

## **DIPLOMARBEIT**

Nachhaltigkeit im Bauwesen:  
Ökologische Analyse von Baustoffen und Bauteilen

**ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs**  
unter der Leitung von

**Associate Professor Dipl.-Ing. Dr.techn. Alireza Fadai**  
E259 - Institut für Architekturwissenschaften

**eingereicht an der Technischen Universität Wien**  
Fakultät für Architektur und Raumplanung  
von  
**Daniel Stephan**  
01476021

Wien, am 25.05.2018



## Kurzfassung

Anlässlich der Diskussion, welche Baustoffe die optimalsten und umweltfreundlichsten Eigenschaften für das Bauwesen bieten, wird in dieser Arbeit ein Überblick über nachhaltiges Bauen gegeben. Es wird geklärt, welche Vor- und Nachteile bestimmte Baustoffe und tragende Bauteile besitzen, indem ihre ökologischen und mechanischen Eigenschaften verglichen werden.

Im Hinblick auf Konstruktionsmaterialien beinhalten z.B. Holzbaustoffe das größte Potenzial bei erneuerbarem Primärenergiebedarf im Vergleich zu allen anderen untersuchten Konstruktionen. Zudem hat Holz aufgrund des hohen Recyclingpotenzials den geringsten Anteil an nicht erneuerbarem Primärenergiebedarf, wohingegen den höchsten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf mineralische Baustoffe verursachen. Beton entwickelt mit steigender Druckfestigkeitsklasse auch dementsprechend mehr Umweltwirkungen, wohingegen die Umweltwirkungen bei Ziegelformaten von der Art der Füllung abhängen. Während Betonbauten in der Kategorie für das Treibhauspotenzial und das Ozonabbaupotenzial mit die höchsten Werte besitzen, verursachen mineralische Bauweisen die wenigsten Umweltwirkungen in den Kategorien für das Photochemische Ozonbildungspotenzial, das Versauerungspotenzial sowie das Eutrophierungspotenzial. Stahl und Glas haben im Gegensatz zu den anderen üblichen Baumaterialien sehr viel höhere Umweltwirkungen in allen Kategorien, v.a. in Bezug auf den Primärenergieinhalt und auf das Treibhauspotenzial.

Aus den gesamten Untersuchungen geht hervor, dass es keine eindeutig bessere Bauweise gibt. Je nach gegebenen Bedingungen müssen Aspekte wie Standort, klimatische Verhältnisse, Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger, Nutzerverhalten oder spezielle Bedürfnisse des Bauherrn bei der Baustoffwahl berücksichtigt werden. Denn im Kontext des Gebäudes gibt es viele Aspekte, die zu beachten sind; letztendlich stehen Baustoffe in einem funktionalen Zusammenhang untereinander und mit dem Baugefüge.

Einfluss auf die Beurteilung der Auswirkungen der Bauteile auf die Umwelt hat in großem Maße sowohl die Wahl des Konstruktionsmaterials als auch die Wahl des Dämmstoffes und die Art der Konstruktion im Allgemeinen. Ein idealer Baustoff steht somit in einem ausgewogenen Verhältnis zwischen ökologischen Aspekten und bautechnischen Anforderungen und ist je nach äußeren Gegebenheiten zu wählen. Durch die Auswahl von angemessenen umweltgerechten Baustoffen und Fügetechniken ist zumindest ressourcenschonendes und nachhaltiges Bauen realisierbar. Langfristiges Denken und eine Abstimmung der Lebensdauern von Baustoffen mit gewissem Maß an Nutzungsflexibilität ist essenziell für das ökologische Bauen.

Wie in der Arbeit außerdem gezeigt wird, gibt es kein einheitliches, internationales Zertifizierungssystem, auf dessen Grundlage eine allgemeine nachhaltige Entwicklung aufbauen könnte. Jedem Bewertungssystem und jeder Datenbank liegen andere Kriterien und Ziele zugrunde, die sich in den Ergebnissen widerspiegeln. Daher ist es ratsam, sich schon früh im Planungsprozess damit auseinanderzusetzen und die Ziele der Bauplanung daran anzupassen. Durch den in dieser Arbeit vorgelegten Baustoffkatalog und Bauteilvergleich soll eine bessere Übersichtlichkeit in diese Thematik gebracht werden.



## Abstract

As a contribution to the discussion about what building materials offer the most optimal and environmentally friendly properties for the construction industry, this paper gives an overview of sustainable construction. It illustrates the advantages and disadvantages of certain building materials and structural components by comparing their ecological and mechanical properties.

As far as construction materials are concerned, e.g. wood materials have the greatest potential in terms of renewable primary energy demand compared to all other constructions studied. Moreover, due to the high recycling potential, wood has the lowest share of non-renewable primary energy demand, whereas the highest non-renewable primary energy demand is caused by mineral building materials. Concrete also develops correspondingly higher environmental impacts as the compressive strength class increases, whereas the environmental effects of brick formats depend on the type of filling. While concrete structures have the highest rates in the category of global warming potential and ozone depletion potential, mineral structures have the least environmental impact in the categories of ozone generation potential, acidification potential and eutrophication potential. Steel and glass, in contrast to the other common building materials, have much higher environmental impacts in all categories, especially in terms of primary energy level and global warming potential.

All these studies show that there is no clear preferential construction. Depending on the given conditions, aspects such as location, climatic conditions, availability of renewable energy sources, user behavior or the client's special needs must be taken into account when selecting the building material. There are many aspects in the context of the building which have to be considered; Ultimately, building materials are in a functional relationship with each other and with the construction structure.

The assessment of the effects of the components on the environment is influenced to a great extent by both the choice of construction material and the choice of insulating material and the type of construction in general. An ideal building material is thus in a well-balanced relation between ecological aspects and structural engineering requirements and should be selected depending on external conditions. By choosing environmentally friendly building materials and joining techniques, at least resource-efficient and sustainable construction can be achieved. Long-term thinking and matching the lifespan of building materials with a certain degree of flexibility of use is essential for ecological construction.

As is also shown in the paper, there is no single, international certification system on which to build universal sustainable development. Each rating system and database is based on different criteria and objectives, which are reflected in its rating. Therefore, it is advisable to deal with this problem early on in the planning process and to adapt the objectives of the construction planning accordingly. The goal of the material catalog and component comparison presented in this paper is to get a better overview of this issue.



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Mein erster Dank gebührt meinem Betreuer Herr Associate Professor Dipl.-Ing. Dr.techn. Alireza Fadai, der meine Arbeit richtungsweisend und überaus engagiert betreut hat. Dank seiner motivierenden Unterstützung konnte er mir immerzu bei meiner Recherche und bei meinen Fragen maßgeblich weiterhelfen.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen langjährigen Freunden Adrian Baniewicz, Christian Neumeier, Engin Ucar, Florian Ingot, Paul Fritsch, Thomas Reinfeld und meinem Freund Lukas Riedersberger sehr herzlich bedanken, die mir mit zahlreichen Ideen und großem Interesse immerzu hilfsbereit zur Seite standen.

Außerdem möchte ich mich bei meinem früheren Kommilitonen und guten Freund Stefan Berens bedanken, der mich während meines Studiums in Nürnberg kontinuierlich motiviert hat und der mich mittlerweile trotz der Entfernung so herzlich unterstützt.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinen Kommilitonen und Freunden Daniel Schröckmair und Theresa Stock, die stets ein offenes Ohr hatten und mir jederzeit während meines Studiums in Wien beistanden.

Besonders möchte ich mich außerdem bei meiner Partnerin Verena Dirnberger für ihren starken emotionalen Rückhalt und ihre moralische Unterstützung bedanken.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Eltern Hermann Stephan und Dr. Christine Stephan sowie meiner Schwester Alice Stephan bedanken, die mir nicht nur mit viel Geduld zur Seite standen, sondern mich auch mit überaus viel Interesse und tatkräftiger Hilfe auf meinem bisherigen Lebensweg begleitet haben.





# Inhaltsverzeichnis

VORWORT.....	12
<b>1 ENTWICKLUNG DES NACHHALTIGEN BAUENS.....</b>	<b>14</b>
1.1 Einführung in die Thematik .....	14
1.2 Historischer Überblick .....	14
1.3 Entstehung ökologischer Bewertungssysteme.....	16
<b>2 BEWERTUNGSMETHODEN NACHHALTIGER PRODUKTE .....</b>	<b>20</b>
2.1 Bauökologie und Baubiologie .....	20
2.2 Bewertungssysteme .....	22
2.2.1 Baubiologische Umweltproduktdeklarationen .....	22
2.2.2 Bauökologische Bewertungshilfen.....	25
2.3 Systematik einer Ökobilanzierung.....	33
<b>3 VOM BAUSTOFF ZUM BAUTEIL.....</b>	<b>37</b>
3.1 Stand der Technik.....	37
3.2 Ökologische Eigenschaften von Baustoffen.....	38
3.2.1 Materialverhalten .....	38
3.2.2 Mechanische Kenndaten .....	42
3.2.3 Rückbaubarkeit und Recycling.....	45
3.2.4 Verwendete Methoden .....	46
3.2.5 Indikatoren der ökologischen Bilanzierung .....	47
3.3 Systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten und Bewertung der Tragelemente .....	48
3.3.1 Ergebnisse des Baustoffvergleichs.....	48
3.3.2 Ergebnisse der Bauteilanalyse .....	58
3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	78
3.5 Optimierungspotenzial der Materialwahl .....	80

<b>4</b>	<b>OPTIMIERUNG DER MATERIALVERWENDUNG IM BAUPROZESS .....</b>	<b>84</b>
4.1	Planungsstrategien und Planungsabläufe .....	85
4.1.1	Grundlagenermittlung/ Vorstudie .....	86
4.1.2	Wettbewerb/ Vorplanung .....	87
4.1.3	Entwurfsplanung/ Genehmigungsplanung .....	87
4.1.4	Ausschreibung und Vergabe/ Ausführungsplanung .....	88
4.1.5	Ausführung/ Fertigstellung .....	88
4.1.6	Übergabe/ Betrieb .....	89
4.2	Materiallebenszyklus .....	89
4.2.1	Effizienz in der Herstellung .....	90
4.2.2	Ressourcenschonende Alternativen .....	90
4.2.3	Modularisierung und Systembau .....	91
4.2.4	Gesundheitliche Unbedenklichkeit .....	92
4.2.5	Rückführung in den Materialkreislauf .....	92
4.3	Gebäudelebenszyklus .....	93
4.3.1	Materialfokussierung .....	94
4.3.2	Funktionsüberlagerung .....	94
4.3.3	Reduzierter Betriebsaufwand .....	94
4.3.4	Reduzierter Instandhaltungsaufwand .....	94
4.3.5	Optimierung von Austauschprozessen .....	95
4.3.6	Optimierung der Instandhaltungszyklen .....	95
4.3.7	Recyclinggerechtes Konstruieren .....	96
<b>5</b>	<b>CONCLUSIO .....</b>	<b>97</b>
<b>6</b>	<b>GLOSSAR .....</b>	<b>101</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG: BAUSTOFFKATALOG .....</b>	<b>104</b>
7.1	Mineralische Baustoffe .....	104
7.2	Dämmstoffe .....	120
7.3	Holz .....	138
7.4	Metalle .....	144
7.5	Beschichtungen .....	156
7.6	Kunststoffe .....	166
<b>8</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>181</b>
<b>9</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>184</b>
<b>10</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>187</b>



## Vorwort

Anlässlich der Diskussion, welche Baustoffe die optimalsten und umweltfreundlichsten Eigenschaften für das Bauwesen bieten, wird in dieser Arbeit ein Überblick über nachhaltiges Bauen gegeben. Außerdem soll geklärt werden, welche Vor- und Nachteile bestimmte Baustoffe und Bauteile besitzen, indem ihre ökologischen und mechanischen Eigenschaften verglichen werden. Dabei gilt festzustellen, ob derzeit ein universell einsetzbarer Baustoff aufgrund dieser Kriterien existiert.

Generell ist anzumerken, dass alle paar Jahre neue Studien die Umweltfreundlichkeit von entweder Holzwerkstoffen oder mineralischen Baustoffen nachweisen. Je nachdem, wie weit bestimmte Produkte entwickelt sind, werden neue Untersuchungen von Herstellern und unabhängigen Instituten durchgeführt, um den Fortschritt gegenüber anderen Produkten zu beweisen. Dadurch entsteht natürlich ein gesunder Wettbewerb und immer schnellere Entwicklungen in der Baustoffindustrie. Deshalb ist an dieser Stelle festzuhalten, dass sich diese wissenschaftliche Arbeit auf die aktuelle Forschungslage in Deutschland und Österreich stützt.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Analyse ökologischer und bautechnischer Eigenschaften von Baustoffen und tragenden Bauteilen. Dadurch soll zum Nachdenken über konventionelle Bauweisen angeregt und ein besseres Verständnis der ganzen Thematik des nachhaltigen Bauens vermittelt werden.

Im ersten Teil werden die Bedeutung der Nachhaltigkeit (siehe Abbildung 1) aufgezeigt und Grundlagen zur Berechnung mittels einer Ökobilanz vermittelt. Außerdem werden diverse Bewertungssysteme miteinander verglichen. Im zweiten Teil der Arbeit werden die Ergebnisse einer systematischen Analyse der Umweltwirkungen von Baustoffen und gängigen Bauteilvariationen dargelegt. Speziell bei dem Vergleich der Ökobilanzdaten der Baustoffe werden repräsentative Baustoffe ausgewählt und durch einen komplexen Baustoffkatalog im Anhang ergänzt. Im letzten Teil werden Optimierungsvorschläge zum Materialeinsatz im Bauprozess gegeben, die sich auf allgemeine Planungsabläufe, den Materiallebenszyklus und auf den Gebäudelebenszyklus konzentrieren. Denn Nachhaltige Gebäudeplanung erfordert ganzheitliche und flexible Planung im Bauprozess. Langfristige Denkweisen und eine Beurteilung der Lebensdauerzyklen von Baustoffen ist essenziell für ökologisches Bauen. Neben dem ausführlichen Baustoffkatalog im Anhang ist auf das Glossar hinzuweisen, in dem eine Übersicht wichtiger Begrifflichkeiten (im Text orange markiert) zu finden ist.

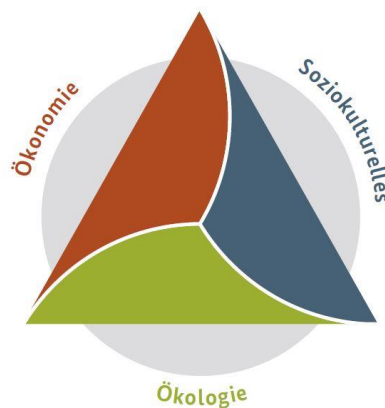


Abbildung 1: Dimensionen der Nachhaltigkeit [65]



# 1 Entwicklung des Nachhaltigen Bauens

## 1.1 Einführung in die Thematik

Die Entwicklung der Baustoffe und die Auseinandersetzung mit Materialien reicht schon Jahrhunderte zurück und ist genauso alt wie das Bauwesen selbst. Der Mensch war dabei stets darauf bedacht, Baustoffe und Bauteile fortwährend zu optimieren. Immer bedeutsamer wurde im Laufe der Zeit der Umgang mit nachhaltigen Produkten bzw. die Nachhaltigkeit der gesamten Gebäude. [1]

Da dies aber ein sehr umfangreiches Feld des Bauwesens beschreibt, ist es kaum verwunderlich, dass die Thematik der Nachhaltigkeit oft unterschiedlich interpretiert wird. In der Regel variieren die Betrachtungsweisen bzw. die Hauptaugenmerke, auf die besonders viel Wert gelegt wird, bezüglich Regionalität, Benutzung nachwachsender Rohstoffe, Niedrighalten des Primärenergiebedarfs, Einbezug besonders langlebiger Konzepte sowie möglichst guter Recyclingfähigkeit der zu verwendenden Baustoffe. Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass die ökologische und baubiologische Betrachtungsweise von außerordentlicher Wichtigkeit ist und auch in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen wird. Schon jetzt bestehen einerseits Gesetze und Verordnungen für einen sensiblen Umgang mit diesen Aspekten. Andererseits wächst die Erwartungshaltung der Bauherren in diesem Themenbereich weiterhin an; das Bewusstsein bei manchen Planern für ein Nachhaltiges Bauen besteht durchaus, das geeignete Hintergrundwissen fehlt jedoch teilweise. [1]

Ein großes Problem ist die Unüberschaubarkeit dieser Thematik. Es existiert eine große Fülle an Informationen, die aber auf unterschiedliche Spezialgebiete und Baustoff-Hersteller aufgeteilt ist. Darüber hinaus kann es keine „*einzig richtige Allgemeinlösung*“ [1] geben und nicht alle Fragen können „*eindeutig und widerspruchsfrei*“ [1] beantwortet werden.

Das Anliegen der vorliegenden Arbeit ist es, einen Überblick über die wichtigsten Aspekte des nachhaltigen Planens zu geben und infolge dieser Recherche einen zusammenfassenden Katalog für Bauteile zu erstellen, der dabei helfen soll, Bewusstsein zu bilden und jedem Interessierten neue Informationen darzubieten.

## 1.2 Historischer Überblick

Die Baustoffwahl wird unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit immer bedeutsamer werden. Zum einen entwickelt sich die Baubranche um einiges schneller als bisher, zum anderen werden neue Materialien und Technologien zur Herstellung von Bauteilen leider erst „*nach und nach kritisch hinterfragt*“. [1]

Dies geschieht manchmal mit und manchmal ohne große öffentliche Aufmerksamkeit. So war zum Beispiel die Herstellung und der Einsatz von Nanomaterialien relativ gut in den Medien zu verfolgen, während der Einsatz von Gütesiegeln für Bauprodukte als Gegenmaßnahme zum Anstieg der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) von geringem öffentlichen Interesse war. [1]

Letztendlich steht die Verwendung von bestimmten Baustoffen immer zwischen dem technischen Fortschritt und den gesellschaftlichen Werten. Deshalb sollten alle Baubeteiligten und spätere Nutzer

stets den schonenden Umgang mit Ressourcen und der Energie im Blickfeld haben. Denn schon heute herrscht bei einigen Rohstoffen eine Verknappung der Ressourcen. Allein der Mangel an Bausand zeigt, zu welchen Mitteln (z.B. Import) manche Bauunternehmen greifen müssen, um geeigneten Sand für die Betonherstellung zu beschaffen. Ebenso führte die Verwendung von Krypto-Beleuchtungen in der Automobilindustrie dazu, dass die Verfügbarkeit von thermisch effizientem Edelglas zur Herstellung von Wärmeschutzverglasungen eingeschränkt wurde. Deshalb ist die Betrachtung der Baustoffe mehr in einem übergeordneten Kontext anstatt isoliert voneinander zu sehen. Der Begriff „nachhaltige Baustoffe“ sollte im Bewusstsein der Planer zu „nachhaltig eingesetzten Baustoffen“ verändert werden. Gesamte Materialkonzepte sind um einiges effizienter als die schlichte Auswahl einiger nachhaltiger Bauteile. In Zukunft wird es mehr um die Verbindung der - oberflächlich betrachtet konträren - Konzepte der *„Besinnung auf alte Materialien und Methoden“* und der *„Innovation neuer Materialien“* gehen. [1]

Die Rahmenbedingungen bestimmten schon immer das Wesen des Bauens. Die Identität von Städten und Regionen entwickelte sich oft aufgrund ihrer Umgebung, den Gesetzen und Bedingungen des Mittelalters zufolge gab es fast nur ein einzig sinnvoll einsetzbares Material: den Stein. [1]

In der Industrialisierung kamen dann aufgrund des Bedürfnisses an Mengenwaren und des immensen Fortschritts der Menschen hauptsächlich Stahl, Ziegel und Glas zum Einsatz. Mit dem Begriff des „neuen Bauens“ reformierte der Deutsche Werkbund (1907) durch Rationalisierung und Typisierung die Verwendung neuer Materialien, wobei Le Corbusier (1887-1965) die zentrale Rolle des Betons im Entwurfs- und Bauprozess als Präzisionswerkstoff herbeisehnte. [1]

In der „Moderne“ konnte der Baustoff diese Rolle zunächst nicht ganz erfüllen, weswegen diese Zeit mitunter durch Frank Lloyd Wrights (1867-1959) „Natur des Materials“ [2] geprägt wurde. Hauptaufgabe des Baustoffes war es dabei, auf ehrliche Weise den lokalen Kontext zu verdeutlichen und im Beispiel des Betons, die gestalterischen Spielräume des Materials auszunutzen. Ähnliche Ansätze hatte auch Alvar Aalto (1898-1967), der das fertiggestellte Gebäude in den Kontext zwischen Mensch und gebauter Umwelt setzte. Durch diese Art von Symbiose ergab sich ein neuer Zweig der Materialwahl: die Haptik als gestalterisches Mittel zur Verdeutlichung der Beziehung zwischen Mensch und gebauter Umwelt. Seit den 1960er Jahren erfuhr die Nachhaltigkeitsbewegung immer mehr Aufschwung. *„Autochtones Bauen und vernakuläre Architektur haben uns eine immense Vielfalt an Typologien und Baustoffen beschert“*. [1]

In der Nachkriegszeit lag der Schwerpunkt weniger auf diesen Themen als auf der Massenfertigung von neuen Wohnungen. Durch den Krieg zerstörter Wohnraum musste auf effiziente Weise wiederhergestellt werden. Ein hoher Vorfertigungsgrad und neue energetische Fassaden rückten immer mehr in den Vordergrund. Félix Trombe (1906-1985) und Jacques Michel entwickelten in den späten 1950er Jahren die sogenannte „Trombe-Wand“, eine Speicherwand zur passiven Nutzung der Sonnenenergie. Metall- und Kunststoffindustrie suchten nach neuen Absatzmöglichkeiten und fanden ihren Weg in die Bauindustrie. Dadurch fand eine klassische ökonomische Optimierung statt: es wurden weniger Arbeitskräfte durch den erhöhten Vorfertigungsgrad benötigt, gleichzeitig stieg die Qualität der Produkte und der gelieferten Bauwerke im Vergleich zu den schlichten Nachkriegsbauten um ein Vielfaches. Ingenieure wie Heinz Isler (1926-2009) oder Konrad Wachsmann (1901-1980) bringt man noch heute mit effizienten Tragstrukturen in Verbindung, Fritz Haller (1924-2012) ist für seine „allgemeine Lösung“ mithilfe von Baukastensystemen bekannt und durch Frei Otto (1925-2015) etablierten sich die Kunststoffe auch deutlich sichtbar in der Bauindustrie. [1]

Nach dem Aufschwung der Wirtschaft in Deutschland wurde das Bauwesen durch materialeffiziente Konstruktionsprinzipien definiert. Buckminster Fuller (1895-1993) entwickelte mit dem Begriff des „Dymaxion“ (dynamic maximum tension) ein Modell der Materialeistung bei maximal reduziertem Materialeinsatz. [3] Zusammen mit Norman Foster (1935) fand ihr Gedankengut der gesellschaftlichen Hinterfragung der Welt auch in den späten 1960er bis hin zu den frühen 1980er Jahren Eingang in die Architektur. Zu dieser Zeit entstand auch „Das gesunde Haus“ von Hubert Palm, dem ersten Werk der Baubiologie. [4] Es kam zu einer Rückbesinnung auf die Baustoffe Holz und Lehm. Der Trend des alternativen Bauens wurde durch aktive Forschung an Universitäten unterstützt. Gleichzeitig erfuhr der Denkmalschutz und das energieeffiziente Bauen einen Aufschwung in seiner Entwicklung, was in den 1980ern dazu führte, dass Wolfgang Feist mit dem Passivhauskonzept eine Bewertungsmethode zur Erfassung des Energiebedarfs eines Gebäudes vorstellte. Dies bewirkte u.a. eine verhältnismäßig große Veränderung in der Gesetzgebung im Bezug auf nachhaltiges Bauen, den Einsatz von nachwachsenden Ressourcen und die Bewertung von Schadstoffen. [1]

Im Hinblick auf effizienteres Bauen warf Otl Aicher schon in den 1970er Jahren den Begriff des „Integralen Bauens“ auf. [5] Der durch Walter Gropius' Definition bestärkte Satz: „Gestalten heißt: In Fesseln tanzen“ behält heutzutage nach wie vor seine Gültigkeit, v.a. in der Baustoffindustrie. Maßgeblich trug diese Sichtweise zur Entwicklung neuer ökologischer Kennwerte und zu einem erhöhten Fokus auf nachwachsende Rohstoffe bei. [1]

