. [Online]. Available: https://www.geocaching.com/geocache/GC4RWQ2_kraftwerk-kalsdorf?guid=719b147b-b0e5-4d20-8709-eea35bcd5521. [Zugriff am 28. März 2021].
- [64] Verbund Hydro Power AG, „Die Wasserkraftwerke in der Steiermark,“ Wien, 2013.
- [65] G. Zenz und F. G. Pikel, „Hydraulics 1, 213.411 VO, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,“ Technische Universität Graz, Graz, 2019.
- [66] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, „Leitfaden zum Baum von Fischeaufstiegshilfen,“ Wien, 2012.
- [67] Graz Holding, „Zentraler Speicherkanal Graz,“ [Online]. Available: <https://www.zentralerspeicherkanalgraz.at>. [Zugriff am 29. März 2021].
- [68] Verbund, 17. April 2020. [Online]. Available: <https://www.verbund.com/de-at/ueber-verbund/news-presse/presse/2020/04/17/letzte-kohle-mellach>. [Zugriff am 13. Mai 2021].

Anhang

Baugeräteliste MKW Puntigam:

Gerät	Type	Anzahl	Firma	Abgasnorm	kW
Kettenbagger	Cat	2	Granit	3b	121
Kettenbagger	Cat	3	Granit	4	235
Kettenbagger	Cat	1	Granit	3a	257
Kettenbagger	Takeuchi	3	Granit	/	/
Kettenbagger	Hyundai	4	Schuster	3b	136
Kettenbagger	Hyundai	1	Schuster	3b	196
Kettenbagger	Hyundai	2	Schuster	3b	216
Kettenbagger	Kobelco	1	Schuster	3b	213
Kettenbagger	Liebherr	1	Pitzer	/	/
Kettenbagger	Volvo	1	PORR	3b	216
Kettenbagger	Komatsu	1	Zöchling	/	/
Kettenbagger	Komatsu	1	Trummer	/	/
Kettenbagger	Hitachi	1	Porr	/	/
Kettenbagger	Liebherr	1	Atzlinger	/	/
Kettenbagger	Cat	1	Granit	/	/
Kettenbagger	Bobcat	1	Implenia	3b	45
Kettenbagger + Aggregat	Liebherr	1	Implenia	/	1.127
Minibagger	Takeuchi	1	PORR	3a	28
Minibagger	Takeuchi	1	Schuster	/	/
Radbagger	Cat	2	Schuster	4	86
Radbagger	Hitachi	1	Schermann	/	/
Radbagger	Terex	1	Schuster	3b	59
Raupenbagger	/	1	PORR	3b	56
Hydroseilbagger	Liebherr	1	PORR	3	450
Radlader	Cat	1	Granit	3b	213
Radlader	Volvo	1	Trummer	4	220
Radlader	Liebherr	1	PORR	4	76
Radlader	Volvo	1	PORR	4	127
Radlader	Volvo	2	Trummer	4	245
Radlader+Movax	Liebherr	1	PORR	4	140
LKW	4A	2	Granit	6	330
LKW	4A	1	Granit	5	335
LKW	3A+Kran	1	Granit	5	335

Gerät	Type	Anzahl	Firma	Abgasnorm	kW
LKW	3A	1	Granit	6	300
LKW	4A	3	Schuster	5	300
LKW	4A	3	Schuster	6	300
LKW	Mischwagen	1	Schuster	6	300
LKW	3A	2	Schuster	6	300
LKW	3A+Kran	3	Felbermayr	5	300
LKW	4A+Kran	1	Felbermayr	5	300
LKW	Autokran	2	Felbermayr	/	210
LKW	4A	4	Krisper	5	300
LKW	3A (Behälter)	1	Krisper	/	/
LKW	3A+Kran	2	Krisper	5	300
LKW	3A+Kran	1	Wastian	5	300
LKW	4A	2	Schröck	6	300
LKW	4A	2	Pock	6	300
LKW	4A	1	Atzlinger	6	300
LKW	4A	1	Wagner	6	300
Dump Truck	Cat	3	Granit	4	280
Dump Truck	Volvo	1	PORR	4	280
Dump Truck	Volvo	2	Krisper	4	280
Dump Truck	Volvo	3	Krisper	3b	327
Kleindumper	Wacker	2	PORR	/	34
Kleindumper	Wacker	1	PORR	/	75
Kleindumper	Paus	1	PORR	/	52
Kleindumper	EBBS Radlinger	1	Granit	/	26
Manitou	/	3	Felbermayr	4	115
Telekran	Sennebogen	1	ARGE	3a	135
Grader	New Holland	2	PORR/Schuster	3a	129
Traktor+Fass	/	2	Schuster/Maschinenring	/	62
Walze	/	1	PORR	/	20
Ramme	/	1	PORR	5	470
Ramme	Liebherr	1	PORR	5	670
Ramme	ABI	1	PORR	5	470
Ramme	ABI	1	Fleissner	5	470
Bohrgerät	Beurer	1	PORR	3	433