Derzeit gibt es eine ganze Reihe an fortschreitenden Entwicklungsrichtungen, die ihre Validität für zukunftsmaßiges Bauen beanspruchen. Es gibt neue Bewertungsmethoden wie die Ökobilanz, die dazu beiträgt, alternative Lösungen für Bauteile und ihre Rückführung zu schaffen. Es wird ununterbrochen nach neuen Ansätzen gesucht, um die gestalterischen Potentiale von Bausystemen und Fertigungstechniken zu optimieren. Die – durch den wiederentdeckten Holzbau zum Aufschwung gekommene – Entwicklung der Vorfertigung von ganzen Gebäuden wird von Technologie-Unternehmen rasant angetrieben. Und im Bereich der Gebäudehülle werden neue Optimierungsebenen getestet, um den Nutzen der Baustoffe zu maximieren und die Gebäudetechnik zu reduzieren. Auch in naher Zukunft werden Experimente im Bauwesen weiterhin als Teil des planerischen Schaffens nötig sein. [1]

### 1.3 Entstehung ökologischer Bewertungssysteme

Als Kerngedanke der Nachhaltigkeit gilt das Zusammenführen unterschiedlicher Betrachtungswinkel vielfältiger Fachbereiche. Als einer der Anfänge gilt der im Jahre 1987 veröffentlichte „Brundtland Bericht“, der zum ersten Mal den Begriff der „nachhaltigen Entwicklung“ definierte. [6] Infolgedessen ließen der Weltgipfel in Rio de Janeiro 1992 und die zweite UN-Konferenz 1996 weitreichende Entwicklungen in der Gesetzgebung entstehen, die zu untereinander variierenden Bewertungssystemen für Gebäude führten. [7] [8]

Vorreiter dieser Systeme war der britische Standard **BREEAM** schon in den 1990er Jahren, darauf folgte 1998 das **LEED** System aus den USA, wobei beide noch heute zu den meist verbreiteten Systemen zählen. Großbritannien war auch das erste Land, das mit dem „Code for Sustainable Homes“ 2006 die Nachhaltigkeitsbewertung für Gebäude verpflichtend einführte. Hauptaugenmerk bei diesen frühen Bewertungssystemen liegt auf dem Rückbau und der Wiederverwendung von Bauteilen,



Herkunft und Recyclinganteilen verwendeter Materialien und Förderung emissionsarmer Materialien für Innenräume. Dadurch hängt bis zu 30 % der Gesamtbewertung von der Materialwahl ab. [1]

Ebenfalls weitreichende ökologische Anforderungen für Baumaterialien führte 2006 das Schweizer System **Minergie-Eco** ein, das 2013 die Berechnung durch Ökobilanzen miteinbezog und somit einen Großteil der Umweltwirkungen integrierte. [1]

In Deutschland begann die Entwicklung solcher Bewertungssysteme 2007 mit dem **DGNB** (Deutsches Gütesiegel Nachhaltigen Bauens) und dem **BNB** (Bewertungssystem Nachhaltigen Bauens). Im Gegensatz zu den anderen Bewertungsmethoden schließen diese Systeme den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes mit ein, z.B. mithilfe von Ökobilanzen, Lebenskostenberechnungen und Bewertungsskalen für Schadstoffe. Durch die komplette Untersuchung solch umfangreicher Faktoren gelang es nachweislich, die Umweltwirkungen an Gebäuden quantitativ zu reduzieren. [1]

Das Ausmaß der Umweltwirkungen mit den Ergebnissen einer Schadstoffanalyse zu ergänzen war aber keineswegs eine Idee des 21. Jahrhunderts. Schon 1858 schlug Max von Pettenkofer, einer der Vorreiter des Gesundheitsschutzes, vor, den CO<sub>2</sub> – Gehalt der Raumluft als Indikator für deren Verunreinigung zu testen. In weiten Teilen gingen auch schon die Ergebnisse zu Raumluft und Innenraumklima von Ole Fanger in den 1970er und 1980er Jahren in die bauphysikalischen Normen ein. Seit den frühen 1990er Jahren folgten immer mehr Untersuchungen von Schadstoffen und ihren Wirkungen durch den Staat und durch Forschungsinstitute, z.B. die Festlegung der **MAK**- Werte und **BAT**- Werte bzw. der **AGW**- sowie **BGW**- Werte durch die **DFG** (Deutsche Forschungsgemeinschaft). Von großer Bedeutung ist zudem die 2001 eingeführte Norm **DIN ISO 14020**. Laut dieser erfolgt die Kommunikation von Umwelteigenschaften und Bauprodukten nach drei Typen von Umweltkennzeichnungen (Typ I, Typ II, Typ III). [1]

- **Typ I Umweltkennzeichen**

Typ I Umweltzeichen werden an Produkte aufgrund besonderer Umweltleistungen vergeben. [9]

- **Typ II Umweltkennzeichen**

Typ II Umweltzeichen sind vom Hersteller selbst verantwortliche Kennzeichnungen von Produkten und können zur Unterstreichung ihrer Glaubwürdigkeit unabhängig geprüft werden. [9]

- **Typ III Umweltkennzeichen**

Typ III Umweltzeichen beinhalten eine ausführliche Beschreibung der Umweltleistung von Produkten ohne Wertung. Diese Kennzeichnung basiert auf der Ökobilanz **ISO 14040** und wird gemeinsam von dem Institut Bauen und Umwelt, dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und dem Umweltbundesamt vergeben. [9]

Ein weiterer Punkt bei der Berechnung von Umweltwirkungen ist die Lebenszyklusanalyse. Im Grunde besteht die Materialzyklusanalyse aus den Bereichen Rohstoffgewinnung, Herstellung, Verarbeitung, Transport, Nutzung, Nachnutzung und Entsorgung. Zum ersten Mal wurde dieser Prozess ansatzweise 1994 im **MIPS** (Material-Input-pro-Serviceeinheit) festgehalten. [10] Nach diesem Bemessungssystem wurde der Materialinput zur Herstellung und Nutzung eines Bauteils aufsummiert und als „Materialintensität“ ausgegeben. Einerseits wurden dabei erstmals die Parameter des Verbrauchs von

biotischen und abiotischen Ressourcen [kg], von Boden [kg], von Wasser [l] und von Luft [m<sup>3</sup>] bei den Bauprozessen berücksichtigt und damit ein materialbezogener Betrachtungsrahmen zum Zwecke einer Optimierung geschaffen. Andererseits bezieht sich diese Berechnung allein auf die Materialmasse und lässt keine Rückschlüsse auf die allgemeinen Umweltwirkungen zu. [1]

Die Grundlage für die heutige Bewertung der Umweltwirkungen wurde im Jahr 2000 als **DIN EN ISO 14040** und **14044** definiert und 2008 als Bestandteil von Gebäudezertifizierungen in die Planung mitaufgenommen. Diese legten die Vorgehensweise der Ökobilanzierung bzw. der **LCA** (Life Cycle Assessment) fest. Prinzipiell geht eine Ökobilanz ähnlich wie das MIPS-Konzept auf den gesamten Lebenszyklus des Produktes ein. Zusätzlich werden aber noch die Auswirkungen auf die Umwelt, wie z.B. Emissionen, berücksichtigt und Grundlagen für die Abschätzung weiterer Effekte ermittelt. [1]

Aufgrund dieser Entwicklungen sind heutzutage Hersteller oftmals verpflichtet, ihre Produkte ausführlich zu kennzeichnen; viele Unternehmen erkennen den Wert dieser Betrachtungsweise an. Es bietet sich dadurch nicht nur die Chance, die Herstellung zu optimieren, sondern sich auch als Unternehmen verstärkt ökologisch zu profilieren. [1]

Aus planerischer Sicht sind somit eine Vielzahl an Mitteln und Regeln geboten, um ökologische Bauweisen anzustreben. Gerade die Verbindung von Bauökologie und Baubiologie ist ein wichtiger Bestandteil der planerischen Auseinandersetzung mit diesem Thema. Die beiden Aspekte beinhalten einerseits die Auswirkungen des Gebauten auf die Umwelt und andererseits das Inbetrachtziehen des menschlichen Faktors, der den Menschen als Mittelpunkt festlegt. Der nachhaltige Baustoffeinsatz ist auf den gesamten Lebenszyklus zu beziehen, nicht nur auf einen Teil davon. Damit sich der Stoffkreislauf in diesem Prozess des Erschaffens und Wiederverwendens schließt, müssen die gebauten Objekte als Bestandteil eben dieses Zyklus gesehen werden. Um mögliche Optimierungen und Konsequenzen verstehen zu können, ist die Auseinandersetzung mit allen Phasen des Lebenszyklus notwendig. Die Betrachtung sowohl des Material- als auch des Gebäudelebenszyklus ist erst am effizientesten, wenn man korrelierende Ergebnisse erkennt und verarbeitet. Dadurch lassen sich Schlüsse auf das Gesamtsystem schließen und Optimierungspotentiale ableiten. [1]

Mittlerweile sind der **nicht erneuerbare Primärenergiebedarf** und das **Treibhauspotential** Leitindikatoren einer Ökobilanz und ihrer Auswertung. Falls zukünftig eine massive Nutzungskonkurrenz für nachwachsende Rohstoffe entstehen sollte, würde dies auch in diese Kategorie fallen. Nach heutigem Wissensstand ist bis zu 50% des Entwurfs aus ökologischer Sicht potentiell optimierbar, wenn noch geringe Änderungen am Projekt vorgenommen werden können; bis zu 30%, falls keine Modifikationen möglich sind. [11] Das Problem ist also nicht der fehlende technologische Fortschritt oder ausreichende Methoden, nachhaltig zu bauen. Vielmehr muss an der Erfahrung und einseitigen Sichtweise in diesem Bereich gearbeitet werden. Schadstoffarmes Bauen ist z.B. bereits sehr wohl durch bekannte Probleme wie Asbestbelastung in den Köpfen der Menschen verankert. Und die Ressource Baustoff wird auch zu jeder Zeit wertvoller. Es gilt also, dieses partielle Wissen in die Planung miteinzubeziehen und Andere zu ermutigen, es einem gleich zu tun. Mit mehr Erfahrungswerten können die Rahmenbedingungen umso besser angepasst werden und weitere Entwicklungen gefördert werden. Doch derzeit werden Materialkonzepte und baukonstruktive Umweltwirkungen separat voneinander wahrgenommen, obwohl sich erst bei simultaner Betrachtung das ganze Potential der ökologischen Betrachtung in der Ökobilanz entfaltet. Dabei stellt sich die Frage, ob jeder Baustoff komplett rückführbar gestaltet werden muss oder es nicht noch bessere Alternativen gibt. Hauptsächlich geht es

darum, die Lerneffekte dabei zuzulassen und neuer Forschung nachzugehen. Planer wie Hersteller können nach den drei Säulen der Nachhaltigkeit - Konsistenz (auf ein ökologisches System erhaltend ausgerichtete Planung), Suffizienz (geringer Bedarf an Ressourcen) und Effizienz (Ressourcenproduktivität) - agieren und sich gegenseitig in dieser Entwicklung unterstützen. [1] (Siehe Abbildung 2 für beispielhafte Themengebiete in diesen drei Ansätzen)

	<b>Konsistenz</b> <i>Natur- und Gesundheitsverträglichkeit</i>	<b>Suffizienz</b> <i>Bedarfshinterfragung</i>	<b>Effizienz</b> <i>Funktionale Leistungssteigerung</i>
<b>Gebäude</b>	Reduktion der Umweltwirkungen im Lebenszyklus	Bedarf für Nutzungswandel	Verbesserung der Flächeneffizienz
<b>Raumzone</b>	Gesundheitliche Unbedenklichkeit	Reduktion des Raumbedarfes	Betriebsorientierte Gestaltung
<b>Raum</b>		Reduktion der Ausstattungsqualität	
<b>Bauteil</b>	Erhöhung des Anteils nachwachsender Rohstoffe	Reduktion des Technisierungsgrades	Verbesserung der Konstruktionseffizienz
<b>Werkstoff</b>	Substitution von Rohstoffen	Reduktion der Detailanschlüsse	Verbesserung der technischen Leistung der Werkstoffe

Abbildung 2: Beispiele für Themengebiete auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und Gliederung in die drei Ansätze Konsistenz, Suffizienz und Effizienz [1]

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine ökologische Untersuchung von Baustoffen und Bauteilen durchgeführt, mit dem Fokus auf der Korrelation zwischen ihren mechanischen und ökologisch nachweisbaren Eigenschaften. Außerdem soll ein erweitertes Bewusstsein für nachhaltiges Bauen geschaffen werden, um die Planungslandschaft zu bereichern.

## 2 Bewertungsmethoden nachhaltiger Produkte

In diesem Kapitel wird ein detaillierter Überblick über die verschiedenen Arten von Bewertungsmethoden für das Nachhaltige Bauen geliefert. Nachdem es regionale Unterschiede in der Bewertung von Baustoffen und Gebäuden gibt, werden zwar die wichtigsten internationalen Methoden dargestellt und miteinander verglichen. Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch auf dem deutschen Raum.

### 2.1 Bauökologie und Baubiologie

Da der Mensch immer in Wechselwirkung mit gebauter und ungebauter Umwelt tritt und Eingriffe in dieser vornimmt, verändert er das bestehende Ökosystem und wird gleichzeitig von ihr beeinflusst. Aus dieser Beziehung entstehen die drei „Schutzziele des ökologischen Bauens“ [12]:

- Schutz der menschlichen Gesundheit
- Schutz des Ökosystems
- Schutz der Ressourcen

Daraus ergeben sich die zwei großen Themenfelder des nachhaltigen Bauens, die Bauökologie und die Baubiologie (siehe Abbildung 3). Die Baubiologie beschäftigt sich hauptsächlich mit dem Menschen und seinem Wohlbefinden im Raum, wohingegen die Bauökologie die Auswirkungen der Bauwerke auf die Umwelt in ihre Betrachtung miteinfließen lässt. Prinzipiell verfolgen beide Fachbereiche dasselbe Ziel, den schonenden Umgang mit natürlichen Ressourcen. Und erst die gemeinsame Betrachtung der beiden Aspekte ergibt ein Bild von maximaler Aussagekraft. [1]

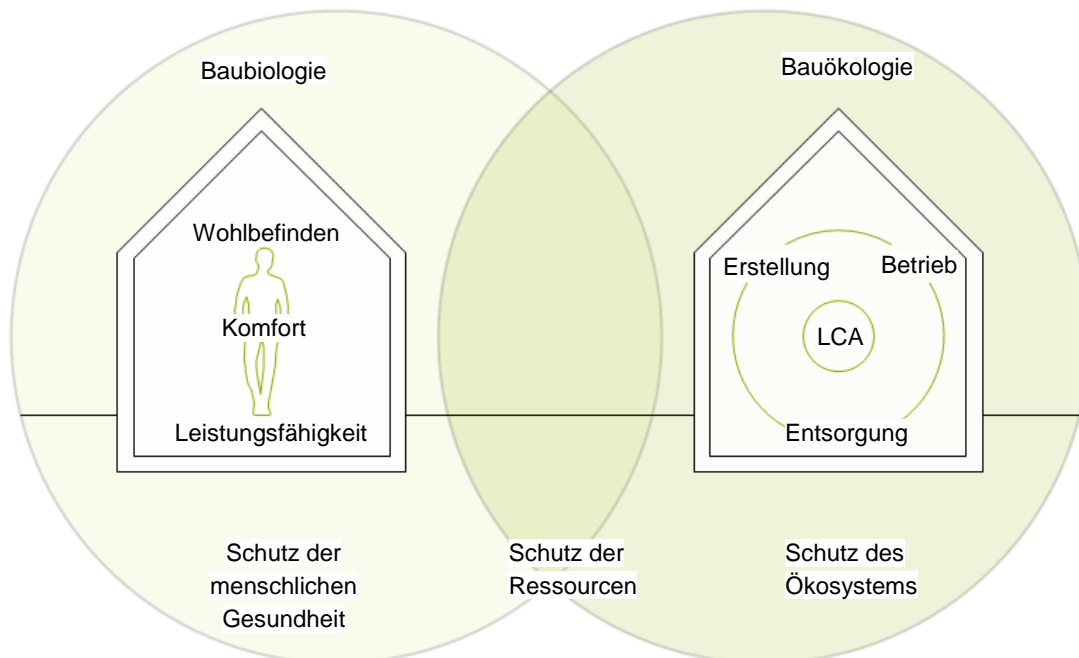


Abbildung 3: Schutzziele der Baubiologie und Bauökologie [1]

Die Bauökologie ist definiert als die Lehre von der Beziehung zwischen belebter und unbelebter Umwelt. Der Mensch greift durch Produktion und Verbrauch von Ressourcen in diese Wechselbeziehung ein und stört somit den ökologischen Kreislauf. Aufgabe der Ökologie ist somit die Optimierung des Lebenszyklus des Gebäudes, seiner Bauteile und daraus bestehenden Baustoffe. Die einzelnen Phasen von der Erstellung der Baustoffe über den Betrieb des Gebäudes bis hin zur Entsorgung der Bauelemente werden als Teil des größeren Kreislaufs des Ökosystems gesehen und dementsprechend analysiert. Mithilfe dieser Daten werden z.B. Ökobilanzen angefertigt, die Materialwahl angepasst und das Entwurfskonzept überarbeitet. Im Allgemeinen gilt es, die Bauprozesse und das Nutzerverhalten so zu optimieren, dass Ressourcen geschont werden können. Genau dieser Punkt verbindet die Bauökologie mit der Baubiologie und kann dazu beitragen, den Ressourcenverbrauch weltweit zu verringern. Denn ungefähr 30% der CO<sub>2</sub>-Emissionen und 40 % des Primärenergieverbrauchs weltweit wird durch die Baubranche verursacht. Trotz alledem sollte neben der Entwicklung neuer Baustoffe die Funktionalität des Gesamtsystems im Vordergrund bestehen bleiben. [1]

In der Baubiologie liegt im Gegensatz dazu der Fokus ganz auf der Wechselwirkung zwischen dem Menschen und seiner erschaffenen Umwelt. In Verbindung damit wird des öfteren das schadstoffarme und umweltfreundliche Bauen gesetzt. Dieser Bereich des Bauwesens beschäftigt sich mit Komfort, Wohlbefinden, Leistungsfähigkeit und Schonung der Ressourcen zum Wohle des gesünderen Wohnens und Arbeitens. Eines der relevantesten Hauptfelder ist die Bewertung von Schadstoffen, also die Bewertung z.B. von Baustoffen, die schädliche Stoffe in die Umgebung emittieren (**flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen, Lösemittel, Bindemittel, chemische Holzschutzmittel**, etc.). Dabei müssen auch Alterungsprozesse solcher Verbindungen berücksichtigt werden. Besonders zu beachten für Planer sind Nutzungsoberflächen, Oberflächenbeläge und Beschichtungen, Grundierungen und Dichtmittel. Bei der Auswahl der Materialien hängt sehr viel vom aktuellen Stand der Forschung ab, selbst innovative Produkte können nach relativ kurzer Zeit als zu große Schadstoffemitter gelten.

Zur Bewertung dieser Stoffe werden Richtwerte nach 2 Konzepten gegliedert [13]:

- Toxikologisch abgeleitetes Konzept
- Statistisch abgeleitetes Konzept

Bei dem toxikologisch abgeleiteten Konzept werden bestimmte Stoffkonzentrationen als In-vivo-Experiment an Versuchsobjekten getestet. Dadurch lassen sich Grenzwerte definieren, die bei Überschreiten erkennbare Organstörungen oder Stoffwechselstörungen mit sich bringen würden. Nachteil dieser Variante ist das fehlende Zusammenwirken der Stoffe, somit lassen sich keine Resultate auf Summenkonzentrationen mehrerer Stoffe einwandfrei festlegen. [1]

Hingegen bei dem statistisch abgeleiteten Konzept werden eine große Anzahl an Raumluftmessungen vorgenommen, die auf gewisse Orientierungswerte schließen lassen. Diese Art der Datenanalyse war z.B. Grundlage für die Entwicklung eines auf Schadstoffen basierenden Bewertungssystems der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V. (**AGÖF**). [1]

Zielführend ist eine Kombination beider Konzepte: Die Betrachtung der Stoffkonzentrationen einzelner schädlicher Stoffe auf der einen Seite und der Summenkonzentration von Schadstoffen in der Raumluft auf der anderen Seite ermöglicht, Grenzwerte zur Einstufung im Bauwesen zu definieren und ein

besseres Verständnis für Planungsbeteiligte zu fördern. Beispielsweise werden die **TVOC- Werte** (Summe aller flüchtigen organischen Verbindungen in der Luft) folgendermaßen festgelegt [13]:

- Toxikologische Daten:
  - Hygienische Unbedenklichkeit bei 300 – 1000 µg/m<sup>3</sup>
  - Hygienische Bedenklichkeit bei 3000 – 10 000 µg/m<sup>3</sup>
- Statistische Daten (laut AGÖF):
  - Normalkonzentration bei 360 µg/m<sup>3</sup>
  - Auffälligkeitswert P 50 bei 1572 µg/m<sup>3</sup>
  - Orientierungswert P 90 bei 1000 µg/m<sup>3</sup>

Als Empfehlung des Umweltamtes gilt der Richtwert von 200 – 300 µg/m<sup>3</sup>, wobei erst bei 1000 µg/m<sup>3</sup> ein grundsätzlicher Handlungsbedarf besteht und bei 10 000 µg/m<sup>3</sup> ein sofortiger Handlungsbedarf notwendig ist. Weitere Richtwerte sind bei den Umweltproduktdeklarationen (Typ I, Typ II oder Typ III) einzusehen. Zahlreiche Gütesiegel und Label weisen auf eine bestimmte Eignung hin, die *„Informationsfülle ist hier jedoch immens und nicht jedes Label hat die zunächst vermutete Aussagekraft.“* [1]

Aufgrund der unüberschaubaren Menge an Informationen über Zertifizierungen von Gebäuden wird im Folgenden ein Überblick sowohl über die verschiedenen Umweltproduktdeklarationen nach DIN ISO 14020 als auch über die internationalen Zertifizierungssystemen gegeben.

## 2.2 Bewertungssysteme

### 2.2.1 Baubiologische Umweltproduktdeklarationen

Für die Auswahl baubiologisch sinnvoller Baustoffe bzw. gesundheitlich unbedenklicher Bauprodukte existieren zahlreiche Gütesiegel und Label, sogenannte Typ I Umweltproduktdeklarationen. Solche Umweltzeichen geben mehr Auskunft über die Prüfung zur Vergabe der Labels. Spezifische Produkttests kennzeichnen Produkte, die innerhalb einer bestimmten Produktgruppe umweltfreundlicher sind als andere. Die Prüfkriterien werden dabei sehr ausführlich beschrieben und zertifizierte Produkte als Orientierungshilfe genannt. [1]

In folgender Tabelle 1 (nach [1]) wird ein kurzer Überblick über Gütesiegel und Label dargestellt, die vor allem im deutschsprachigen Raum empfehlenswert sind:

Symbol	Gütesiegel für Bauprodukte	Produktgruppen	Prüfkriterien	Empfehlung/ Vergabe
	Blauer Engel <i>Umweltbundesamt/ RAL Deutsches Institut für Gütesicherung e.V.</i>	Bitumenanstriche <sup>1</sup> , Bodenbeläge aus Holz und Holzwerkstoffen, Bodenverlegewerkstoffe <sup>1</sup> , Dämmstoffe aus Altpapier und Altglas, emissionsarme Dichtstoffe für den Innenraum <sup>2</sup> , Holz und Holzwerkstoffe, Lack/ Lasuren <sup>2</sup> , Mauer- und Dachsteine Tapeten, Wandfarben <sup>2</sup> , Wärmedämmputzsysteme <sup>1</sup> , Zemente/ Putze/ Mörtel.	Je nach Labelbezeichnung: „Schützt das Klima“: Auswirkungen auf das Klima, „Schützt Umwelt und Gesundheit“: Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen, „Schützt die Ressourcen“: Ressourcenverbrauch. Individuelle Prüfkriterien für jede Baustoffgruppe.  <i>www.blauer-engel.de</i>	Besonders empfehlenswert <sup>3</sup> .  In Anspruch, Unabhängigkeit, Kontrolle und Transparenz exzellent.  Vergeben in Deutschland.
	Eco-Institut-Label <i>eco-Umweltinstitut GmbH</i>	Anstrich- und Beschichtungsstoffe, Dichtstoffe, Holzwerkstoffe/ Ausbauplatten, Klebstoffe, mineralische Bauprodukte, Holz- und Korkfußböden, Parkett, Laminat, Paneele, Teppich, elastische und Outdoor-Bodenbeläge.	Emissionsanalysen für Formaldehyd, VOC, TVOC und TSVOC etc. sowie Analyse von gefährdenden Inhaltsstoffen wie Schwermetalle, Pestizide, Biozide, Weichmacher etc. Zertifizierungsrelevante Labelbezeichnungen <sup>2</sup> : EC1/ EC1 <sup>Plus</sup> sowie EC1-R/ EC1 <sup>Plus</sup> -R.  <i>www.eco-institut.de/von-der-analyse-bis- zur-qualitätssicherung/eco-institut-label/</i>	Empfehlenswert <sup>3</sup> .  Exzellente in Anspruch, Kontrolle und Transparenz, nur mittelmäßig bei Unabhängigkeit.  Weltweit vergeben.
	EMICODE <i>GEV Gemeinschaft Emissionskontrollierte Verlegewerkstoffe, Klebstoffe und Bauprodukte e.V.</i>	Klebstoffe, Grundierungen, Voranstriche, Spachtelmassen, Unterlagen, Dämmmaterialien, Parkettlacke, Estriche etc.	Emissionsanalysen für VOC, TVOC und TSVOC.  <i>www.emicode.com</i>	Empfehlenswert <sup>3</sup> .  Exzellente in Anspruch und Transparenz, nur mittelmäßig bei Unabhängigkeit und Kontrolle.  Weltweit vergeben.
	EU Ecolabel <i>Kommission der Europäischen Gemeinschaften</i>	Lacke/ Lasuren, Wandfarben, Bodenbeläge	Individuelle Prüfkriterien für jede Baustoffgruppe.  <i>http://ec.europa.eu/environmental/ecolabel</i>	Besonders empfehlenswert <sup>3</sup> .  In Anspruch, Unabhängigkeit, Kontrolle und Transparenz exzellent.  Vergeben in der EU.
	FSC <i>Forest Stewardship Council A.C.</i>	Holz und Holzwerkstoffe.	Umweltgerechte, sozial verträgliche und ökonomisch sinnvolle Bewirtschaftung von Wäldern.  <i>www.fsc-deutschland.de</i>	Besonders empfehlenswert <sup>3</sup> .  In Anspruch, Unabhängigkeit, Kontrolle und Transparenz exzellent.  Weltweit vergeben.
	Goldenes M <i>Deutsche Gütegemeinschaft Möbel e.V.</i>	Holz und Holzwerkstoffe.	Sicherheit, Qualität und Gesundheitsverträglichkeit.  <i>www.dgm-moebel.de</i>	Empfehlenswert <sup>4</sup> .  Exzellente in Anspruch, Unabhängigkeit und Kontrolle, nur mittelmäßig bei Transparenz.  Vergeben in Deutschland.

	GoodWeave <i>GoodWeave International e.V. Deutschland</i>	Bodenbeläge.	Verzicht auf Kinderarbeit, Gewährleistung angemessener Löhne und Sicherheit am Arbeitsplatz, Organisation von Sozial- und Bildungsprogrammen sowie Kontrolle der Einhaltung von Umwelt-Mindeststandards.  <i>www.goodweave.de</i>	Besonders empfehlenswert <sup>3</sup> .  In Anspruch, Unabhängigkeit, Kontrolle und Transparenz exzellent.  Weltweit vergeben für Teppiche aus Indien und Nepal.
	GuT-Teppich-Siegel <i>Gemeinschaft umweltfreundlicher Teppichboden e.V.</i>	Bodenbeläge	Schadstoff-, Emissions- und Geruchsanalyse.  <i>www.gut-ev.de</i>	Empfehlenswert <sup>4</sup> .  Exzellent in Anspruch, Kontrolle und Transparenz, nur mittelmäßig bei Unabhängigkeit.  Vergeben in Deutschland.
	Kork-Logo <i>Deutscher Kork-Verband e.V.</i>	Bodenbeläge.	Emissionsanalysen auf VOC, Formaldehyd etc.  <i>www.eco-institut.de</i>	Empfehlenswert <sup>3</sup> .  Exzellent in Anspruch, Kontrolle und Transparenz, nur mittelmäßig bei Unabhängigkeit.  Vergeben in Deutschland
	Natureplus <i>natureplus. e.V.</i>	Dämmstoffe, Lacke/ Lasuren, Wandfarben, Holz und Holzwerkstoffe, Bodenbeläge, Zemente/ Putze/ Mörtel, Mauer-/ Dachsteine.	Klima, Gesundheit und Nachhaltigkeit: Ressourcenschonung un der Rohstoffgewinnung und Produktion, Emissionsanalyse für VOC und Analyse über die Verwendung gefährdender Substanzen z.B Schwermetalle.  <i>www.natureplus.org</i>	Besonders empfehlenswert <sup>3</sup> .  In Anspruch, Unabhängigkeit, Kontrolle und Transparenz exzellent.  Vergeben in Deutschland.
	Naturland <i>Naturland – Verband für naturgemäßen Landbau e.V.</i>	Holz und Holzwerkstoffe.	Ökologische Waldbewirtschaftung.  <i>www.naturland.de/wald_und_holz.html</i>	Besonders empfehlenswert <sup>3</sup> .  In Anspruch, Unabhängigkeit, Kontrolle und Transparenz exzellent.  Vergeben in Deutschland und Österreich
	ÖkoControl <i>Gesellschaft für Qualitätsstandards ökologischer Einrichtungshäuser mbH</i>	Holz und Holzwerkstoffe.	Gesundheit, Umwelt und Ressourcen.  <i>www.oekocontrol.com</i>	Besonders empfehlenswert <sup>3</sup> .  In Anspruch, Unabhängigkeit, Kontrolle und Transparenz exzellent.  Vergeben in Deutschland.
	PEFC <i>Deutscher Forst-Zertifizierungsrat DFZR</i>	Bodenbeläge, Holz und Holzwerkstoffe.	Soziale, ökologische und wirtschaftliche Holzbewirtschaftung.  <i>www.pefc.de</i>	Empfehlenswert <sup>3</sup> .  Exzellent in Anspruch, Unabhängigkeit und Transparenz, nur mittelmäßig bei Kontrolle.  Weltweit vergeben.
	<sup>1</sup> für die Zertifizierung nach BNB 2011 relevant <sup>2</sup> für die Zertifizierung nach BNB 2011 und DGNB (nutzungsprofil Büro- und Verwaltungsgebäude 2012) relevant <sup>3</sup> Empfehlung gemäß <a href="http://www.label-online.de">www.label-online.de</a>			

Tabelle 1: Vergleich der Gütesiegel und Label im deutschsprachigen Raum, nach [1]



Desweiteren geben Typ III Umweltproduktdeklarationen Auskunft über Gefährdungspotenziale für den Menschen, die wissenschaftlich noch nicht ganz belegt wurden. Hilfreich für die Baustoffwahl ist hierfür z.B. die Datenbank **WECOBIS** [14]. Darin werden ökologische Bewertungen von Baustoffgruppen verzeichnet, auch im Bezug auf baubiologische Aspekte. Weiterhin lassen sich die in einem Baustoff enthaltenen Schadstoffe in technischen Produkt- und Sicherheitsdatenblättern nachlesen. Enthalten sind oft Anwendungshinweise für das Produkt, eventuell gefährliche Schadstoffe beim Einbau bzw. bei der Entsorgung sowie deren gesamte Inhaltsstoffe. Schwerwiegende Auswirkungen auf den Menschen haben sogenannte **SVHCs** (Substances of Very High Concern), also besonders besorgniserregende Stoffe, diese müssen in solchen Datenblättern immer gekennzeichnet sein. Aktuelle Listen dieser Stoffe führen die **ECHA** (European Chemicals Agency) [15] mit zugeordneten **CAS**- und **EC**- Nummern (internationaler Bezeichnungsstandard für chemische Stoffe und Enzyme) auf, oder das **GISBAU** (Gefahrstoff-Informationssystem der **BG BAU**) mit ihrem **GISCODE** [16]. Der **GISCODE** fasst Produkte mit vergleichbarer Gesundheitsgefährdung zusammen und gibt in übersichtlicher Form an, wie gefährlich die Auswirkungen bestimmter Produkte auf den Menschen oder die Umwelt sein können. Obwohl Faktoren wie der **VOC**-Gehalt nicht in diesem System berücksichtigt werden und in Produktbroschüren und technischen Datenblätter oft nicht die Art der Codierung angegeben wird, lässt sich auf Nachfrage beim Hersteller der **GISCODE** in der Regel schnell ermitteln. [1]

## 2.2.2 Bauökologische Bewertungshilfen

Als Grundlage für die ökologische Bewertung von Gebäuden dienen Normen, Merkblätter und bauökologische Leitfäden, die die Rahmenbedingungen für eine effektive Herangehensweise definieren. Darauf aufbauend existieren einige Gebäudestandards und Gebäudezertifizierungssysteme, die eine Aussage über die Gebäudequalität ermöglichen. Um die Berechnung eben dieser Qualität zu vereinfachen, gibt es diverse Datensammlungen und Datenbanken sowie unterstützende Softwaretools. Im Folgenden werden einige nützliche Aspekte dieser Bewertungshilfen erläutert, weitere Informationen zu Hilfsmitteln für die bauökologische Bewertung finden sich auf der Website des **Joint Research Centre** (JRC) [17] der Europäischen Kommission. [1]

### NORMEN

Wie schon zu Anfang erwähnt, bilden die europäischen Normen **DIN EN ISO 14040** [18] und **14044** [19] die gesetzlichen Grundlagen für eine ökologische Bewertung im Allgemeinen, während die im Jahre 2011 erschienene **DIN EN 15978** [20] die Ökobilanz speziell für Gebäude genauer definiert. Letztere gibt vor, nach welcher Herangehensweise Daten zu verwenden sind. Die Norm schafft einheitliche Voraussetzungen und erleichtert die Kommunikation der gewählten Systemgrenzen. [1] Es findet eine Unterteilung der Analyse in Module statt, die den Lebenszyklus eines Produkts beschreiben:

- A1 – A3: Herstellung
- A4 – A5: Bau und Errichtung
- B1 – B7: Nutzung
- C1 – C4: Entsorgung
- Modul D: Recycling

Für die einzelnen Module legt die Norm die wichtigsten Einflussfaktoren fest und erläutert, wie die Baustoffdaten aus EPDs (Umweltproduktdeklarationen) in einer bauökologischen Analyse einzusetzen sind. Weiteren Aufschluss darüber gibt auch die Norm EN 15804 [21], die grundlegende Anwendungshinweise von EPDs erläutert. [1]

### **MERKBLÄTTER UND LEITFÄDEN**

Als wichtiges Hilfsmittel für eine ökologische Gebäudeplanung ist vor allem der „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ [22] des deutschen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) zu nennen. Darin werden Empfehlungen, Bewertungen und Entwurfsvorschläge für nachhaltige Gebäude und deren Lebenszyklus abgegeben. [1]

Außerdem gibt es das „Informationsportal Nachhaltiges Bauen“ des deutschen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) [23], in dem sich Arbeitshilfen zur Betrachtung von Gebäudelebenszyklen befinden. Die bereits erwähnte Datensammlung WECOBIS [14] und das Gefahrstoff-Informationssystem WINGIS [24] bieten Informationen über gesundheitliche und ökologische Aspekte von Baugruppen sowie über Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeiten von Baustoffen. [1]

Weitere Datensammlungen zur Beurteilung von Nutzungs- und Lebensdauern von Bauteilen existieren seit 2006 in Österreich. Der Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile [25] bietet eine Übersicht von Richtwerten zur Nutzungsdauer von Bauteilen. Das Online Informationssystem baubook [26] oder das Online Tool Eco2Soft [27] des Österreichischen Instituts für Baubiologie und Bauökologie (IBO) enthalten Bauteilkataloge mit Standardaufbauten und deren Ökobilanzergebnisse sowie Berechnungen für ökologische Eigenschaften von Neubauten, Sanierungen und Entsorgungsprozessen. [1]

Von der Schweizerischen Vereinigung der Ingenieure und Architekten (SIA) werden Empfehlungen für Strategien zum nachhaltigen Bauen (SIA 112/1) [28] und für die Berechnung Grauer Energie und Treibhausgasemissionen (SIA 2032) [29] bereitgestellt. Den Zugriff auf schon berechnete Standardbauteile zur Ermittlung von Umweltwirkungen bietet nicht nur das österreichische baubook, sondern auch der schweizerische Elektronische Bauteilkatalog [30]. Desweiteren hilft das SIA Tool SNARC [31] v.a. in der Vorplanungsphase dabei, Vergleiche hinsichtlich der Nachhaltigkeit von Gebäuden zu erstellen. Dagegen konzentriert sich das Tool Lesosai [32] eher auf Energiebedarfsrechnungen und die Gebäudezertifizierung nach Minergie-ECO-Standard [33], die auf dem Merkblatt SIA 2032 beruht. Weiterhin dienen die Schweizer Eco-BKP Merkblätter dazu, die ökologische Bewertung von Baukonstruktionen zu unterstützen. [34] Sie geben Anregungen bezüglich ökologisch unbedenklicher Baustoffe und baubiologisch empfehlenswerte Produkte. [1]

### **GEBÄUDEZERTIFIZIERUNGSSYSTEME**

Mittlerweile verwendete Gebäudestandards benötigen häufig Informationen aus zuvor durchgeführten Ökobilanzen und mit der Norm DIN EN 15978 [20] wird sich dieses Vorgehen in Zukunft allgemein etablieren. Verschiedene Zertifizierungssysteme besitzen jedoch unterschiedliche Ansprüche und Schwerpunkte, weswegen sich Umfang und Detaillierungsgrad je nach System differenzieren. [1]

In Tabelle 2 (nach [1]) wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Zertifizierungssysteme dargestellt:

Symbol	Name des Systems	Zertifizierungsorganisation	Zertifizierungsschwerpunkte, Anwendungsbereiche und Kosten	Betrachtete Ökobilanzaspekte
	BREEAM (UK) <i>Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology</i>	Building Research Establishment (BRE) <a href="http://www.breeam.org">www.breeam.org</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung der ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit</li> <li>• Neubauten und Bestandsgebäude aller Art</li> <li>• Schwerpunkt auf ökologischer Nachhaltigkeit und Energieeffizienz</li> <li>• <i>Kosten der Zertifizierung: hoch</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökobilanzierung mit verschiedenen Tools, basierend auf EN ISO 14040 und 14044 für Herstellung, Instandsetzung/ Nutzung und Entsorgung</li> <li>• Gebäudelebenszyklus: 60 Jahre</li> <li>• Betrachtung von mindestens drei Umweltindikatoren erforderlich</li> </ul>
	LEED (USA) <i>Leadership in Energy &amp; Environmental Design</i>	US Green Building Council <a href="http://www.usgbc.org/leed">www.usgbc.org/leed</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung der ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit</li> <li>• Neubauten und Bestandsgebäude aller Art (außer Wohnbauten)</li> <li>• Schwerpunkt auf ökologischer Nachhaltigkeit und Energieeffizienz</li> <li>• <i>Kosten der Zertifizierung: hoch</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökobilanz bisher nur testweise als Kriterium eingeführt für die Phasen der Herstellung, Transport, Instandhaltung, Rückbau und Entsorgung</li> <li>• Verwendete Wirkungskategorien und –indikatoren: Treibhauspotenzial (GWP), Ozonschichtabbaupotenzial (ODP), Versauerungspotenzial (AP), Überdüngungspotenzial (EP), Einflusspotenzial auf Atemwege, Primärenergiebedarf</li> </ul>
	Minergie-ECO (CH) <i>Minergie</i>	Verein Minergie <a href="http://www.minergie.ch">www.minergie.ch</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung von Nutzerkomfort, Energieeffizienz sowie einer gesunden ökologischen Bauweise</li> <li>• Neubauten und Modernisierungen (Wohnbauten, Verwaltungsgebäude, Schulen)</li> <li>• <i>Kosten der Zertifizierung: mittel bis hoch</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vereinfachte Ökobilanz: Bewertung mithilfe des SIA-Merkblatts 2032 „Graue Energie von Gebäude“ für Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung</li> <li>• Gebäudelebenszyklus: 60 Jahre</li> <li>• Verwendete Wirkungskategorien und –indikatoren: Graue Energie</li> </ul>
	SNBS (CH) <i>Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz – Hochbau</i>	Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz <a href="http://www.nnbs.ch/standard-snbs/">www.nnbs.ch/standard-snbs/</a>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung der ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit</li> <li>• Neubauten und Bestandsgebäude (jeweils Wohngebäude, Büro- und Verwaltungsgebäude)</li> <li>• <i>Kosten der Zertifizierung: hoch</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vereinfachte Ökobilanz für Gebäudeerstellung, Betrieb und Mobilität</li> <li>• Gebäudelebenszyklus: 60 Jahre</li> <li>• Verwendete Wirkungskategorien und –indikatoren: Treibhauspotenzial (GWP), nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PE<sub>ne</sub>)</li> </ul>

	<p>DGNB (D)</p> <p>ÖGNI (A)</p> <p>SGNI (CH)</p>	<p>Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) <i>www.dgnb.de</i></p> <p>Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft (ÖGNI) <i>www.ogni.at</i></p> <p>Schweizer Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft (SGNI) <i>www.sgni.ch</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung der ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit</li> <li>• Neubauten (Büro- und Verwaltungsgebäude, Handelsbauten, Industriebauten, Bildungsbauten, Wohngebäude, Hotels etc.) und Bestandsgebäude (Büro- und Verwaltungsgebäude, Handelsbauten, Industriebauten, Wohngebäude)</li> <li>• Alle drei Nachhaltigkeitsaspekte werden gleichwertig miteinbezogen</li> <li>• <i>Kosten der Zertifizierung: hoch</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökobilanzierung basierend auf EN ISO 14040 und 14044 für die Phasen Herstellung, Instandhaltung, Rückbau und Entsorgung</li> <li>• Gebäudelebenszyklus: 50 Jahre</li> <li>• Verwendete Wirkungskategorien und –indikatoren: Treibhauspotenzial (GWP), Ozonschichtabbaupotenzial (ODP), Ozonbildungspotenzial (POCP), Versauerungspotenzial (AP), Überdüngungspotenzial (EP), nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PE<sub>ne</sub>), Gesamtprimärenergiebedarf und Anteil erneuerbarer Primärenergie (PE<sub>e</sub>)</li> </ul>
	<p>BNB (D)</p> <p><i>Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude</i></p>	<p>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit <i>www.bnb-nachhaltigesbauen.de</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertungskriterien und Gewichtung analog zu DGNB</li> <li>• Bewertung der ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit</li> <li>• Nur Neubauten (Büro- und Verwaltungsgebäude, Schulen)</li> <li>• <i>Kosten der Zertifizierung: hoch</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökobilanzierungsaspekte analog zu DGNB</li> </ul>
	<p>TQB (A)</p> <p><i>Total Quality Building Assessment</i></p>	<p>Österreichische Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (ÖGNB) <i>www.oegnb.net/tqb.htm</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung der ökologischen, sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit</li> <li>• Neubauten und Bestandsgebäude (Wohn-, Büro- und Sonderbauten)</li> <li>• Alle drei Nachhaltigkeitsaspekte werden gleichwertig gewichtet</li> <li>• <i>Kosten der Zertifizierung: vergleichsweise niedrig</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vereinfachte Ökobilanz: Bewertung mithilfe des OI3-Index für Herstellung und Instandhaltung. Die Entsorgung wird mithilfe des Indikators EI (bewertetes Abfallvolumen) bestimmt</li> <li>• Verwendete Wirkungskategorien und –indikatoren: Treibhauspotenzial (GWP), Versauerungspotenzial (AP), nicht erneuerbarer Primärenergieeinheit (PEI<sub>ne</sub>)</li> </ul>

Tabelle 2: Vergleich der üblichen Zertifizierungssysteme, nach [1]

Obwohl sich ein direkter Vergleich schwierig gestaltet, wird im Folgenden ein Überblick über den prinzipiellen Fokus der Gebäudezertifizierungssysteme gegeben:

- **BREEAM und LEED**

Die Ursprünge der Gebäudezertifizierungssysteme aus dem späten 20. Jahrhundert kommen aus dem Vereinigten Königreich und Amerika. Das in Großbritannien entwickelte System **BREEAM** (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) [35] und das aus den USA stammende System **LEED** (Leadership in Energy and Environmental Design) [36] setzen ihren Fokus auf die energetische Gebäudequalität mittels quantitativer Berechnungen [37]. Bei **BREEAM** ist die Ökobilanz nach **DIN EN ISO 14040** und **14044** verpflichtend für die Phasen der Herstellung, Nutzung und Entsorgung (mithilfe des nationalen Ökobilanzsystems), wobei von einer technischen Lebensdauer von 60 Jahren ausgegangen wird. Dagegen ist bei **LEED** die Ökobilanz erst teilweise als Testkriterium eingeführt worden. **BREEAM** unterscheidet zwischen den sechs Kategorien „Nicht Zertifiziert“, „Bestanden“, „Gut“, „Sehr Gut“, „Exzellente“ und „Herausragend“ während **LEED** die vier Zertifizierungsgrade „Zertifiziert“, „Silber“, „Gold“ und „Platin“ besitzt. [38]

- **Minergie und Standard Nachhaltiges Bauen der Schweiz**

Die Schweizer Gebäudezertifizierung Minergie [39] kennt einige Standards wie **Minergie –P** oder **Minergie – A**, die ein Label für besondere Energieeffizienz sind. Insgesamt fokussiert sich das System auf den Energiebedarf des Gebäudes, wobei Aspekte der Baubiologie (Komfort und Gesundheit) und der Bauökologie berücksichtigt werden. [37] Ergänzt werden können diese Standards durch das **Minergie-ECO** Label, das auf die Reduktion besonderer Umweltbelastungen mit dem Fokus auf verwendete Baumaterialien abzielt, jedoch bisher nicht durch das **World Green Building Council** anerkannt ist. Dabei wird mit einer vereinfachten Ökobilanz (Graue Energierechnung) bei einer Lebensdauer von 60 Jahren gerechnet. [1]

Weiterhin gibt es den Standard Nachhaltiges Bauen der Schweiz (**SNBS**) des Netzwerkes für Nachhaltiges Bauen Schweiz (**NNBS**) [40], dessen Ziel die Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsdimensionen Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt darstellt. Dabei wird eine vereinfachte Ökobilanz mit den Faktoren der Gebäudeerstellung, dem Gebäudebetrieb und der Mobilität bei einer Lebensdauer von 60 Jahren unter Berücksichtigung von zwei Wirkungsindikatoren (Treibhauspotenzial GWP und nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf  $PE_{ne}$ ) verwendet. Dementsprechend werden Noten von 1 – 6 vergeben, wobei 6 als Bestnote gilt. Jedoch befindet sich dieses System noch in der Testphase. [1]

- **BNB und DGNB**

Im Gegensatz zu den Varianten aus dem 20. Jahrhundert berücksichtigen das Anfang des 21. Jahrhunderts entstandene deutsche Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (**BNB**) und das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen (**DGNB**) [41] alle drei Nachhaltigkeitsaspekte (ökologisch, sozial und ökonomisch). Die Grundlage dieses ganzheitlichen Ansatzes bildet die vollständige Ökobilanz nach **DIN EN ISO 14040** und **14044** für die Phasen der Herstellung, Instandhaltung, Rückbau und Entsorgung. Bei einer Lebensdauer von 50 Jahren werden sieben Wirkungskategorien (Treibhauspotenzial GWP, Ozonschichtabbaupotenzial ODP, Ozonbildungspotenzial POCP, Versauerungspotenzial AP, Überdüngungspotenzial EP, nicht

erneuerbarer Primärenergiebedarf  $PE_{ne}$ , Gesamtprimärenergiebedarf und Anteil erneuerbarer Primärenergie  $PE_e$ ) berücksichtigt. Die BNB Zertifizierung ist mittlerweile in Deutschland per Bundesgesetz verpflichtend für öffentliche Bauten, wohingegen das DGNB auf freiwilliger Basis erstellt werden kann. Das DGNB kommt unter anderem auch in der Schweiz (SGNI), Österreich (ÖGNI) und China zur Verwendung. Die drei Beurteilungsgrade hierbei sind „Bronze“, „Silber“ und „Gold“. [1]

- **TQB**

Auch bei dem Bewertungssystem **TGB** (Total Quality Building) der Österreichischen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (**ÖGNI**) [42] wird ein ganzheitlicher Ansatz zur ökologischen Betrachtung verfolgt. Hierbei werden drei Umweltindikatoren (Treibhauspotenzial GWP, Versauerungspotenzial AP und nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf  $PE_{ne}$ ) im Ökoindex 3 (OI3-Indikator) [26] zusammengeführt. Mittels einer linearen Funktion werden die aufsummierten Umweltwerte der einzelnen Bauteile auf  $1m^2$  der Konstruktionsfläche bezogen und auf eine Punkteskala mit dem Wertebereich von 0 bis 100 umgerechnet. Danach werden die berechneten Punkte für jede der drei Wirkungskategorien des OI3-Indikators mit identischer Gewichtung summiert; das Ergebnis stellt die Gesamtpunktzahl der Zertifizierung dar. Erleichtert wird dieses Verfahren durch ein kostenloses Online Tool, dessen Ergebnisse an die ÖGNB übermittelt und nach einer geringfügigen Zahlung durch einen ÖGNB-Prüfer verifiziert werden können. [1]

- **Baubiologische Zertifizierungssysteme**

In der Regel sind die Bewertungen von Schadstoffen bereits in vielen Gebäudezertifizierungen enthalten. Dennoch existieren zusätzlich zu den bereits angesprochenen Labeln baubiologische Gütesiegel speziell für Gebäude. Diese befassen sich vor allem mit dem dort herrschenden Innenraumklima. So gibt es z.B. das Schweizer Label Gutes Innenraumklima (**GI**) [43], das die Innenraumluftqualität von Gebäuden anhand von chemischen Schadstoffanalysen, Keimanalysen und Ermittlung des Feinstaubes durch die Zuluft prüft. Außerdem beinhaltet die Analyse Radon- und Kohlendioxid-Messungen. Ein weiteres Gütesiegel ist der deutsche **SHI-Gebäudepass** des **Sentinel Haus Instituts** [44], der sich an den Grenzwertempfehlungen des Umweltbundesamtes (**UBA**), der Weltgesundheitsorganisation (**WHO**) und den **AGÖF**-Werten orientiert. Weitere Informationen hierzu sind auf den Webseiten der Schweizer Zertifizierungsstelle für Produkte und Personen im Bauwesen (**SCERT**) [45] oder des **Sentinel Haus Instituts** zu finden. [1]

In folgender Aufstellung (Tabelle 3) findet sich ein Kriterienvergleich bauökologischer Zertifizierungssysteme (nach [1]). Darin werden bestimmte Aspekte der nachhaltigen Betrachtung innerhalb der bekanntesten Bewertungssysteme veranschaulicht:

Kriterien		BREEAM	LEED	MINERGIE -ECO	DGNB	TQB
Ökologische Aspekte	Umweltbelastungen/ Verschmutzung	■	■	■	■	■
	Material/ Ressourcen	■	■	■	■	■
	Abfall	■	■	■	■	■
	Wasser	■	■	■	■	■
Ökonomische Aspekte	Lebenszykluskosten	■	■	□	■	■
	Wertstabilität	□	□	□	■	■
Soziokulturelle Aspekte	Sicherheit	■	□	□	■	■
	Barrierefreiheit	□	□	□	■	■
	Regionale und soziale Aspekte	□	■	□	□	■
Energie	CO <sub>2</sub> -Emissionen	■	■	■	■	□
	Energieeffizienz	■	■	■	■	■
	Erneuerbare Energien	■	■	■	■	■
	Energieeffiziente Gebäudehülle	■	■	■	■	■
	Technische Gebäudeausstattung	□	■	■	■	■
	Energiemonitoring	■	■	□	■	■
	Zwischenzähler und – messungen	■	■	□	□	■
	Elektrische Gebäudeausstattung	■	■	■	□	□
Behaglichkeit und Gesundheit	Thermischer Komfort	■	■	■	■	■
	Innenraumluftqualität	■	■	■	■	■
	Akustischer Komfort	■	□	■	■	■
	Visueller Komfort	■	■	■	■	■
	Einflussnahme des Nutzers	■	■	□	■	■





## 2.3 Systematik einer Ökobilanzierung

Die Ökobilanz stellt heutzutage eine der effektivsten Methoden zur ökologischen Bewertung von Gebäuden dar. Nach dieser Bilanzierung (auch **LCA** – Life Cycle Assessment genannt) werden mögliche Umweltwirkungen des gesamten Bauprozesses errechnet und mithilfe dieser Daten eine Empfehlung für die Optimierung des Lebenszyklus von Baustoffen und Bauteilen ausgesprochen. Prinzipiell ist eine Ökobilanz möglichst früh in den Planungsprozess miteinzubeziehen. Dadurch lassen sich schrittweise Entwurfs- und Bauprozesse verbessern und mögliche Unsicherheiten bezüglich der Materialwahl schnell ausräumen. Dagegen können bei einer Bilanzierung nach Baubeginn lediglich der aktuelle Stand festgestellt und nur geringfügige Änderungen vorgenommen werden. [1]

Dabei ist anzumerken, dass der Bilanzierungsprozess eine gewisse Ungenauigkeit aufgrund von Unsicherheiten in der Berechnung und Auswahl der Methoden beinhaltet. Deshalb werden diese Ergebnisse im Optimalfall im Nachhinein überprüft und bei einer Sensitivitätsbetrachtung evaluiert. Trotz dieser Ungenauigkeit sind Ökobilanzen hervorragend für die Beurteilung zielgerichteter Fragestellungen geeignet und können bei vergleichenden Bilanzierungen sogar verschiedene Entwürfe gegeneinander abwägen. Es können sowohl unterschiedliche Material- und Bauteilvarianten getestet als auch Lebenszyklusszenarien für das gesamte Gebäude erstellt werden. [1]

Die grundsätzliche Herangehensweise einer Ökobilanz erfolgt nach **den ISO – Normen 14040 [18] und 14044 [19]**, wobei speziell die Ökobilanz bei Gebäuden noch genauer in der **DIN EN 15978 [20]** definiert ist. Demzufolge sind 4 Phasen für eine normgerechte Bilanzierung notwendig:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Anfertigung einer Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung der verwendeten Materialien
- Auswertung der Ergebnisse

### PHASE 1: FESTLEGUNG DES ZIELS UND DES UNTERSUCHUNGSRAHMENS

In der ersten Phase wird festgelegt, welche Fragestellung die Ökobilanz beantworten soll. Dies ist einer der wichtigsten Teile einer Ökobilanz, da hier die richtigen Fragen gestellt werden müssen und die Strategie der weiteren Bearbeitung definiert wird. [1]

Solche zielführenden Fragen sind z.B. „Für welche Art der Nutzung des Gebäudes sind bestimmte Baustoffe besonders gut geeignet?“ oder „Welcher Teil des Bauprozesses eines bestimmten Projektes verursacht am meisten Umweltwirkungen?“. Danach wird als Teil der Strategieentwicklung die Systemgrenze festgelegt, eine geeignete Allokationsmethode und die funktionelle Einheit des Projekts bestimmt, passende Datenquellen und Qualitätsstandards eruiert, Annahmen für die Ökobilanzmodellierung getroffen und zuletzt geeignete Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren festgelegt. [1]

Die Systemgrenze bestimmt, was genau im Bauprozess betrachtet werden soll und was gegebenenfalls vernachlässigt werden kann. Hierbei wird der Detaillierungsgrad der Studie definiert und festgehalten. Innerhalb dieses Untersuchungsrahmens wird demnach die Ökobilanz durchgeführt. Entscheidend ist dabei die sorgfältige Wahl der begrenzenden Bedingungen und die möglichst genaue Dokumentation.

Eine Auswahl der Allokationsmethode ist dann sinnvoll, wenn aus einem Herstellungsprozess eines Produkts mehrere Kopplungsprodukte hervorgehen. Input- und Outputflüsse müssen analysiert und deren Umweltwirkungen einzelnen Stoffen zugewiesen (alloziert) werden. Dies bedeutet, dass die unterschiedlichen Produkte den Herstellungs-/Entsorgungs- oder Recyclungsprozessen zugewiesen und demnach beurteilt werden. Die entsprechenden Methoden sind in der **ISO – Norm 14044** [19] zu finden. [1]

Die funktionelle Einheit beantwortet die Frage, welche spezifische(n) Funktion(en) das zu untersuchende System zu erfüllen hat (z.B. 1m<sup>2</sup> Decke, einachsig gespannt, Spannweite 6,6 m, wohnungstrennend, Schallschutzerfordernung  $R_w=53$  dB, Brandschutz F90). Alle Baustoffe bzw. Bauteile werden auf ein bestimmtes Maß normiert, sodass sie miteinander verglichen werden können. Sinnvollerweise ist das Maß so zu bestimmen, dass die Baustoffe im Zusammenspiel mit anderen als Bauteil verglichen werden können. Anstatt 1m<sup>3</sup> Beton mit 1m<sup>3</sup> Lehm zu vergleichen, wird z.B. 1m<sup>2</sup> Beton-Außenwandaufbau mit 1m<sup>2</sup> Lehm-Außenwandaufbau verglichen. Qualitative Analysen beeinflussen die Ökobilanz des Gebäudes um einiges mehr als rein quantitative. Bestimmte qualitative Ansprüche, die miteinbezogen werden sollten, sind z.B. die Art der Bauweise, Spannweiten, Brandschutz, Schallschutz, Nutzungsflexibilität, Ausgleichsmaßnahmen und gewisse Abhängigkeiten von Bauteilen. Von dieser festgelegten Einheit hängt das gesamte Bezugssystem ab. [1]

Desweiteren werden zu Beginn verlässliche Datenquellen und Qualitätsstandards bestimmt. Dies beeinflusst einerseits die Detailschärfe der gesamten Bilanz und andererseits die Transparenz der Hintergründe der Untersuchung. Normalerweise werden bei einer Ökobilanzmodellierung Annahmen getroffen, da sich manche Werte nur überschlagsmäßig ermitteln lassen. Deshalb ist es wichtig, diese Annahmen genauestens zu dokumentieren und optimalerweise später einer Sensitivitätsanalyse zu unterziehen, um deren Richtigkeit zu überprüfen. [1]

Bei der Entscheidung, welche Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren zur Berechnung der Umweltwirkungen herangezogen werden, gibt es eine Vielzahl an Parametern für Baustoffe, die in **EPD's** oder technischen Datenblättern der Hersteller verzeichnet sind. Es gilt eine Auswahl zu treffen, die zu der jeweiligen Zielsetzung der Ökobilanz passt. Einige aussagekräftige Parameter sind: [1]

- **Primärenergieinhalt**  $PEI_{ne}$ ,  $PEI_e$  [MJ]

Der Primärenergieinhalt beschreibt den Aufwand an Primärenergieträgern, der zur Herstellung eines Produktes erforderlich ist und auf erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergieträger aufgeteilt ist.

- **Kummulierter Energieaufwand**  $KEA_{ne}$ ,  $KEA_e$  [MJ]

Der kummulierte Energieaufwand beinhaltet jeglichen Einsatz von Primärenergie zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts, wiederum unterteilt in erneuerbare und nicht erneuerbare Energieträger.

- **Graue Energie** [MJ]

Graue Energie bezeichnet den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand bzw. den kumulierten nicht erneuerbaren Energieaufwand zur Herstellung und Entsorgung von Produkten, einschließlich ihrer Transportwege.

- **Treibhauspotenzial GWP** [kg CO<sub>2</sub> – Äq]  
Das Treibhauspotenzial bezieht sich auf den Einfluss anthropogener Emissionen von Treibhausgasen, wie CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> oder FCKW, auf die Erdatmosphäre.
- **Ozonabbaupotenzial ODP** [kg CFC – 11 – Äq]  
Das Ozonabbaupotenzial beschreibt den Grad der Zerstörung der Ozonschicht in der Stratosphäre durch einen bestimmten Stofftyp.
- **Photochemisches Ozonbildungspotenzial POCP** [kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – Äq]  
Das photochemische Ozonbildungspotenzial bezieht sich auf die Photooxidantien bildende Wirkung von 1kg Ethan.
- **Versauerungspotenzial AP** [kg SO<sub>2</sub> – Äq]  
Das Versauerungspotenzial beschreibt die schädliche Wirkung von Stoffen auf ein Ökosystem unter dem Aspekt der Versauerung von Böden und Gewässern.
- **Eutrophierungspotenzial EP** [kg PO<sub>4</sub><sup>3</sup> – Äq]  
Das Eutrophierungspotenzial thematisiert die Überdüngung von Böden und Gewässern mittels Schadstoffen in der Luft, im Abwasser, in Düngemitteln sowie in Phosphaten.

## PHASE 2: ANFERTIGUNG EINER SACHBILANZ

In der zweiten Phase einer Ökobilanzierung werden die Lebenszyklen der verwendeten Produkte modelliert. Als Grundlage dienen die Rahmenbedingungen aus Phase 1. Entweder werden die Informationen selbst in ein Tabellenkalkulationsprogramm oder in eine professionelle Ökobilanzsoftware eingetragen. Dabei werden sämtliche Input- und Output-Flüsse detailliert aufgelistet und zusammengerechnet. Zu unterscheiden sind hierbei Softwarelösungen für die Forschung und praxisorientierte Lösungen für reale Gebäude. Programme für die Forschung (z.B. SimaPro [46], GaBi [47], OpenLCA [48]) sind mit mehr Spielraum für die Modellierung verschiedener Szenarien konzipiert. Dagegen ist bei praxisorientierter Software (z.B. LEGEP [49], SBS-Tool [50]) die Modellierung auf das zu untersuchende Gebäude und sein nahes Umfeld eingeschränkt. Als Ergebnis dieser Sachbilanz entsteht ein umfassender Überblick über den Lebenszyklus der zu untersuchenden Produkte, der die Ursachen und Auswirkungen der Umweltbelastungen beschreibt und quantifiziert. [1]

## PHASE 3: WIRKUNGSABSCHÄTZUNG DER VERWENDETEN MATERIALIEN

Die dritte Phase einer Ökobilanz besteht aus zwei Schritten: Zunächst werden die Ergebnisse der Sachbilanz klassifiziert. Das bedeutet, dass die Werte der Sachbilanzanalyse bestimmten Wirkungskategorien zugeordnet werden, die die Umweltwirkungen repräsentieren (z.B. Klimawandel, Ozonabbau, menschliche Gesundheit, Ressourcenverbrauch etc.). Danach wird eine Charakterisierung dieser Daten vorgenommen. Mithilfe von Charakterisierungsfaktoren, die die Wirkung eines Stoffes in Bezug zu einer Referenzeinheit setzen (z.B. CH<sub>4</sub> im Bezug auf CO<sub>2</sub> hinsichtlich der Berechnung für Treibhausgase), werden die Wirkungsindikatoren berechnet. Die Summe aller Sachbilanzergebnisse der einzelnen Stoffe, die mit ihrem Charakterisierungsfaktor multipliziert werden, bilden das Ergebnis dieser Wirkungsabschätzung (siehe Abbildung 4).

Eine Ökobilanz-Software vereinfacht diesen aufwendigen Prozess, die Daten müssen nur sorgsam eingetragen werden. Bei dieser Phase darf dennoch nicht die Sicht auf das ganze System verloren gehen. Die Auswirkungen auf die Umwelt sollten stets ganzheitlich (lokal, regional, etc.) betrachtet werden. [1]

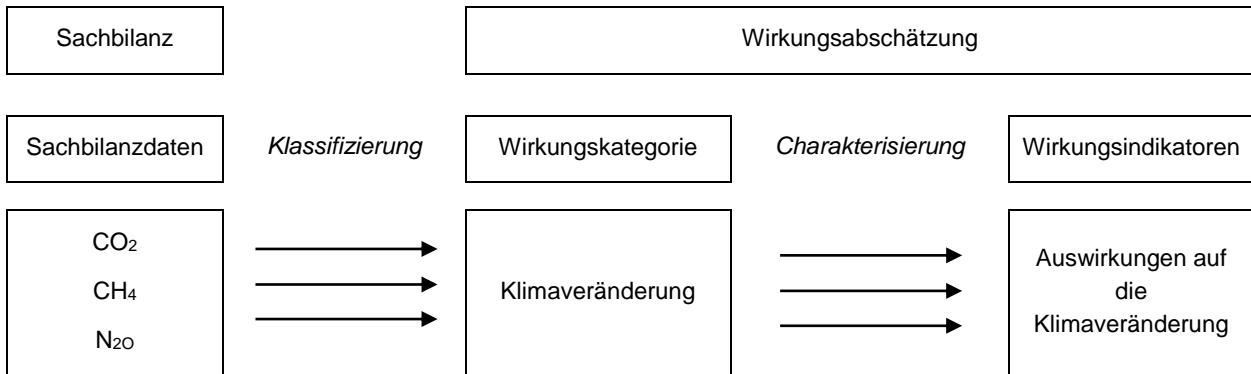


Abbildung 4: Beispielhafte Erklärung von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung anhand der Klimaveränderung, nach [1]

#### PHASE 4: AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE

In der letzten Phase werden die Ergebnisse aus Phase 2 und 3 ausgewertet und die ursprüngliche Fragestellung beantwortet. Das bedeutet aber keineswegs, dass die Ökobilanz damit beendet ist. Eine Ökobilanz ist ein iterativer Prozess, bei dem selbst während der Bilanzierung Änderungen vorgenommen werden können. Denn im Optimalfall wird in dieser Phase der Bilanzierung eine Sensitivitätsanalyse der in Phase 1 festgelegten Rahmenbedingungen vorgenommen. Diese Analyse hilft dabei, einerseits die Studie zu relativieren und andererseits das Ergebnis zu bekräftigen. Zur Beantwortung einer speziellen Fragestellung ist eine Ökobilanz bestens geeignet, was aber im Umkehrschluss bedeutet, dass die Bilanzierung nur innerhalb der selbst gesetzten Systemgrenzen und Rahmenbedingungen ihre Gültigkeit behält. Bei dem Vergleich von mehreren Bauteilen z.B. für einen Wandaufbau oder bei dem Vergleich von mehreren Entwürfen, muss die Fragestellung und die damit verbundenen Grenzen der Studie unterschiedlich formuliert und auf jedes Projekt abgestimmt werden.

### 3 Vom Baustoff zum Bauteil

Ausgehend von der Diskussion, welche Baustoffe und Bauteile die umweltverträglicheren und kostengünstigeren seien, konzentriert sich diese Arbeit auf den ökologischen und bautechnischen Vergleich von Bauprodukten. Es soll geklärt werden, welche Vor- und Nachteile bestimmte Baustoffgruppen besitzen, indem ihre ökologischen und mechanischen Eigenschaften abgeglichen werden. Um den Rahmen dieser Diplomarbeit nicht zu sprengen, wird der Schwerpunkt auf tragende Bauteile gelegt. Die ökologischen Eigenschaften von Baustoffen stammen zum Großteil aus der deutschen Datenbank der **Ökobaudat** [51]; die mechanischen Werte der Bauteile werden als Teil dieser Arbeit berechnet. Für die Ökobilanzierung der Bauteile wird eine Lebensdauer von 100 Jahren angenommen, um den Forderungen der Europäischen Bauprodukteverordnung gerecht zu werden.

Nachdem im ersten Teil dieser Arbeit die Bedeutung des Nachhaltigen Bauens erläutert wurde und diverse Bewertungssysteme miteinander verglichen wurden, werden nun die spezifischen Eigenschaften von Bauprodukten veranschaulicht. Beginnend mit einzelnen Baustoffen und Baustoffgruppen wird eine systematische Analyse der Umweltwirkungen erstellt, gängige Bauteilaufbauten miteinander verglichen und abschließend in einem Katalog (siehe Anhang) zusammengefasst.

#### 3.1 Stand der Technik

Als zentraler Bestandteil der europäischen Energiestrategie wird die Steigerung der Energieeffizienz angesehen. Die Bedeutung der Effizienzverbesserung durch technologischen Fortschritt und durch Energieeffizienzprogramme wird immer höher bewertet und jedes Land versucht, die Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls zu erfüllen. Zum einen fordert der Europäische Rat eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 20 % bis zum Jahr 2020 im Vergleich zu den Werten von 1990 und einen 20%-Anteil an erneuerbaren Energien am EU-weiten Endenergieverbrauch. Zum anderen wird eine Steigerung der Energieeffizienz gefordert, um den ursprünglich prognostizierten Wert für 2020 um 20% unterschreiten zu können. [52]

Gerade im Gebäudesektor liegt die Aufmerksamkeit vor allem im Bereich des Wohnbaus. Insgesamt besitzen Wohngebäude einen hohen Anteil am Energieverbrauch in diesem Sektor. Doch dank der immer strengeren Vorschriften für Neubauten in den letzten beiden Jahrzehnten und der verschärften Bedingungen für Förderungen am Wohnbausektor, blieb von 1990 bis 2003 der durch die Beheizung der Gebäude verursachten Emissionen relativ konstant. [52]

Der heutzutage geforderte Energiestandard von Gebäuden ist laut Bauvorschrift der Stand eines Niedrigenergiehauses; durch die Einführung der EU-Gebäuderichtlinie (EPBD) schuf die europäische Kommission die Basis für eine einheitliche Bewertung. Die novellierte Version dieser Richtlinie seit Anfang 2012 fordert eine nahezu komplette Energieautarkie für alle Neubauten ab 2020. Ein nahezu Null-Energie-Gebäude (nNZEB, nearly Net Zero-Energy Building) ist ein Gebäude mit äußerst geringem Energiebedarf, der soweit wie möglich aus erneuerbaren Ressourcen gedeckt werden soll, vorzugsweise aus lokalen Quellen. Laut EU-Kommission ist damit der Passivhausstandard gemeint, was jedoch nicht genauer definiert wird. Öffentliche Gebäude müssen ab dem 31. Dezember 2018 den neuen Anforderungen entsprechen, wohingegen erst ab dem 31. Dezember 2020 alle Neubauten diese

Richtlinie einhalten müssen. Gemäß der ebenfalls neuen Bauproduktverordnung seit dem 1. Juli 2013 müssen Gebäude weitere Grundanforderungen wie statische, brandschutz- und schallschutz-technische sowie gesundheits- und umweltrelevante Anforderungen erfüllen. [52]

Aus diesen Richtlinien geht hervor, dass ein Gebäude Dauerhaftigkeit besitzen muss. Verwendete Baustoffe und Bauteile müssen recyclingfähig sein und der Einsatz von umweltfreundlichen Rohstoffen und Sekundärbaustoffen ist erwünscht. Im Folgenden wird veranschaulicht, welche Indikatoren speziell bei Baustoffen und Bauteilen auf eine Umweltverträglichkeit hinweisen. [52]

## 3.2 Ökologische Eigenschaften von Baustoffen

### 3.2.1 Materialverhalten

In diesem Kapitel soll das Materialverhalten von Mauersteinen, Beton, Holz und Dämmstoffen besprochen werden. Außerdem werden die Vor- und Nachteile in Tabellen gegenübergestellt.

#### **MAUERSTEINE**

Prinzipiell sind Mauersteinarten in natürliche und künstlich hergestellte Mauersteine aufgeteilt. Natursteine sind in der Natur vorkommende Gesteinsarten, die keinerlei Struktur- oder Verwitterungsschäden aufweisen und zudem über eine ausreichende Mindestdruckfestigkeit verfügen. Vorwiegend kommen sie bei Instandsetzungen von Natursteinmauerwerk zum Einsatz. [53]

Dagegen werden künstlich hergestellte Mauersteine mittels eines Ausgangsmaterials hergestellt, das auch die spätere Unterteilung bestimmt:

- Mauerziegel
- Kalksandsteine
- Porenbetonsteine

#### **MAUERZIEGEL**

Ziegel bestehen aus Ton, Lehm bzw. tonischen Massen und gegebenenfalls weiteren Zuschlagsstoffen und zählen zu den ältesten und wohl bekanntesten Mauersteinsorten. Zuschlagsstoffe wie Sägemehl oder Polystyrolkügelchen werden vor dem Brennvorgang beigemischt, verbrennen rückstandslos und lassen kleine Poren zurück, wodurch die Rohdichte und damit das Gewicht des Ziegels herabgesetzt wird. [53]

Heutzutage existieren zahlreiche Arten an unterschiedlichen Ziegelprodukten. Aus dem ursprünglichen Vollziegel entwickelten sich Loch- und Hohlziegel, die durch den Anteil an Löchern zu einer Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit sowie verbesserter Wärmedämmung führen. Außerdem bieten immer mehr Hersteller sogenannte Wärmedämmziegel an, deren Hohlräume mit Dämmstoff gefüllt sind, wodurch eine zusätzliche Dämmschicht unter Umständen überflüssig wird und sogar Passivhausstandard erreicht werden kann. [53] In Tabelle 4 sind jeweils die Vor- und Nachteile von Mauerziegeln zu sehen.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwendung natürlicher Rohstoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Primärenergiebedarf</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weite Verfügbarkeit, kurze Transportwege</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bedingte Recyclefähigkeit durch Mörtel- und Putzreste</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Formbarkeit vor dem Brennen</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Druck- und Abriebfestigkeit</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gutes Raumklima</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Wärme- und Schalldämmung</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feuchteregulierende Eigenschaften</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guter Brandschutz</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lange Lebensdauer</li> </ul>	

Tabelle 4: Vor- und Nachteile von Mauerziegeln, nach [53]

**KALKSANDSTEINE**

Kalksandstein besteht hauptsächlich aus quarzreichem Sand, Weißkalk und Wasser. Das Gemisch wird in unterschiedlichen Formaten gepresst und in Autoklaven unter Dampfdruck von ca. 16 bar (200°C) gehärtet. Innerhalb von 4 bis 8h verfestigt sich das Gemisch unter Bildung von Calciumsilikathydrat. Meistens sind Kalksteine weiß, nur sehr selten farbig. Hergestellt werden sie mit der Festigkeitsklasse 6, 12, 20 und 28 N/mm². [54] In Tabelle 5 sind jeweils die Vor- und Nachteile von Kalksandsteinen aufgezeigt.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Natürliche Rohstoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schlechter Wärmeschutz</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Tragfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Massiver, schwerer Stein</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guter Schall- und Brandschutz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwer zu bearbeiten</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frost- und witterungsbeständig</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Platzsparende Bauweisen möglich</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angenehmes Raumklima</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lange Lebensdauer</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gut recyclingfähig; Herstellung von KS-Recyclingsteinen</li> </ul>	

Tabelle 5: Vor- und Nachteile von Kalksandsteinen, nach [53]

## PORENBETONSTEINE

Bei Porenbeton bedarf es mehr Stoffe zur Herstellung als bei anderen künstlich hergestellten Mauersteinen. Porenbeton besteht aus Sand, Kalk, Zement, Wasser und Aluminiumpulver. Mithilfe des Aluminiumpulvers bläht sich die Masse stark auf und zahlreiche kleine Poren entstehen. [53] In Tabelle 6 werden jeweils die Vor- und Nachteile von Porenbetonsteinen dargestellt.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>Natürliche Rohstoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nicht frost- und witterungsbeständig</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Niedrige Transport- und Montagekosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringer Schallschutz</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Energiearmer Herstellungsprozess</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feuchtigkeitsaufnahme</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gute Wärmedämmung</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Guter Brandschutz</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Leichte Verarbeitbarkeit</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lange Lebensdauer</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gut recyclingfähig bei geringem Mörtelanteil; Rückführung zum Porenbetonwerk möglich</li> </ul>	

Tabelle 6: Vor- und Nachteile von Porenbetonsteinen, nach [53]

## BETON

Beton besteht grundsätzlich aus Zement, Sand bzw. Kies und Wasser, wobei weitere Zuschlagsstoffe zur Verbesserung der Materialeigenschaften nicht unüblich sind. Im Wesentlichen hängt der Energieaufwand zur Herstellung von Beton von dessen Zusammensetzung ab, Zement gilt als energetisch höchster Bestandteil dieses Gemischs. [55] Weiterhin gilt bei Betonprodukten nicht nur eine Klassifizierung nach Bestandteilen und Eigenschaften, sondern auch nach unbewehrtem und bewehrtem Beton. Der Armierungsgrad hat direkten Einfluss auf die Tragfähigkeit und bedeutenden Anteil an der Herstellungsenergie. [53] In Tabelle 7 sind jeweils die Vor- und Nachteile von Beton zu veranschaulicht.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Druckfestigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schlechte Wärmedämmung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Guter Schallschutz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alterungsprozess</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Guter Brandschutz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Verbundbaustoff“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Guter Feuchteschutz</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Speichermasse</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Beliebig formbar</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Recyclingmaterial im Straßenbau</li> </ul>	

Tabelle 7: Vor- und Nachteile von Beton, nach [53]



## HOLZBAUSTOFFE

Holz zählt ebenso wie Ziegel zu den ältesten Baustoffen der Zivilisation und kann mit recht einfachen Mitteln behandelt werden. Gerade heutzutage ist Holz von großer Bedeutung, da es ein nachwachsender und CO<sub>2</sub>-bindender Rohstoff ist. Der stetige Zuwachs an neuen Gebäuden aus Holz verdeutlicht, dass Bauen mit Holz auch den gegenwärtigen Anforderungen an Wohn- und Arbeitsbauten entspricht. [53] In Tabelle 8 sind jeweils die Vor- und Nachteile von Holzbaustoffen zu sehen.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nachwachsender Rohstoff</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhter Aufwand Brandschutz</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>CO<sub>2</sub>-bindend</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhter Aufwand Schädlingsbekämpfung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gute Wärmedämmung und -speicherung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„arbeitet“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringes Eigengewicht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhter Aufwand Schallschutz</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Behaglichkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Behandlung im Außenbereich nötig (UV-Strahlung, Feuchtigkeit)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Zug- und Druckfestigkeit</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Kurze Bauzeiten</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lange Lebensdauer</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gute Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit</li> </ul>	

Tabelle 8: Vor- und Nachteile von Holzbaustoffen, nach [53]

## DÄMMSTOFFE

Dämmstoffe sind Materialien, die bei fachgerechter Verarbeitung den Schall-, Wärme- oder Brandschutz verbessern, optimalerweise eine Kombination aus diesen Aspekten und dabei selbst keine relevante tragende Funktion übernehmen. Unterschieden werden Dämmmaterialien mit organischer und anorganischer Herkunft, die jeweils wiederum in natürliche und synthetische Materialien eingeordnet werden können. Hauptanwendung finden Dämmstoffe in und an Decken, Fußböden, Wänden und Dächern. [53]

Zwar beschäftigt sich die Menschheit aufgrund klimatischer Verhältnisse schon seit Jahrtausenden mit der Thematik des Wärmeschutzes, doch gesetzliche Vorschriften und ein gestiegenes Bewusstsein für energetische Themen haben gerade heutzutage in der Politik und der Gesellschaft hohen Stellenwert erhalten. Trotzdem ist nach derzeitigem Forschungsstand zu beachten, dass es keinen allgemein idealen Dämmstoff für jeden Einsatzbereich gibt. Je nach Anforderungen wie z.B. Gesundheitsverträglichkeit, Preis, Ressourcenschonung, Benutzung nachwachsender Rohstoffe, Ortswahl u.v.m. sollte die jeweilige bauphysikalische Eignung eines Dämmstoffes berücksichtigt werden. [53]

Als wichtigste bauphysikalische Kennwerte gelten hier die Bauklasse, Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, die spezifische Wärmekapazität, Ausgleichsfeuchte,

dynamische Steifigkeit sowie der längenbezogene Strömungswiderstand. Gerade die letzten beiden Aspekte geben zudem Aufschluss über die Schallschutzeigenschaften. Neben diesen bauphysikalischen Werten sind natürlich ökologische und gesundheitliche Eigenschaften bei der Auswahl von Dämmstoffen zu beachten. [53]

### 3.2.2 Mechanische Kenndaten

Nach dem Vergleich des Materialverhaltens werden nun die mechanischen Kenndaten miteinander verglichen. In Tabelle 9, Tabelle 10 und Tabelle 11 [51] [56] [57] wird ein kurzer Überblick zu verschiedenen Baustoffen und zu den mechanisch relevanten Kennwerten gegeben. Außerdem werden in Tabelle 12 mithilfe einer Gegenüberstellung verschiedene Kriterien von Baumaterialien miteinander verglichen:

- **Rohdichte  $\rho$**

Die Rohdichte bezeichnet die Masse bezogen auf das Volumen ( $\rho=m/V$ ) und wird in der Einheit [kg/m<sup>3</sup>] angegeben. Eine höhere Rohdichte wirkt sich in der Regel negativ auf den Wärmeschutz, aber positiv auf den Schallschutz aus. Bei sehr geringen Rohdichten (< 50 kg/m<sup>3</sup>) kann es jedoch ebenso zu größerer Wärmeleitfähigkeit durch erhöhten Wärmetransport mittels Konvektion und Strahlung im Porenraum kommen. Vor allem bei massiven Baustoffen gibt die Rohdichte eine brauchbare Orientierung für die Wärmespeicherfähigkeit. [53]

- **Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$**

Die Wärmeleitfähigkeit bezeichnet eine Stoffeigenschaft und wird in der Einheit [W/(mK)] angegeben. Gemessen wird hierbei der Wärmestrom, der bei einem Temperaturunterschied von 1 Kelvin [K] durch eine 1m<sup>3</sup> Schicht eines Stoffes geht. Je geringer die Wärmeleitfähigkeit ist, desto besser ist das Dämmvermögen. Grundsätzlich bezieht sich der  $\lambda$ -Wert als Laborwert auf trockene Bauteile. Nachdem Wasser ein guter Wärmeleiter ist, besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Feuchtegehalt eines Stoffes und dessen Wärmeleitfähigkeit. Die gemessenen Werte dienen als Grundlage zur Einteilung der Dämmstoffe in Wärmeleitfähigkeitsgruppen (WLG) und Wärmeleitfähigkeitsstufen (WLS). [53]

- **Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$**

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl drückt aus, um wieviel länger es dauert, bis eine bestimmte Menge Wasser aus dem betreffenden Baustoff diffundiert im Gegensatz zum Ausdiffundieren aus der Luft. [53]

**MINERALISCHE BAUSTOFFE**

<b>Baustoff</b>		<b>Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]</b>	<b>Diffusionswiderstandszahl</b>
<b>Ziegel</b>	Mauerziegel Durchschnitt, Poroton	740	0,14	5/10
	Perlitegefüllte Ziegel S, Poroton	800	0,09 – 0,11	5/10
<b>Porenbeton</b>	Porenbeton P2 04 unbewehrt	380	0,11	5/10
	Porenbeton P4 05 unbewehrt	472	0,15	5/10
<b>Kalksandstein</b>	Kalksandstein Mix	2.000	1,1	15/25
<b>Lehm</b>	Lehmstein	1.200	0,47	5/10
	Stampflehmwand	2.000	1,1	5/10
<b>Beton</b>	Transportbeton C20/25	2.365	2,00	80/130
	Beton-Mauersteine	2.000	1,35	70/150
	Bims Leichtbeton Planstein Außenwand	500	0,15	5/15
	Blähton Leichtbeton Planstein Außenwand	500	0,16	5/15
	Betonfertigteile Decke	2.520	2,5	80/130
	Betonfertigteile Wand	2.427	2,5	80/130
<b>Glas</b>	Glasbausteine	1.800	0,58	∞
	Isolierglas 2-Scheiben	2.500	0,8 – 1,1	∞
<b>Gips</b>	Gipskartonplatte	800	0,25	4/10
	Gipsfaserplatte	1.000	0,37	5/10

Tabelle 9: Vergleich der mechanischen Kenndaten von mineralischen Baustoffen, nach [53]

## HOLZ UND HOLZWERKSTOFFE

Baustoff	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Diffusionswiderstandszahl
Konstruktionsvollholz 15 % Feuchte	529	0,13	50
Schnittholz Fichte (12 % Feuchte / 10,7 % H <sub>2</sub> O)	482	0,12	50
Brettschichtholz Nadelholz	515	0,13	50
Sperrholzplatte	490	0,14	70/200
Spanplatte	650	0,15	15/50
OSB (Durchschnitt) 5 % Feuchte	650	0,13	50

Tabelle 10: Vergleich der mechanischen Kenndaten von Holzwerkstoffen, nach [53]

## DÄMMUNG

Baustoff	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Diffusionswiderstandszahl	
<b>anorganisch/ mineralisch</b>	Blähton Körnung	360	0,16	3
	Perlite 0 – 3	90	0,06	3
	Blähglas Körnung	150	0,035 – 0,7	5
	Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)	46	0,03 – 0,05	1
	Glaswolle	20 – 153	0,035 – 0,045	1/2
	Foamglas W+F	100	0,04 – 0,06	∞
	Steinwolle	22 – 200	0,035 – 0,045	1/2
<b>organisch/ synthetisch</b>	XPS-Dämmstoff	32	0,025 – 0,054	80/250
	PU-Dämmplatte, Blockschaum	40	0,02 – 0,04	30/100
	EPS W/D 035 – IVH	35	0,029 – 0,050	20/100
	EPS PS 25	25	0,029 – 0,050	20/100
<b>organisch/ nachwachsend</b>	Holzfaserdämmplatte Mix (Trockenverfahren)	60	0,04 – 0,055	3/5
	Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	200	0,04 – 0,055	3/5
	Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff	45	0,04 – 0,045	2/2
	Zellulosefaserplatten	80	0,04	2/2
	Expandierter Kork	100	0,04 – 0,055	5/10

Tabelle 11: Vergleich der mechanischen Kenndaten von Dämmungen, nach [53]

**GEGENÜBERSTELLUNG**

	Ziegel	Porenbeton	Kalksandstein	Beton	Holz und Holzbaustoffe	Lehm	Glas	Metalle
Natürliche Rohstoffe	Green	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Green
Primärenergieinhalt	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Green	Orange	Orange
Transportweg	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange	Orange
CO <sub>2</sub> -Ausstoß	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Green	Orange	Orange
Recyclingfähigkeit	Orange	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Green
Druckfestigkeit/ Tragfähigkeit	Green	Green	Green	Green	Green	Orange	Orange	Green
Verarbeitung	Green	Green	Orange	Orange	Green	Green	Orange	Orange
Raumklima	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange	Orange
Wärmedämmung	Green	Green	Orange	Orange	Green	Green	Orange	Orange
Schallschutz	Green	Orange	Green	Green	Orange	Green	Orange	Orange
Brandschutz	Green	Green	Green	Green	Orange	Green	Green	Orange
Feuchteschutz	Green	Orange	Green	Green	Orange	Green	Orange	Orange
Green	Kriterium positiv erfüllt							
Orange	Kriterium negativ erfüllt							

Tabelle 12: Gegenüberstellung verschiedener Kriterien von Baumaterialien, nach [53]

**3.2.3 Rückbaubarkeit und Recycling**

Recycling bedeutet die für den Bau und Betrieb eines Gebäudes eingesetzten Materialien nach ihrer ursprünglichen Nutzung für eine neue Verwendung einzusetzen. [9] Aus Abfallprodukten bzw. Ausgangsmaterialien werden Sekundärrohstoffe. Je einfacher sich ein Objekt wieder in seine Bestandteile zerlegen lässt, desto bessere Rückbaubarkeit weist das Objekt auf. [53]

Bereits bei der Planung von Baumaßnahmen ist darauf zu achten, welche Materialien recyclefähig sind bzw. dass vorzugsweise recyclefähige Bestandteile und bereits recycelte Komponenten verwendet werden. Außerdem ist zu berücksichtigen, welchen Grad an Rückbaubarkeit bestimmte Produkte besitzen. Folgende Faktoren sind hinsichtlich der Recyclingfähigkeit zu beachten: [53]

- **Homogenität**

Verwendete Baustoffe sollten möglichst homogen sein. Je weniger unterschiedlich die Materialien sind, desto weniger differenzierte Entsorgungswege müssen berücksichtigt werden. [9]

- **Trennbarkeit**

Ökologisch wertvoll sind Materialverbindungen, die stofflich leicht trennbar sind. Eine leichte Trennbarkeit der Materialien erhöht die Wahrscheinlichkeit einer sortenreinen Trennung und einer Rückführung in den Stoffkreislauf. [9]

- **Schadstofffreiheit**

Der Einsatz von schädlichen Baustoffen für die Umwelt und den Menschen wird im nachhaltigen Bauen stark reduziert. Außerdem optimiert eine sorgfältige Verwendung von schadstofffreien recyclebaren Baustoffen die Wirtschaftlichkeit des Materialkreislaufs und verlängert das Materialleben. [9] Weiterführende Informationen bietet das Kapitel "Rückführung in den Materialkreislauf".

### 3.2.4 Verwendete Methoden

Der Lebenszyklus der Gebäudevarianten wird entsprechend der Norm **DIN EN 15978** „Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode“ analysiert. Die folgende Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Phasen des Lebenszyklus laut **DIN EN 15978**:

Angaben zum Lebenszyklus des Gebäudes														Ergänzende Informationen außerhalb des Lebenszyklus		
A 1-3 Herstellungsphase			A 4-5 Errichtungsphase		B 1-7 Nutzungsphase							C 1-4 Ende des Lebenszyklus		D Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen		
A1 Rohstoffbeschaffung	A2 Transport	A3 Produktion	A4 Transport	A5 Errichtung/Einbau	B1 Nutzung	B2 Instandhaltung	B3 Instandsetzung	B4 Austausch	B5 Modernisierung	B6 Energieverbrauch im Betrieb	B7 Wasserverbrauch	C1 Rückbau/Abriss	C2 Transport	C3 Abfallverwertung	C4 Entsorgung	Potenzial für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling

Abbildung 5: Lebenszyklusphasen von Gebäuden, nach [52]

Bei der späteren Beurteilung der Bauteilberechnungen sowie bei der Beurteilung der Ergebnisse des Baustoffvergleichs ist zudem auf eine gewisse Ungenauigkeit der Datenlage hinzuweisen. Es sind Daten für die Module A1-A3 für die Hersteller verpflichtend auszuführen, für alle anderen Module des Lebenszyklus sowie des Moduls D außerhalb der Systemgrenze liegen aber nur teilweise Daten vor. Die restlichen Werte werden mit generischen Daten der Datenbank **Ökobaut** ergänzt und müssten bei einer vollständigen Berechnung eines Bauwerkes mithilfe einer Sensibilitätsanalyse relativiert werden.

Weiterhin sind selbst die vorhandenen Daten zum Teil kritisch zu hinterfragen, da Hersteller von ihrem Standpunkt aus gewisse Szenarien entwickeln und die Daten dementsprechend weitergeben. Bei der Szenarientwicklung, z.B. für die Entsorgung oder das Recycling eines bestimmten Baustoffes, entscheidet somit der Hersteller den Ablauf und Art des Szenarios und versucht, möglichst ideale Werte zu erhalten. Aufgrund dieser Ungenauigkeit bei der Szenarientwicklung der Baustoffe sind v.a. bei der letzten Phase des Lebenszyklus (C1-C4) und des Moduls D die Daten kritisch anzusehen.

Um außerdem der Vielzahl an Tabellen einen strukturierten Überblick zu verschaffen sind in den verschiedenen Kategorien jeweils die höchsten Werte in **rot** und die niedrigsten Werte in **grün** markiert.

### 3.2.5 Indikatoren der ökologischen Bilanzierung

Weiterhin ist im Voraus festzulegen, welche Parameter bei der Ökobilanz berücksichtigt werden. Für die ökologische Bilanzierung der Baustoffe in Kapitel 3.3 werden in Anlehnung an das **DGNB** folgende LCA-Indikatoren berechnet:

- Primärenergieinhalt  $PEI_{ne}$ ,  $PEI_e$  [MJ]
- Treibhauspotenzial GWP [ $kg\ CO_2 - \ddot{A}q$ ]
- Ozonabbaupotenzial ODP [ $kg\ CFC - 11 - \ddot{A}q$ ]
- Photochemisches Ozonbildungspotenzial POCP [ $kg\ C_2H_4 - \ddot{A}q$ ]
- Versauerungspotenzial AP [ $kg\ SO_2 - \ddot{A}q$ ]
- Eutrophierungspotenzial EP [ $kg\ PO_4^3 - \ddot{A}q$ ]

### 3.3 Systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten und Bewertung der Tragelemente

#### 3.3.1 Ergebnisse des Baustoffvergleichs

Bei der Recherche der Daten mittels der Datenbank **Ökobaodat** wird ersichtlich, dass sich ein Großteil der Datensätze nur auf die Lebenszyklusphasen A1- A3 (Herstellungsphase) beziehen. Dies ist insofern bedauerlich, da man zwar für die Bauteilberechnung noch zusätzlich normierte Standardwerte für die anderen Phasen der Produktlebenszyklen benutzen kann, bei einer Baustoffermittlung das jedoch relativ wenig Sinn ergäbe. Somit sind die folgenden Indikatoren oftmals auf die erste Lebenszyklusphase bezogen, andernfalls ist dies ebenfalls gekennzeichnet. Erhoben wurden diese Daten zwischen dem 1. Januar 2018 und dem 31. März 2018 und es wurde darauf geachtet, dass alle Datensätze mindestens noch 1 bis 2 Jahre Gültigkeit besitzen. Beispielhaft werden 5 Baustoffgruppen (Beton, Stahl, Ziegel, Holz, Glas) gewählt, an denen der Unterschied der Umweltwirkungen pro kg und pro m<sup>3</sup> innerhalb einer Baustoffgruppe aufgezeigt wird. Ein ausführlicher Baustoffkatalog findet sich im Anhang.

#### BETON

Bei der Baustoffgruppe Beton ist ersichtlich, dass sich mit steigender Druckfestigkeitsklasse auch die gesamten Umweltwirkungen des Baustoffes erhöhen. Die Druckfestigkeit wird durch den Zementzusatz des Betons bestimmt; erhöhter Zementzusatz führt zu höherer Druckfestigkeit. Daraus lässt sich schließen, dass der vermehrte Einsatz von Zement im Betonprodukt auch eine direkte Steigerung der Umweltwirkungen des Betons nach sich zieht. In Tabelle 13 und Tabelle 14 und in Abbildung 6 wird gezeigt, dass Beton C25/30 (ca. 12,4 M.-%) die geringsten Umweltwirkungen in allen Kategorien aufweist, wohingegen Beton C50/60 (ca. 16,4-17,3 M.-%) die höchsten Umweltwirkungen verursacht. Tabelle 13 sowie Abbildung 6 verdeutlichen den Unterschied auf m<sup>3</sup> gerechnet, während Tabelle 14 die Werte auf kg bezogen zeigt.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Beton C 25/30	77	909	211	6,94E-07	0,04	0,30	0,05
Beton C 35/45	92	1116	265	7,98E-07	0,04	0,36	0,06
Beton C 50/60	113	1418	335	9,56E-07	0,05	0,45	0,07

Tabelle 13: Umweltwirkungen von Beton in m<sup>3</sup>

Zum Vergleich, die Werte für Beton auf 1kg bezogen:

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Beton C 25/30	0,03	0,38	0,09	2,89E-10	1,50E-05	1,24E-04	1,97E-05
Beton C 35/45	0,04	0,47	0,11	3,33E-10	1,84E-05	1,52E-04	2,38E-05
Beton C 50/60	0,05	0,59	0,14	3,98E-10	2,25E-05	1,88E-04	2,88E-05

Tabelle 14: Umweltwirkungen von Beton in kg



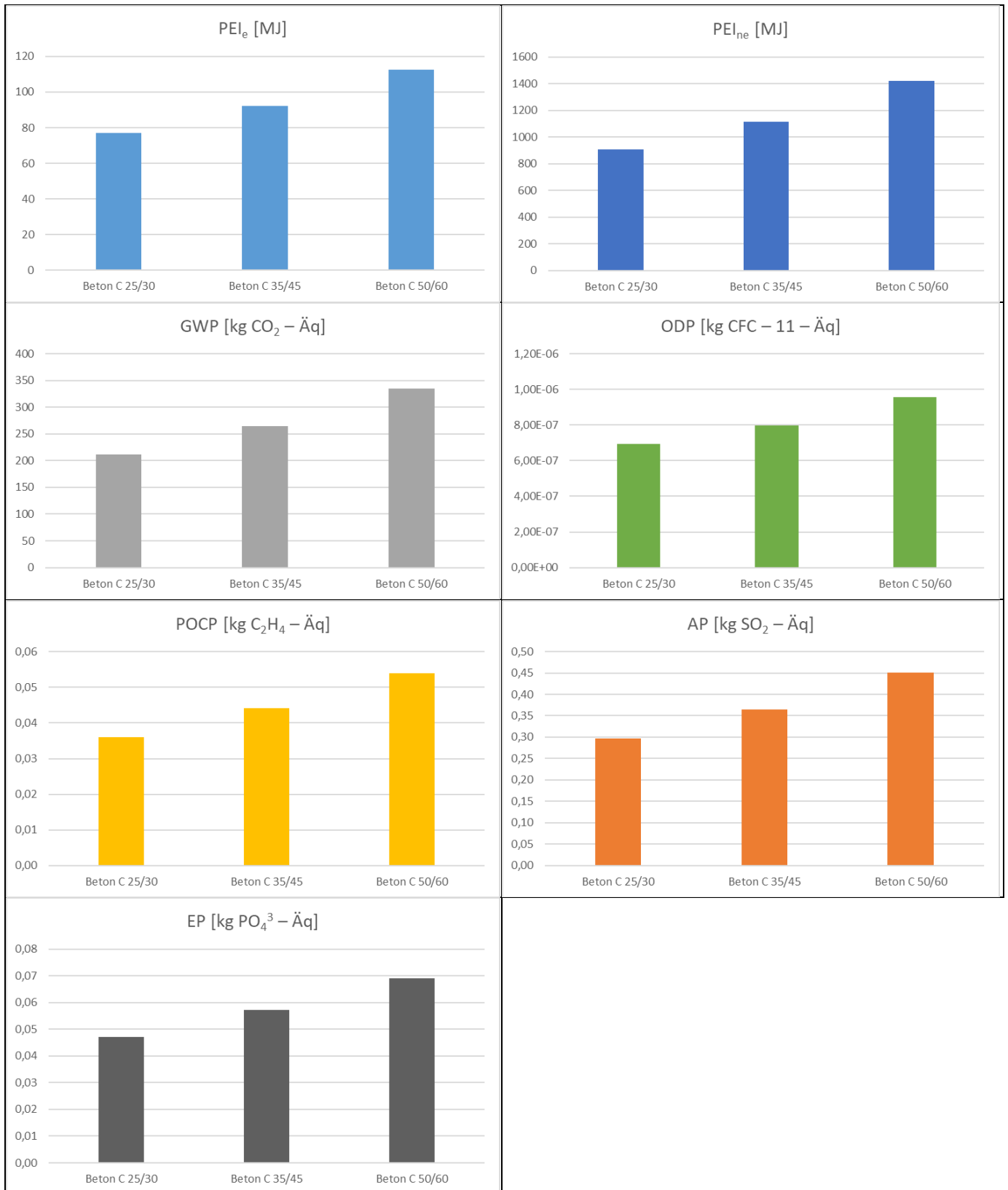


Abbildung 6: Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Beton in m<sup>3</sup>

## STAHL

Bei der Baustoffgruppe der Metalle, genauer gesagt des Stahls, wird deutlich, um wieviel größer die Umweltwirkungen in der gesamten Baustoffklasse sind als bei anderen Baustoffklassen. Der Anteil an Legierungselementen und der Anteil des Kohlenstoffgehalts entscheidet über die Einstufung des Stahls. Bau- und Bewehrungsstähle haben einen Kohlenstoffgehalt C von 0% - 0,6% und zählen damit beide zu den unlegierten bzw. niedriglegierten Stählen. Dennoch unterscheiden sich die Datensätze aufgrund der späteren Verwendung der bilanzierten Baustoffe. Bewehrungsstahl wurde als Stahldraht mit dem Einsatz in Beton als Armierung bilanziert, während die Baustähle als Grobbleche oder Walzprofile verwendet werden. Aus dem unterschiedlichen Verwendungszweck ergeben sich u.a. veränderte Zusammensetzungen und Legierungen der Baustoffe, die zu den unterschiedlichen Bilanzergebnissen führen. Müssen beispielsweise Baustähle zusätzlich mit einer Feuerverzinkung versehen werden, erhöhen sich die Umweltwirkungen des Produkts. Wie in Abbildung 7  $PEI_e$  zu sehen ist, verursacht Bewehrungsstahl mit einer Dichte von  $7874 \text{ kg/m}^3$  bei der Herstellung einen Wert von  $2600 \text{ MJ pro m}^3$  an erneuerbarem Primärenergieinhalt oder anders gesagt,  $3,3 \text{ MJ pro kg}$ . In Tabelle 15 und Tabelle 16 sowie in Abbildung 7 wird deutlich, dass Bewehrungsstahl zwar den höchsten Anteil an erneuerbarem Primärenergieinhalt besitzt, Baustähle in den anderen Kategorien aber wesentlich mehr Umweltwirkungen verursachen. Im Vergleich mit unterschiedlichen Baustoffgruppen haben Stahl und Eisen aufgrund der hohen Dichte und des Herstellungsverfahrens sehr hoch einzuschätzende Umweltwirkungen. Je nachdem, in welchem Ausmaß der Verbau stattfindet, relativiert sich das Ergebnis jedoch, z.B. bei Bewehrungsstahl, der oft nur zu geringeren Teilen im Bauteil vorhanden ist. In folgender Tabelle 15 und in Abbildung 7 werden die Daten pro  $\text{m}^3$  berechnet, während Tabelle 16 die Umweltwirkungen pro kg zeigt.

	$PEI_e$	$PEI_{ne}$	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Bewehrungsstahl	26000	74299	5865	$2,09E-08$	2,27	12,76	1,56
Baustähle	6614	140157	13661	$1,09E-06$	5,50	27,72	2,91

Tabelle 15: Umweltwirkungen von Stahl in  $\text{m}^3$

Zum Vergleich, die Werte für Stahl auf 1kg bezogen:

	$PEI_e$	$PEI_{ne}$	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Bewehrungsstahl	3,30	9,44	0,74	$2,66E-12$	$2,89E-04$	$1,62E-03$	$1,98E-04$
Baustähle	0,84	17,80	1,74	$1,39E-10$	$6,98E-04$	$3,52E-03$	$3,70E-04$

Tabelle 16: Umweltwirkungen von Stahl in kg



Abbildung 7: Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Stahl in m<sup>3</sup>

## ZIEGEL

In der Baustoffgruppe der Ziegel werden exemplarisch die Daten für den deutschen Durchschnitt von Mauerziegeln sowie gefüllten Mauerziegeln herangezogen. Mauerziegel mit einer Rohdichte von 740 kg/m<sup>3</sup> besitzt grundsätzlich in allen Kategorien geringere Umweltwirkungen als mit Perlit gefüllte Mauerziegel mit einer Rohdichte von etwa 800 kg/m<sup>3</sup> (siehe Abbildung 8). Durch die Befüllung der Mauerziegel mit einem Dämmstoff erhöhen sich insgesamt die Umweltwirkungen des Ziegelprodukts. Dennoch ist dabei nicht zu vernachlässigen, dass beim Verbau des Mauerziegels höchstwahrscheinlich eine eigene Dämmschicht mit relativ gesehen hohen Umweltwirkungen benötigt werden würde. Dahingegen ist dies bei dem gefüllten Mauerziegel wahrscheinlich nicht mehr der Fall und es würde sich diese Variante anbieten. Ob und in welchem Ausmaß gefüllte Mauerziegel jedoch anderen Ziegelvarianten vorzuziehen ist, ist im Einzelfall bei der Bauteilberechnung im Zusammenspiel mit den anderen Bauschichten zu klären. In Tabelle 17 und Tabelle 18 und in Abbildung 8 wird dennoch der Unterschied zwischen dem herkömmlichen Mauerziegel und dem gefüllten Mauerziegel aufgezeigt. In Tabelle 17 sowie Abbildung 8 werden die Umweltwirkungen pro m<sup>3</sup> berechnet, wohingegen Tabelle 18 die Umweltwirkungen pro kg aufzeigt.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Mauerziegel	261	1295	138	1,46E-09	0,01	0,20	0,02
Mauerziegel gefüllt	287	1783	177	2,20E-09	0,03	0,36	0,04

Tabelle 17: Umweltwirkungen von Ziegel in m<sup>3</sup>

Zum Vergleich, die Werte für Ziegel auf 1kg bezogen:

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Mauerziegel	0,45	2,25	0,24	2,54E-12	2,29E-05	3,42E-04	3,69E-05
Mauerziegel gefüllt	0,50	3,10	0,31	3,83E-12	4,71E-05	6,21E-04	7,05E-05

Tabelle 18: Umweltwirkungen von Ziegel in kg



Abbildung 8: Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Ziegel in m<sup>3</sup>

## HOLZ

In der Baustoffgruppe Holz werden beispielhaft eine MDF-Platte, Konstruktionsvollholz und eine OSB-Platte miteinander verglichen. Allgemein ist zu erkennen, dass Holz in der Herstellungsphase des Lebenszyklus (A1-A3) einen sehr hohen Primärenergieinhalt besitzt. Der verhältnismäßig größere Anteil ist jedoch im Gegensatz zu anderen Baustoffgruppen ein erneuerbarer Primärenergiebedarf. Die ausgewählten Holzbaustoffe unterscheiden sich durch ihre Herstellungsart, die verbliebene Restfeuchte im Holz und ihre Rohdichte. Die MDF-Platte hat die geringste Restfeuchte der Holzwerkstoffe mit 2-3%, die OSB-Platte hat eine Restfeuchte von ca 5% und das Konstruktionsvollholz besitzt die vergleichsweise höchste Restfeuchte mit ca. 12%. Bei der Herstellung werden sowohl bei der MDF-Platte als auch bei der OSB-Platte duroplastische Bindemittel verwendet, die der Grund für die tendenziell höheren Umweltwirkungen sind. Bei dem Konstruktionsvollholz hingegen werden die Kanthölzer kraftschlüssig miteinander verkeilt und es werden wenig Bindemittel im Endprodukt benötigt, was sich auf die Umweltwirkungen des Baustoffes positiv auswirkt. In Tabelle 19 und Tabelle 20 und in Abbildung 9 wird der Unterschied der verschiedenen Bauhölzer aufgezeigt und auch auf den Unterschied der Berechnungen zwischen m<sup>3</sup>-Angaben und kg-Angaben hingewiesen. Wie deutlich bei der Betrachtung der Tabelle 19 und der Tabelle 20 zu sehen ist, besitzt die MDF-Platte mit einer Rohdichte von 720 kg/m<sup>3</sup> zwar bei beiden Angaben der Kategorie des erneuerbaren Primärenergiebedarfs die höchsten Werte mit 17534 MJ (siehe Abbildung 9 PEI<sub>e</sub>) bzw. 24,35 MJ. Dennoch lassen sich - wie in Abbildung 9 PEI<sub>e</sub> ebenfalls zu sehen ist - die geringsten Werte für den Primärenergieinhalt der Hölzer bei der Berechnung pro m<sup>3</sup> bei dem Konstruktionsvollholz mit einer Rohdichte von 492 kg/m<sup>3</sup> feststellen und bei der Angabe pro kg jedoch bei der OSB-Platte mit einer Rohdichte von 600 kg/m<sup>3</sup>. Die Tendenz der Werte bleibt bei den übrigen Kategorien zwar erhalten, doch sind einzelne Unterschiede zwischen den Angaben pro m<sup>3</sup> und pro kg zu sehen. Die Tabelle 19 sowie die Abbildung 9 zeigen die Umweltwirkungen pro m<sup>3</sup>, während die Tabelle 20 die Werte pro kg aufzeigt.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
MDF (Roh)	17534	7531	-669	3,58E-08	0,38	1,28	0,48
Konstruktionsvollholz	10610	1256	-709	2,51E-07	0,10	0,48	0,11
Oriented Strand Board	12638	8226	-581	4,06E-06	0,67	1,37	0,19

Tabelle 19: Umweltwirkungen von Holz in m<sup>3</sup>

Zum Vergleich, die Werte für Holz auf 1kg bezogen:

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
MDF (Roh)	24,35	10,46	-0,93	4,97E-11	5,25E-04	1,77E-03	6,73E-04
Konstruktionsvollholz	21,52	2,55	-1,44	5,08E-10	2,08E-04	9,78E-04	2,16E-04
Oriented Strand Board	21,06	13,71	-0,97	6,76E-09	1,12E-03	2,29E-03	3,12E-04

Tabelle 20: Umweltwirkungen von Holz in kg



Abbildung 9: Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Holz in m<sup>3</sup>

## GLAS

Bei der Baustoffgruppe Glas werden exemplarisch Glasscheiben mit zweifachverglastem Isolierglas, Dreifachverglasung und Glasbausteinen miteinander verglichen, alle mit einer Rohdichte für Glas von  $2500 \text{ kg/m}^3$ . Ähnlich wie bei den Stählen ist ein Großteil des Primärenergiebedarfs von Gläsern aus nicht erneuerbarem Primärenergiebedarf. Generell sind die Umweltwirkungen der Dreifachverglasung am höchsten bis auf das Eutrophierungspotential mit einem Wert von 0,03 MJ (siehe Abbildung 10 EP), wo die Dreifachverglasung am besten innerhalb der Baustoffgruppe der Gläser abschneidet. Die geringsten Umweltwirkungen innerhalb dieses Vergleichs verursachen prinzipiell Glasbausteine bis auf den Wert in der Kategorie des Eutrophierungspotenzials (siehe Abbildung 10 EP). Daraus lässt sich schließen, dass sowohl die Dicke des Glases bei der Herstellung als auch die zusätzliche Füllung zwischen den Scheiben Einfluss auf die Umweltwirkungen des Produkts besitzen. Mit steigender Dicke des Glasbaustoffes sinken die relativen Umweltwirkungen im Vergleich zu mehreren Scheiben aus dünnem Glas. Die Dreifach- und die Zweifachverglasung unterscheiden sich noch kaum in ihren Umweltwirkungen voneinander, da jeweils dünne Scheiben Glas (ca.4-6mm) verwendet und in den Scheibenzwischenraum eine Argonfüllung eingefügt werden müssen. Im Vergleich mit anderen Baustoffklassen wird deutlich, dass Glas sehr hohe Umweltwirkungen verursacht. Wie in Abbildung 10 PEI<sub>ne</sub> und Abbildung 10 GWP verdeutlicht wird, sind vor allem die Werte für den Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial relativ hoch. Dies bedeutet, dass der Einsatz von Glas in großen Mengen sehr wohl überdacht werden sollte. Aus Tabelle 21 und Tabelle 22 und der Abbildung 10 wird das Ausmaß der Umweltwirkungen von verschiedenen Verglasungen ersichtlich. Während die Tabelle 21 und die Abbildung 10 die Umweltwirkungen pro  $\text{m}^3$  aufzeigen, werden in Tabelle 22 die Daten pro kg berechnet.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Isolierglas 2-Scheiben	4008	53993	4547	2,88E-09	1,36	18,86	3,63
Dreifachverglasung	4494	56909	4675	3,20E-09	1,39	19,22	0,03
Glasbausteine	2353	42920	4009	1,86E-09	1,21	17,11	3,27

Tabelle 21: Umweltwirkungen von Glas in  $\text{m}^3$

Zum Vergleich, die Werte für Glas auf 1kg bezogen:

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Isolierglas 2-Scheiben	1,60	21,60	1,82	1,15E-12	5,45E-04	7,54E-03	1,45E-03
Dreifachverglasung	1,80	22,76	1,87	1,28E-12	5,57E-04	7,69E-03	1,05E-05
Glasbausteine	0,94	17,17	1,60	7,45E-13	4,84E-04	6,84E-03	1,31E-03

Tabelle 22: Umweltwirkungen von Glas in kg



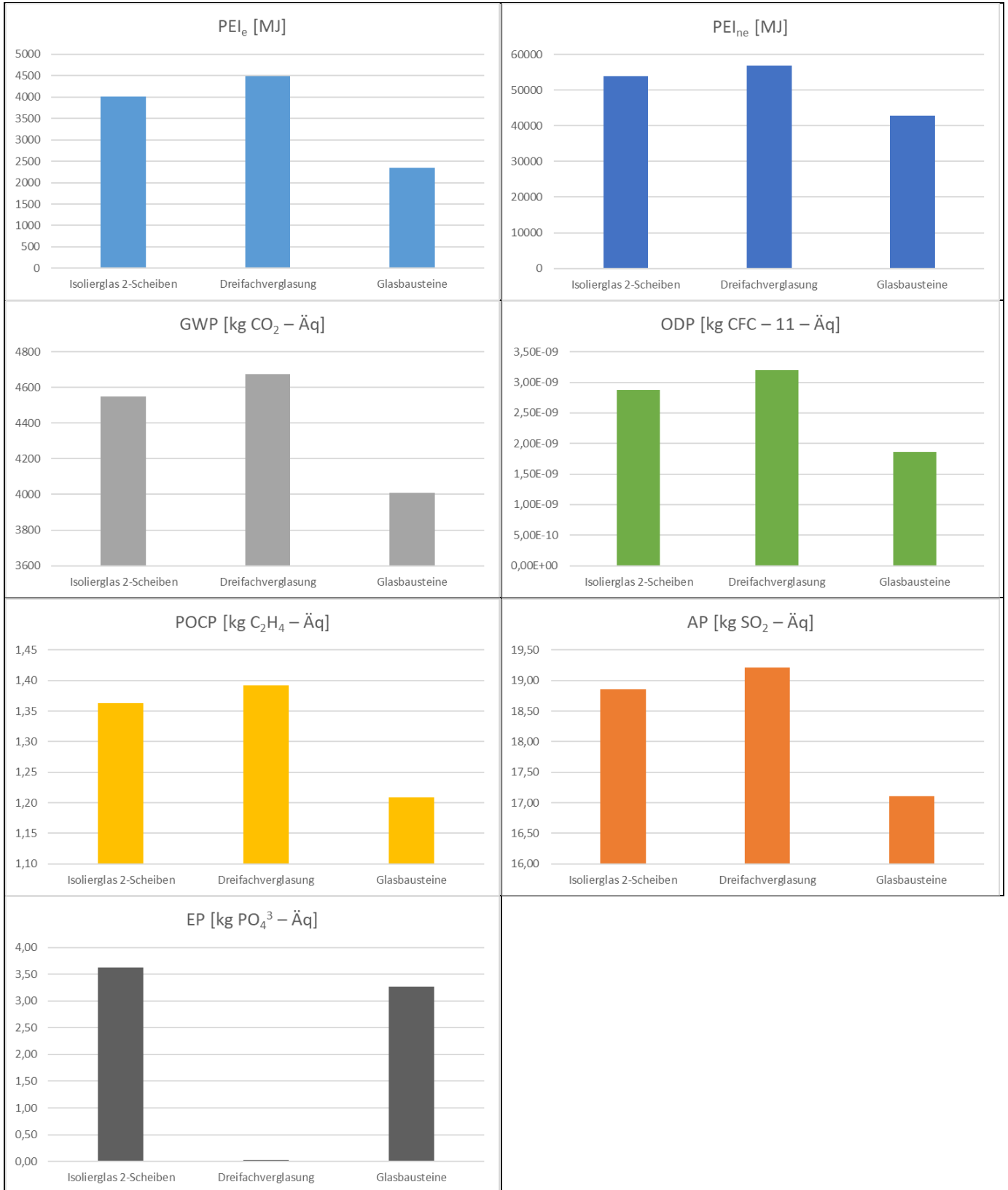


Abbildung 10: Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Glas in m<sup>3</sup>

### 3.3.2 Ergebnisse der Bauteilanalyse

Um eine Vergleichbarkeit der Produkte zu gewährleisten, werden alle Werte auf 1m<sup>2</sup> des Bauteils bezogen. Damit wird außer Acht gelassen, welche Vorteile sich durch bestimmte Bauteilversionen, die besonders schlank ausfallen, ergeben würden. Diese Verallgemeinerung ist aber notwendig, um eine angemessene Gleichwertigkeit der Voraussetzungen für die jeweilige Beurteilung der Baustoffe zu gewährleisten. Der Betrachtungszeitraum war 100 Jahre und es wird mit allen Phasen des Lebenszyklus gerechnet, inklusive des Moduls D. Außerdem werden die Bauteile im Bezug auf den Standort Wien berechnet. Erhoben wurden diese Daten zwischen dem 1. Januar 2018 und dem 31. März 2018 und es wurde darauf geachtet, dass alle Datensätze mindestens noch 1 bis 2 Jahre Gültigkeit besitzen.

## ROHBAU

### GESCHOSSDECKEN

Bei dem Vergleich der Rohbauvarianten der Geschossdecken ist ersichtlich, dass Betonaufbauten den geringsten erneuerbaren Primärenergiebedarf, dafür den höchsten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf besitzen. Im Gegensatz dazu bieten Holzdeckenaufbauten das höchste Potenzial an erneuerbarem Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 11 PEI<sub>e</sub>) und teilweise auch negative Werte für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 11 PEI<sub>ne</sub>), was als Gutschrift für den weiteren Lebenszyklus gezählt wird. Bis auf den hohen Gehalt an erneuerbarem Primärenergieinhalt mit einem Wert von 1691 MJ liefert beispielsweise eine Massivholzdecke die niedrigsten Werte in den Umweltwirkungskategorien (siehe Tabelle 23 und Abbildung 11).

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
<b>1 Stahlbetondecke</b> <i>Beton C25/30 20cm, Stahleinlage 2%</i>	18	468	62,4	1,35E-07	0,018	0,164	0,032
<b>2 Plattenbalkendecke</b> <i>Beton C25/30 12cm bei 15% Deckenfläche, Stahleinlage 1%, Betonträger C25/30 20cm, Stahleinlage 5%</i>	19	496	66,2	1,43E-07	0,019	0,174	0,034
<b>3 Stahlsteindecke</b> <i>Beton C25/30 12cm, Stahleinlage 1%, Betonträger 15% C25/30 20cm, Stahleinlage 5%, Hochlochziegel 85% 20cm</i>	61	641	84,2	1,0E-07	0,002	0,193	0,037
<b>4 Holzbalkenkonstruktion</b> <i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 20cm, OSB Platte 1,9cm</i>	911	-88	-16,5	-7,9E-06	0,028	0,036	0,011
<b>5 Holz-Hohlkastendecke</b> <i>OSB-Platte 2,4cm, Holzbalken 18cm, OSB Platte 1,9cm</i>	919	-65	-15,5	-8,0E-06	0,030	0,040	0,012
<b>6 Massivholzdecke</b> <i>Leimholz 18cm</i>	1691	-504	-36,5	-1,5E-05	0,016	0,028	0,023
<b>7 Holz-Beton-Verbunddecke</b> <i>Beton C25/30 10cm, Stahleinlage 5%, Leimholz 14cm</i>	1324	-165	1,9	-1,2E-05	0,021	0,101	0,033

Tabelle 23: Vergleich der Umweltwirkungen von Geschossdecken im Rohbau

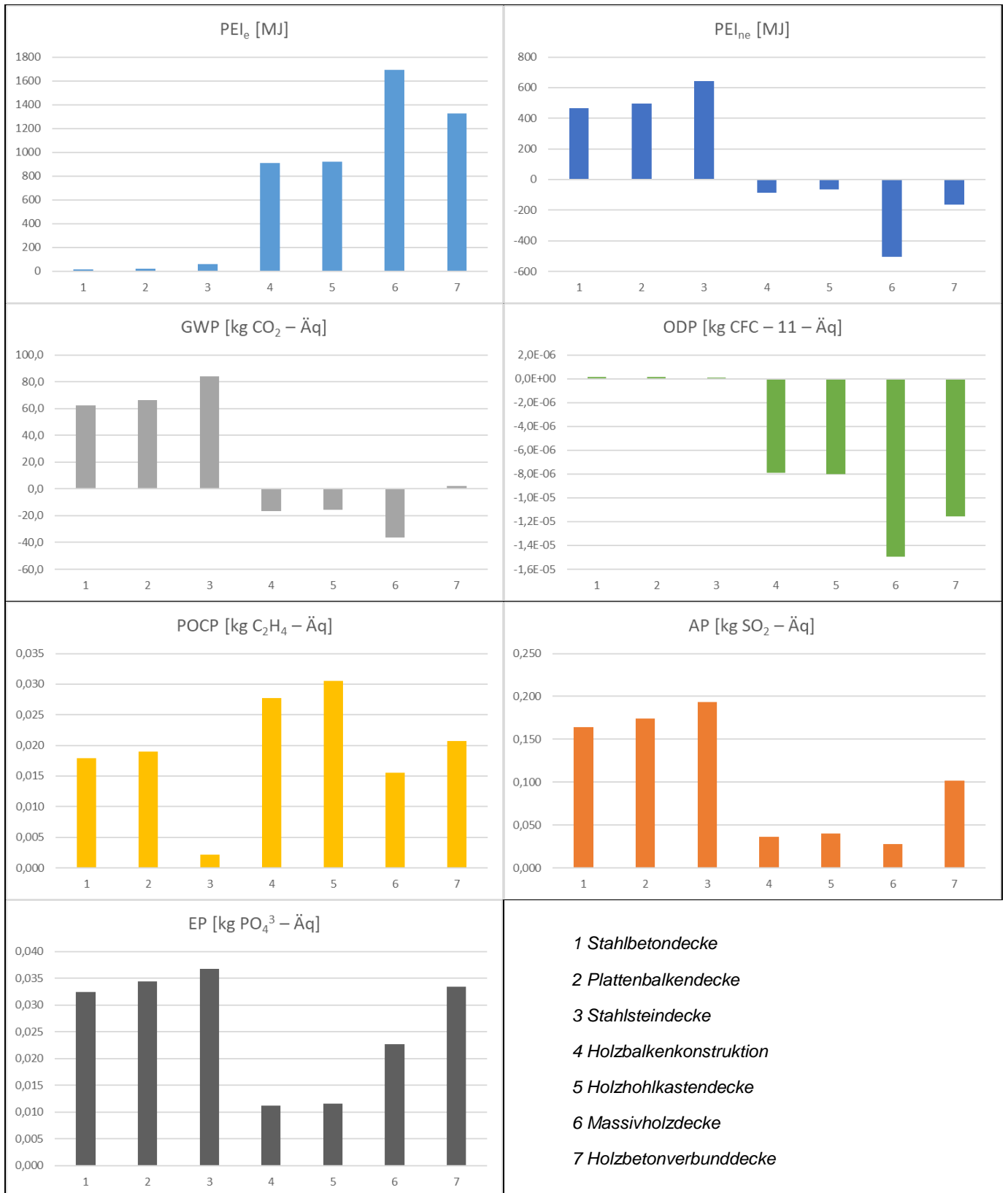


Abbildung 11: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Geschossdecken im Rohbau

### OPAKE AUßENWÄNDE

Bei dem Vergleich der Rohbauvarianten der opaken Außenwände ist festzustellen, dass Ziegel und Betonbauweisen die geringsten Werte für den erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 12  $PEI_e$ ), dafür aber die höchsten Werte für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 12  $PEI_{ne}$ ) aufweisen. Die höchsten Werte für die Umweltwirkungen besitzen die monolithischen Varianten der Stahlbetonwände und Ziegelwände, wobei die monolithische Stahlbetonwand mit Abstand die höchsten Umweltwirkungen aufweist. Holztafelwände verursachen bis auf den hohen Gehalt an erneuerbarem Primärenergieinhalt mit einem Wert von 650 MJ (Abbildung 12  $PEI_e$ ) die geringsten Umweltwirkungen (siehe Tabelle 24, Abbildung 12).

		$PEI_e$	$PEI_{ne}$	GWP	ODP	POCP	AP	EP
1	<b>Stahlbeton</b>	18	459	61,8	1,4E-07	0,018	0,161	0,032
	<i>Beton C25/30 20cm, Stahleinlage 2%</i>							
2	<b>Stahlbeton Monolithisch</b>	45	1148	154,4	3,4E-07	0,044	0,402	0,079
	<i>Beton C25/30 50cm, Stahleinlage 2%</i>							
3	<b>Hochlochziegel</b>	68	409	52,7	3,9E-10	-0,016	0,098	0,018
	<i>Hochlochziegel 24cm, Dünnbettmörtel</i>							
4	<b>Hochlochziegel mit Perlite</b>	161	1085	120,9	1,0E-07	-0,028	0,260	0,040
	<i>Hochlochziegel 47cm Dünnbettmörtel, Blähperlithfüllung</i>							
5	<b>Hochlochziegel Monolithisch</b>	140,9	852	109,9	8,0E-10	-0,0332	0,205	0,0365
	<i>Hochlochziegel 50cm, Dünnbettmörtel</i>							
6	<b>Holztafelwand</b>	650	-103	-13,7	-5,6E-06	0,015	0,019	0,007
	<i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 18cm</i>							

Tabelle 24: Vergleich der Umweltwirkungen von Außenwänden im Rohbau

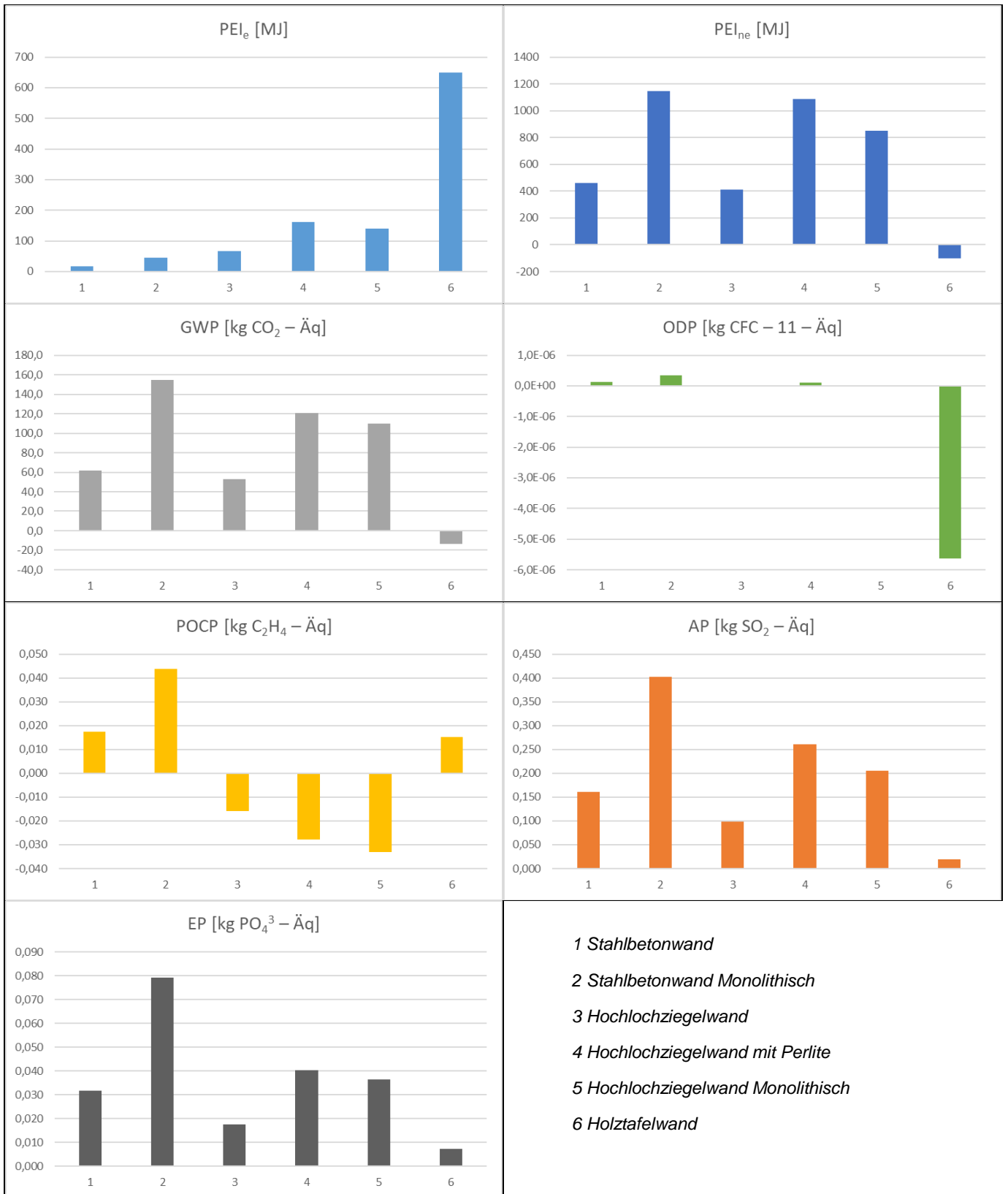


Abbildung 12: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Außenwänden im Rohbau

## INNENWÄNDE

Beim Vergleich der Rohbauvarianten der massiven Innenwände ist der deutliche Unterschied zwischen den verschiedenen Bauweisen erkennbar. Der erneuerbare Primärenergiebedarf ist bei der massiven Betonwand mit einem Wert von 19 MJ zwar am geringsten (siehe Abbildung 13 PEI<sub>e</sub>), jedoch bei allen anderen Umweltwirkungen am höchsten. Besonders auffällig ist dies bei den Werten für das Ozonbildungspotenzial (Abbildung 13 POCP), das Versauerungspotenzial (Abbildung 13 AP) und das Eutrophierungspotenzial (Abbildung 13 EP). Gerade bei der Kategorie des Ozonbildungspotenzials ist ein massiver Unterschied aufgrund des ausgesprochen hohen Wertes der Betonwand ersichtlich. Kalksteinwände weisen einen niedrigen Wert von 306 MJ bei dem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (Abbildung 13 PEI<sub>ne</sub>) auf, v.a. aber bei dem Versauerungspotenzial und bei dem Eutrophierungspotenzial sind erhebliche Unterschiede zu den anderen Bauweisen zu erkennen. Die massive Ziegelwand zeichnet sich durch den höchsten Anteil an erneuerbarem Primärenergiebedarf und den geringsten Werten des Ozonabbaupotenzials sowie Ozonbildungspotenzials aus (siehe Tabelle 25, Abbildung 13).

		PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
1	<b>Massivwand Kalksandstein</b> <i>Kalksandstein 30cm, Dünnbettmörtel</i>	53	306	41,3	4,6E-10	3,6E-04	0,028	0,005
2	<b>Massivwand Beton</b> <i>Beton C25/30 21cm, Stahleinlage 1%</i>	19	496	66,2	1,4E-07	0,019	0,174	0,034
3	<b>Massivwand Ziegel</b> <i>Hochlochziegel 24cm, Dünnbettmörtel</i>	67,6	409	52,7	3,9E-10	-1,6E-02	9,8E-02	1,8E-02

Tabelle 25: Vergleich der Umweltwirkungen von Innenwänden im Rohbau

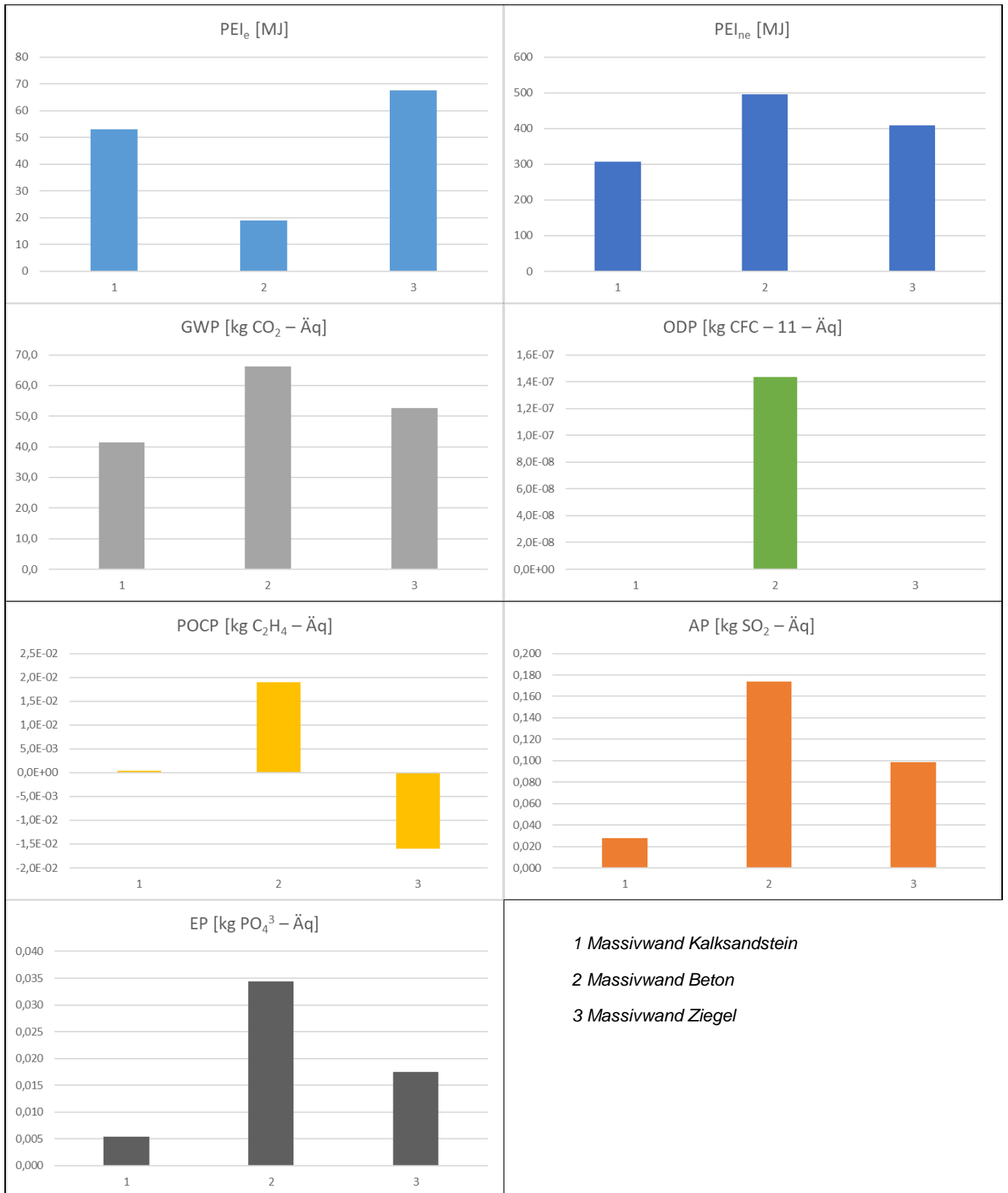


Abbildung 13: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Innenwänden im Rohbau

## ROHBAU MIT WÄRMEDÄMMUNG

### GESCHOSSDECKEN

Auffällig bei dem Vergleich der Rohbauvarianten mit Wärmedämmung der Geschossdecken ist, dass Betonaufbauten den geringsten erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 14  $PEI_e$ ), dafür aber den höchsten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 14  $PEI_{ne}$ ) besitzen. Im Vergleich dazu bieten Holzdeckenaufbauten das höchste Potenzial an erneuerbarem Primärenergiebedarf und teilweise auch negative Werte für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf, was als Gutschrift für den weiteren Lebenszyklus gezählt wird (siehe Tabelle 26, Abbildung 14). Durch den Verbau von Wärmedämmung erhöhen sich insgesamt die Umweltwirkungen der Bauteile. Je nach Art und Dimensionierung sind deutliche Unterschiede zu den Rohbauvarianten feststellbar.

	$PEI_e$	$PEI_{ne}$	GWP	ODP	POCP	AP	EP
<b>1 Stahlbetondecke</b>	31	583	71,1	4,3E-07	0,021	0,227	0,042
<i>Beton C25/30 20cm, Stahleinlage 2%, Trittschalldämmung 2cm</i>							
<b>2 Plattenbalkendecke</b>	32	611	74,9	4,4E-07	0,022	0,237	0,044
<i>Beton C25/30 12cm bei 15% Deckenfläche, Stahleinlage 1%, Betonträger C25/30 20cm, Stahleinlage 5%, Trittschalldämmung 2cm</i>							
<b>3 Stahlsteindecke</b>	74	756	92,9	4,0E-07	0,006	0,256	0,046
<i>Beton C25/30 12cm, Stahleinlage 1%, Betonträger 15% C25/30 20cm, Stahleinlage 5%, Hochlochziegel 85% 20cm, Trittschalldämmung 2cm</i>							
<b>4 Holzbalkenkonstruktion</b>	981	436	21,6	-6,6E-06	0,043	0,317	0,053
<i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 20cm, Mineralwolle 20cm, OSB-Platte 1,9cm, Gipskartonplatte 1,25cm</i>							
<b>5 Holz-Hohlkastendecke</b>	981	405	18,7	-6,8E-06	0,045	0,293	0,049
<i>OSB-Platte 2,4cm, Holzbalken 18cm, Mineralwolle 18cm, OSB-Platte 1,9cm</i>							
<b>6 Massivholzdecke</b>	1704	-389	-27,8	-1,5E-05	0,019	0,091	0,032
<i>Leimholz 18cm, Trittschalldämmung 2cm</i>							
<b>7 Holz-Beton-Verbunddecke</b>	1337	-50	10,6	-1,1E-05	0,024	0,165	0,043
<i>Beton C25/30 10cm, Stahleinlage 5%, Leimholz 14cm, Trittschalldämmung 2cm</i>							

Tabelle 26: Vergleich der Umweltwirkungen von Geschossdecken im Rohbau mit Wärmedämmung



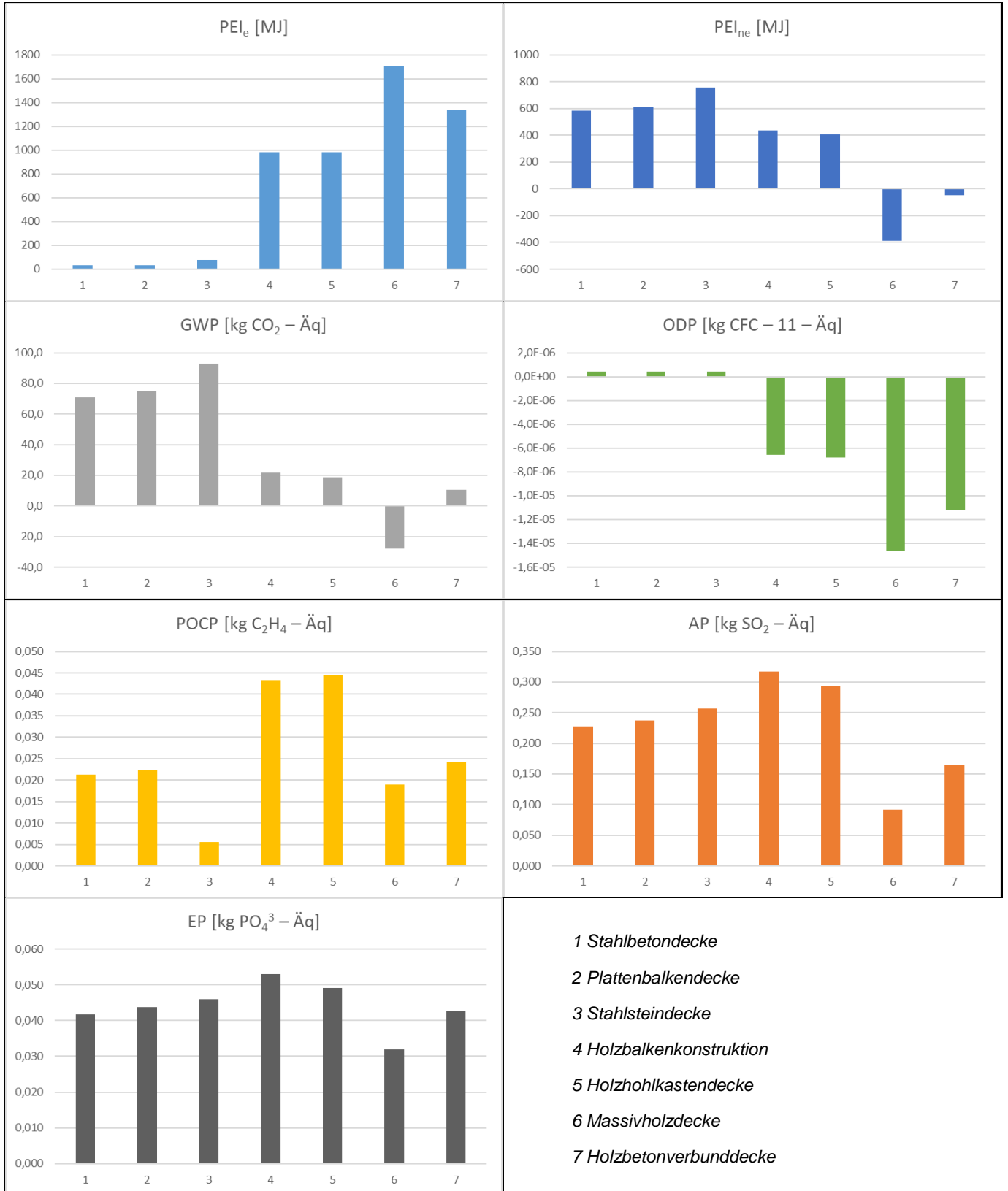


Abbildung 14: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Geschossdecken im Rohbau mit Wärmedämmung

### OPAKE AUßENWÄNDE

Bei dem Vergleich der Rohbauvarianten mit Wärmedämmung der opaken Außenwände ist festzustellen, dass Ziegel und Betonbauweisen die geringsten Werte für den erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 15  $PEI_e$ ), dafür aber die höchsten Werte für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 15  $PEI_{ne}$ ) aufweisen. Holzwände dagegen schneiden in dieser Hinsicht besser ab. Vor allem die mit Zellulose gedämmte Holztafelwand besitzt durchschnittlich die geringsten Umweltwirkungen, bis auf den hohen Wert von 1212 MJ (Abbildung 15  $PEI_e$ ) für den erneuerbaren Primärenergieinhalt. Trotz des Verbaus von Wärmedämmung besitzen die monolithischen Varianten der Stahlbeton- und Ziegelwände und im speziellen die Stahlbetonwand die höchsten Umweltwirkungen in den Kategorien des nicht erneuerbaren Primärenergiegehaltes, des Treibhauspotenzials, des Photochemischen Ozonbildungspotenzials, des Versauerungspotenzials und des Eutrophierungspotenzials (siehe Tabelle 27, Abbildung 15).

		$PEI_e$	$PEI_{ne}$	GWP	ODP	POCP	AP	EP
1	<b>Stahlbeton mit WDVS</b> <i>Beton C25/30 20cm, Stahleinlage 2%, Wärmedämmverbundsystem 16cm</i>	41	634	73,7	3,1E-07	0,022	0,244	0,043
2	<b>Stahlbeton Monolithisch</b> <i>Beton C25/30 50cm, Stahleinlage 2%</i>	45	1148	154,4	3,4E-07	0,044	0,402	0,079
3	<b>Hochlochziegel mit Mineralwolle</b> <i>Hochlochziegel 24cm, Dünnbettmörtel, Mineralwolle 16cm</i>	141	966	93,2	1,4E-06	0,001	0,399	0,062
4	<b>Hochlochziegel mit Perlite</b> <i>Hochlochziegel 47cm Dünnbettmörtel, Blähperlitfüllung</i>	161	1085	120,9	1,0E-07	-0,028	0,260	0,040
5	<b>Hochlochziegel Monolithisch</b> <i>Hochlochziegel 50cm, Dünnbettmörtel</i>	140	852	109,9	8,0E-10	-0,0332	0,205	0,0365
6	<b>Holztafelwand mit Mineralwolle</b> <i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 18cm, Mineralwolle 18cm, Holzfaserdämmplatte 1,9cm</i>	893	425	12,0	-4,4E-06	0,031	0,279	0,046
7	<b>Holztafelwand mit Zellulose</b> <i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 18cm, Zellulose 18cm, Holzfaserdämmplatte 2cm</i>	1212	-21	-58,3	-5,7E-06	0,018	0,050	0,013

Tabelle 27: Vergleich der Umweltwirkungen von Außenwänden im Rohbau mit Wärmedämmung

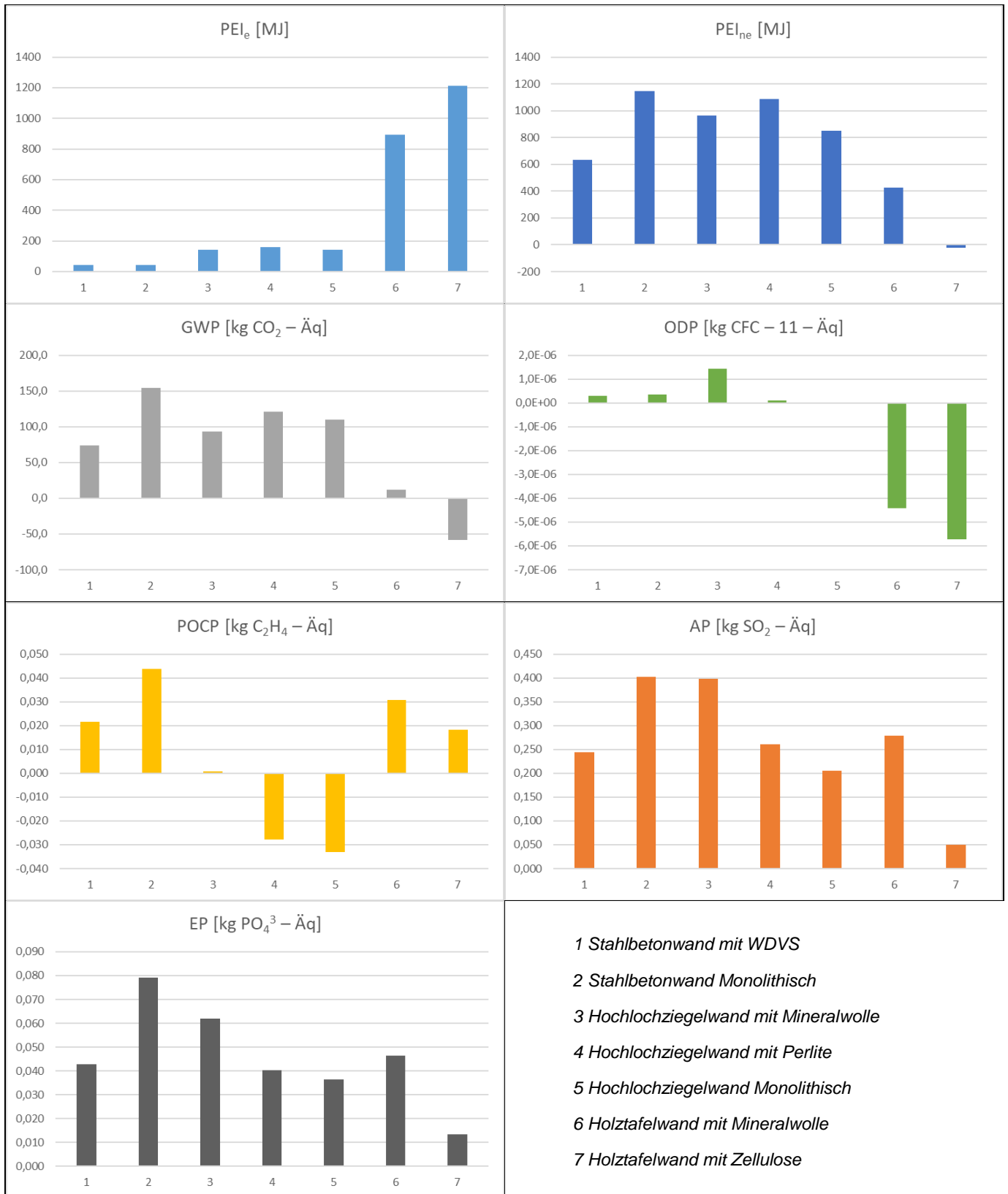


Abbildung 15: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Außenwänden im Rohbau mit Wärmedämmung

## FLACHDACHAUFBAUTEN

Bei dem Vergleich der Rohbauvariante mit Wärmedämmung der Flachdachaufbauten ist auffällig, dass das klassische Umkehrdach in jeglichen Aspekten die höchsten Umweltwirkungen besitzt. Ein gängiges Warmdach hat in allen Kategorien die niedrigsten Werte. Lediglich bei den Werten für den erneuerbaren Primärenergiebedarf unterscheiden sich die Aufbauten untereinander nicht (siehe Tabelle 28, Abbildung 16).

		PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
1	<b>Warmdach</b>	19	1266	97,7	3,0E-07	0,238	0,223	0,038
	<i>Beton C25/30 20cm, Stahleinlage 2%, EPS-Wärmedämmung 16,5cm</i>							
2	<b>Umkehrdach klassisch</b>	19	1532	109,5	3,6E-07	0,312	0,243	0,040
	<i>Beton C25/30 20cm, Stahleinlage 2%, EPS-Wärmedämmung 22cm</i>							
3	<b>Umkehrdach mit Trennlage</b>	19	1411	104,1	3,3E-07	0,279	0,234	0,039
	<i>Beton C25/30 20cm, Stahleinlage 2%, EPS-Wärmedämmung 19,5cm</i>							

Tabelle 28: Vergleich der Umweltwirkungen von Flachdachaufbauten im Rohbau mit Wärmedämmung

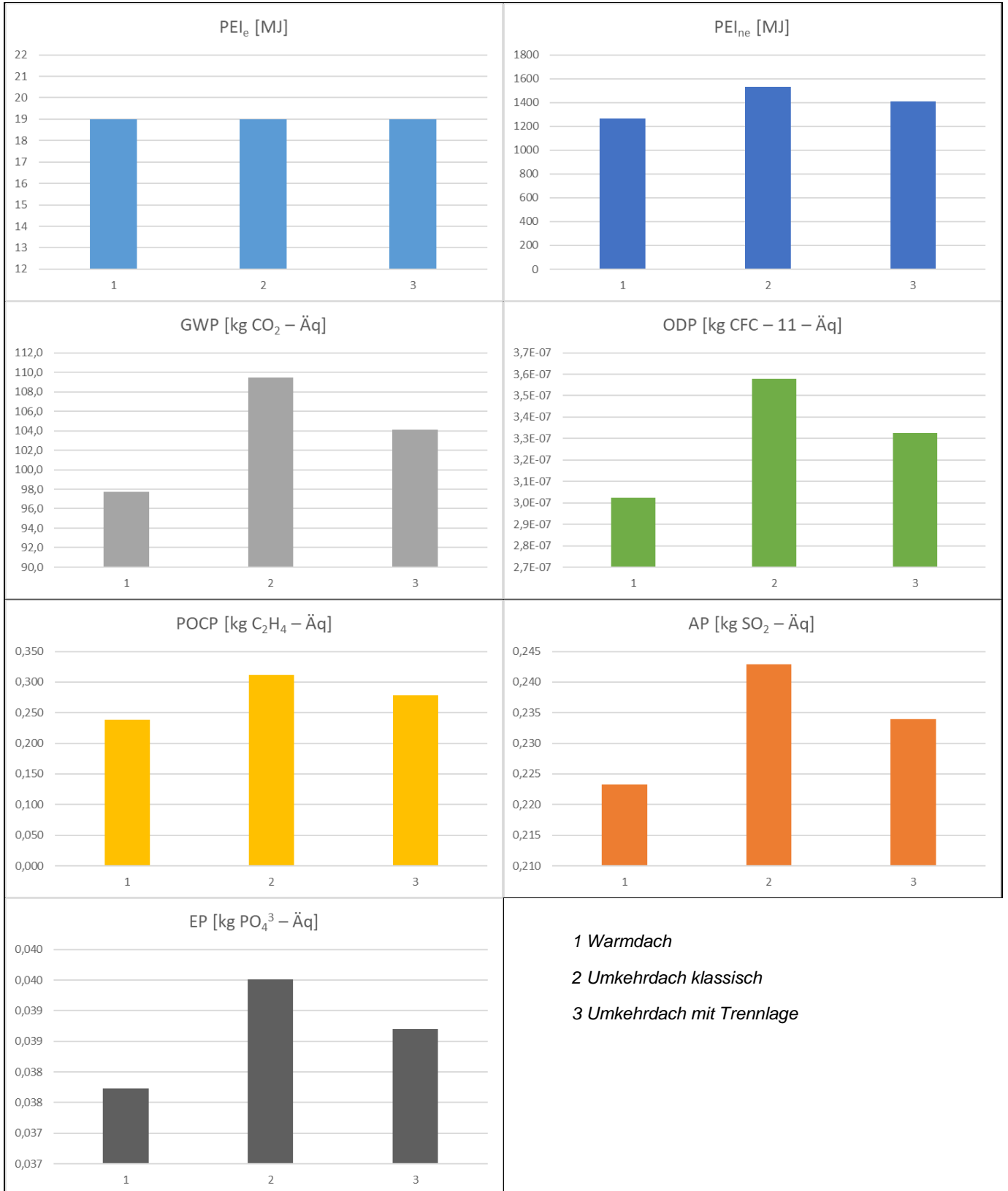


Abbildung 16: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Flachdachaufbauten im Rohbau mit Wärmedämmung

- 1 Warmdach
- 2 Umkehrdach klassisch
- 3 Umkehrdach mit Trennlage

## BAUTEILAUFBAUTEN

### GESCHOSSDECKEN

Auffällig bei dem Vergleich der Geschossdeckenaufbauten ist, dass prinzipiell Betonaufbauten den geringsten erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 17  $PEI_e$ ), dafür aber den höchsten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 17  $PEI_{ne}$ ) besitzen. Besonders die Plattenbalkendecke mit Zementestrich und Laminat sticht unter den Betondecken durch den hohen Wert von 937 MJ (Abbildung 17  $PEI_{ne}$ ) hervor. Im Vergleich dazu bieten Holzdeckenaufbauten das höchste Potenzial an erneuerbarem Primärenergiebedarf und teilweise auch negative Werte für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf, was als Gutschrift für den weiteren Lebenszyklus gezählt wird. Dies ist z.B. bei der Massivholzdecke mit Zementestrich und Steinzeugfliesen mit Werten von -388 MJ (Abbildung 17  $PEI_{ne}$ ) und -27,7 kg  $CO_2 - \ddot{A}q$  (Abbildung 17 GWP) der Fall. Im Gegensatz zu den mineralisch basierenden Aufbauten weisen Holzkonstruktionen negative Werte bei dem Ozonabbaupotenzial (siehe Abbildung 17 ODP) auf, was auf die  $CO_2$  Einspeicherung im Holz zurückzuführen ist, die der Rohstoff Holz als Gutschrift im Lebenszyklus bekommt. Die relativ gesehen schlechtesten Werte bei den Holzaufbauten lassen sich bei der Holzbalkenkonstruktion mit Gipskartonplatte und Langstabparkett und der Holz-Hohlkastendecke mit OSB-Platten und Langstabparkett feststellen (siehe Tabelle 29, Abbildung 17).

		$PEI_e$	$PEI_{ne}$	GWP	ODP	POCP	AP	EP
1	<b>Stahlbetondecke</b> <i>Leichtputz, Stahlbetondecke 20cm, Anhydritestrich 4cm, Trennlage PE, Trittschalldämmung 2cm, Steinzeugfliesen 0,8cm, Fugen Mörtelgruppe III, Dünnbettmörtel</i>	31	584	71,2	4,3E-07	0,021	0,228	0,042
2	<b>Plattenbalkendecke</b> <i>Plattenbalkendecke 32cm, Zementestrich 5,5cm, Trennlage PE, Trittschalldämmung 2cm, Laminat (DPL), Trägermaterial MDF 0,8cm, PE Unterlage</i>	626	937	52,7	1,2E-07	0,037	0,273	0,056
3	<b>Stahlsteindecke</b> <i>Leichtputz, Stahlsteindecke 32cm, Anhydritestrich 4cm, Trennlage PE, Trittschalldämmung 2cm, Steinzeugfliesen 0,8cm, Fugen Mörtelgruppe III, Dünnbettmörtel</i>	75	757	93,0	4,0E-07	0,006	0,257	0,046
4	<b>Holzbalkenkonstruktion</b> <i>Holzbalkenkonstruktion 25cm, Trittschalldämmung 2cm, Mehrschichtparkett 2,25cm</i>	1016	558	30,4	-6,3E-06	0,047	0,383	0,063
5	<b>Holz-Hohlkastendecke</b> <i>Holz-Hohlkastendecke, OSB-Platte 2x1,6cm, Trittschalldämmung 2cm, Mehrschichtparkett 2,25cm</i>	1161	545	26,4	-7,8E-06	0,056	0,369	0,061
6	<b>Massivholzdecke</b> <i>Massivholzdecke 18cm, Zementestrich 5,5cm, Trennlage PE, Trittschalldämmung 2cm, Steinzeugfliesen 0,8cm, Fugen Mörtelgruppe III, Dünnbettmörtel</i>	1704	-388	-27,7	-1,5E-05	0,019	0,091	0,032
7	<b>Holz-Beton-Verbunddecke</b> <i>Holz-Beton-Verbunddecke 24cm, Anhydritestrich 4cm, Trennlage PE, Trittschalldämmung 2cm, Laminat (DPL), Trägermaterial MDF 0,8cm, PE Unterlage</i>	1930	276	-11,6	-1,2E-05	0,039	0,201	0,055

Tabelle 29: Vergleich der Umweltwirkungen von Geschossdecken

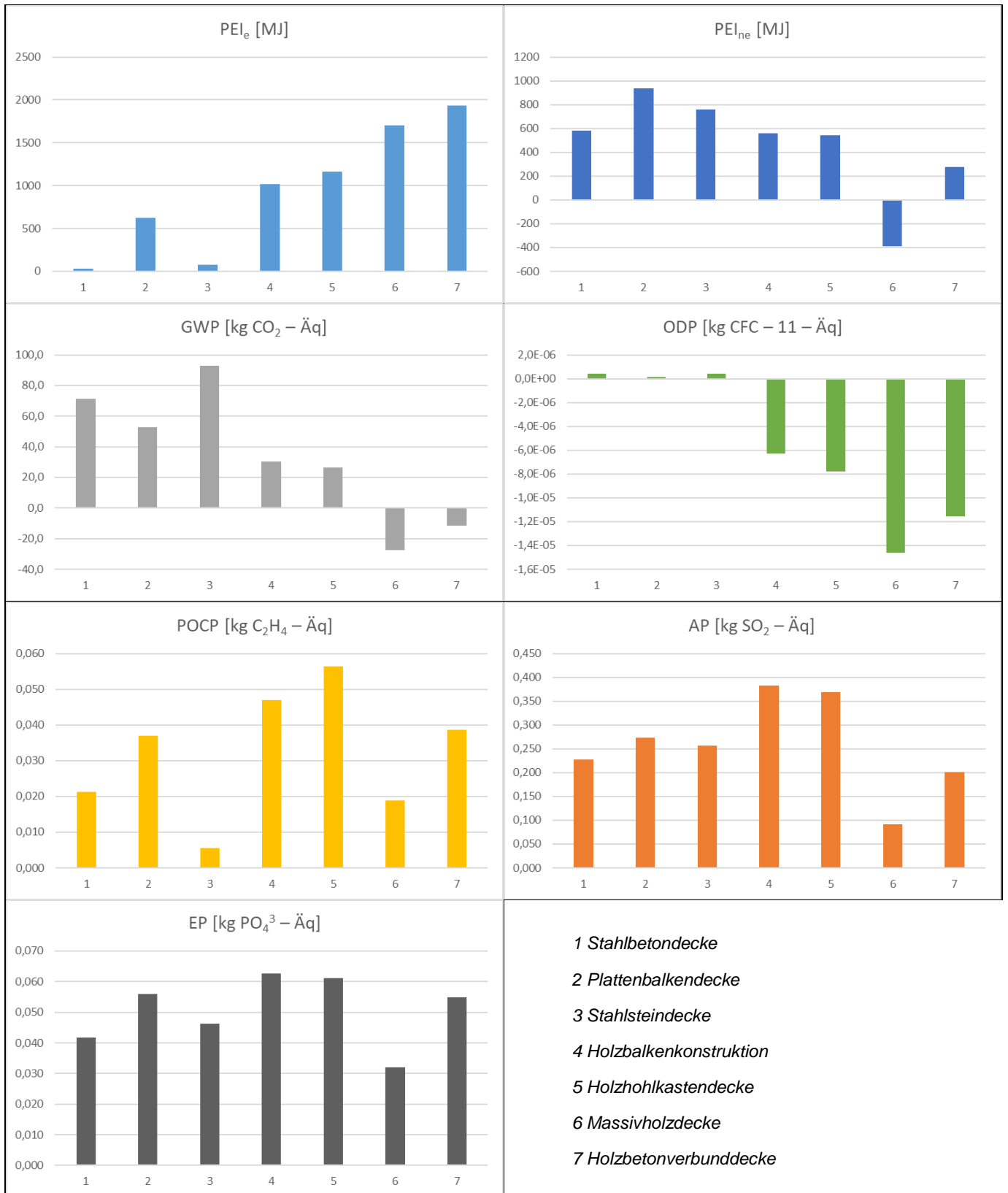


Abbildung 17: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Geschossdecken

## OPAKE AUßENWÄNDE

Bei dem Vergleich der opaken Außenwände (U-Wert 0,20 W/m<sup>2</sup>K) ist festzustellen, dass Ziegel und Betonbauweisen die geringsten Werte für den erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 18 PEI<sub>e</sub>), dafür aber die höchsten Werte für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (siehe Abbildung 18 PEI<sub>ne</sub>) aufweisen. Vor allem die monolithische Stahlbetonwand weist mit einem Wert von 1148 MJ (Abbildung 18 PEI<sub>ne</sub>) einen deutlich höheren Primärenergiebedarf auf, als die restlichen mineralischen Wandaufbauten. Holzbauten dagegen schneiden in dieser Hinsicht besser ab. Ähnlich wie bei den Geschossdeckenaufbauten lässt sich bei Holzkonstruktionen ein negatives Ozonbildungspotenzial (Abbildung 18 POCP) nachweisen und ein deutlich geringerer Anteil an nicht erneuerbarem Primärenergiebedarf (Abbildung 18 PEI<sub>ne</sub>). Im Hinblick auf das Ozonbildungspotenzial, das Versauerungspotenzial und das Eutrophierungspotenzial ergeben Betonbauten wesentlich höhere Umweltwirkungen als alle anderen Außenwandvarianten und gerade Ziegel weist bei diesen Kategorien sehr niedrige Werte auf (siehe Tabelle 30, Abbildung 18).

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
<b>1 Stahlbeton mit WDVS</b> <i>Stahlbetonwand mit WDVS 36cm, Normalputz</i>	41	634	73,8	3,1E-07	0,022	0,244	0,043
<b>2 Stahlbeton Monolithisch</b> <i>Gipsputz, Stahlbetonwand 50cm, Normalputz</i>	45	1148	154,4	3,4E-07	0,044	0,402	0,079
<b>3 Hochlochziegel mit Hinterlüftung</b> <i>Hochlochziegelwand 40cm, Vormauerziegel 11,5cm, Ankerschienen</i>	142	974	93,8	1,5E-06	0,001	0,400	0,062
<b>4 Hochlochziegel mit Perlite</b> <i>Gipsputz, Hochlochziegelwand 47cm, Normalputz</i>	161	1086	120,9	1,0E-07	-0,028	0,260	0,040
<b>5 Hochlochziegel Monolithisch</b> <i>Gipsputz, Hochlochziegelwand 50cm, Normalputz</i>	140,9	853	109,9	8,1E-10	-0,0332	0,205	0,0365
<b>6 Holztafelwand mit Mineralwolle</b> <i>Holztafelwand 23,5cm, Normalputz</i>	893	426	12,1	-4,4E-06	0,031	0,279	0,046
<b>7 Holztafelwand mit Zellulose</b> <i>Holztafelwand 23,5cm, Normalputz</i>	1212	-20	-58,2	-5,7E-06	0,018	0,050	0,013

Tabelle 30: Vergleich der Umweltwirkungen von Außenwänden



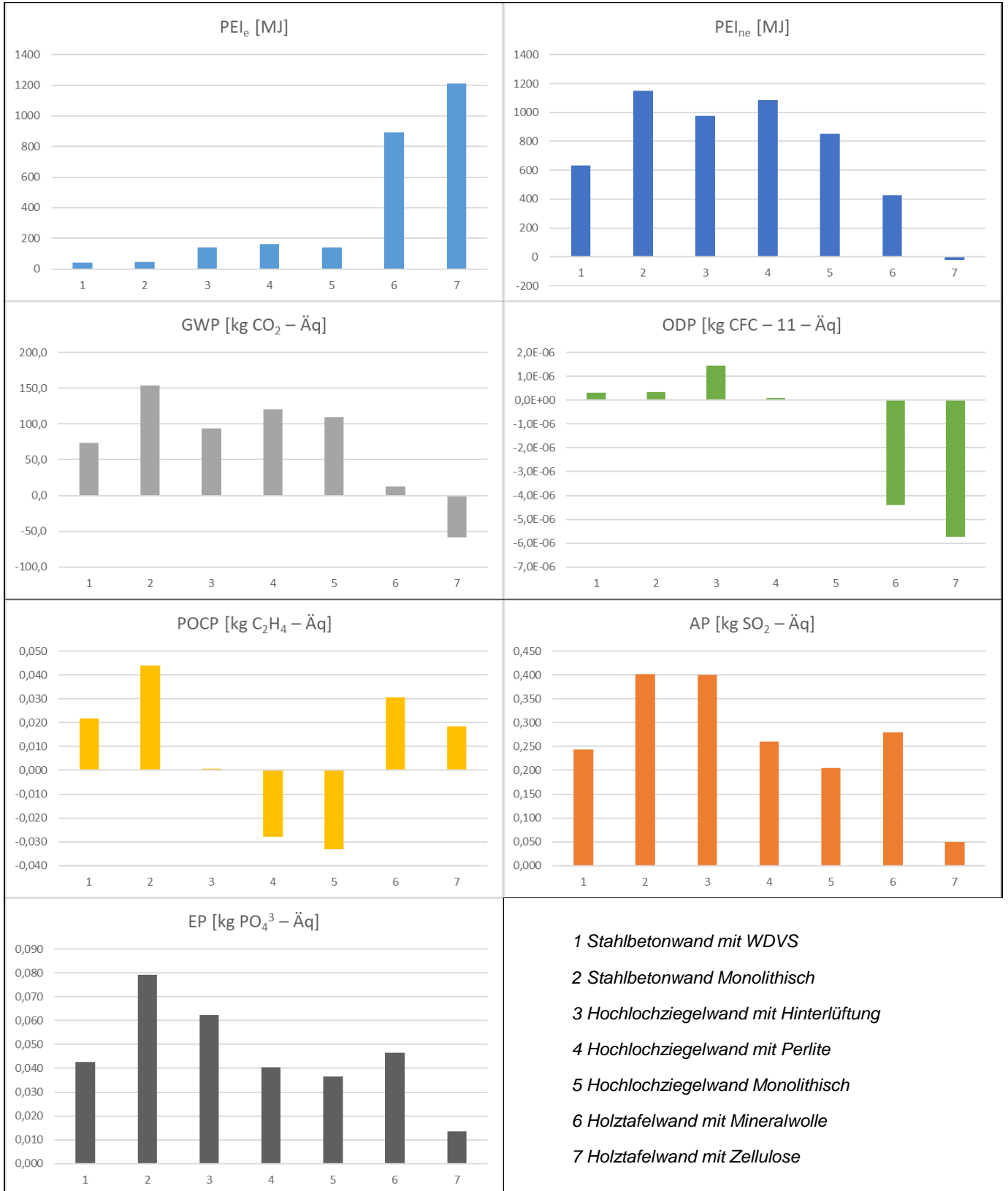


Abbildung 18: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Außenwänden

## FLACHDACHAUFBAUTEN

Der Vergleich der Flachdachaufbauten (U-Wert 0,20 W/m<sup>2</sup>K) verläuft ähnlich dem der Rohbauvarianten der Flachdächer. Dabei ist auffällig, dass das klassische Umkehrdach in jeglichen Aspekten die höchsten Umweltwirkungen besitzt. Ein normal gängiges Warmdach hat in allen Kategorien die niedrigsten Werte. Lediglich bei den Werten für den erneuerbaren Primärenergiebedarf unterscheiden sich die Aufbauten untereinander kaum (siehe Tabelle 31, Abbildung 19). Doch im Hinblick auf die Rohbauvariante ist feststellbar, dass sich die Werte der einzelnen Dächer mehr angeglichen haben. Es sind nicht mehr so große Unterschiede erkennbar, wie es beim Rohbau der Fall gewesen ist.

		PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
1	<b>Warmdach</b>	19	1267	97,8	3,0E-07	0,238	0,223	0,038
	<i>Warmdach 36,5cm, Polyestervlies, EDPM-Bahn, Kies 2/32 5cm</i>							
2	<b>Umkehrdach klassisch</b>	20	1533	109,6	3,6E-07	0,312	0,243	0,040
	<i>Umkehrdach klassisch 42cm, Polyestervlies, EDPM-Bahn, Kies 2/32 5cm</i>							
3	<b>Umkehrdach mit Trennlage</b>	19	1413	104,2	3,3E-07	0,278	0,234	0,039
	<i>Umkehrdach mit Trennlage 39,5cm, Polyestervlies, EPDM-Bahn, PE-HD Trennfolie, Kies 2/32 5cm</i>							

Tabelle 31: Vergleich der Umweltwirkungen von Flachdachaufbauten

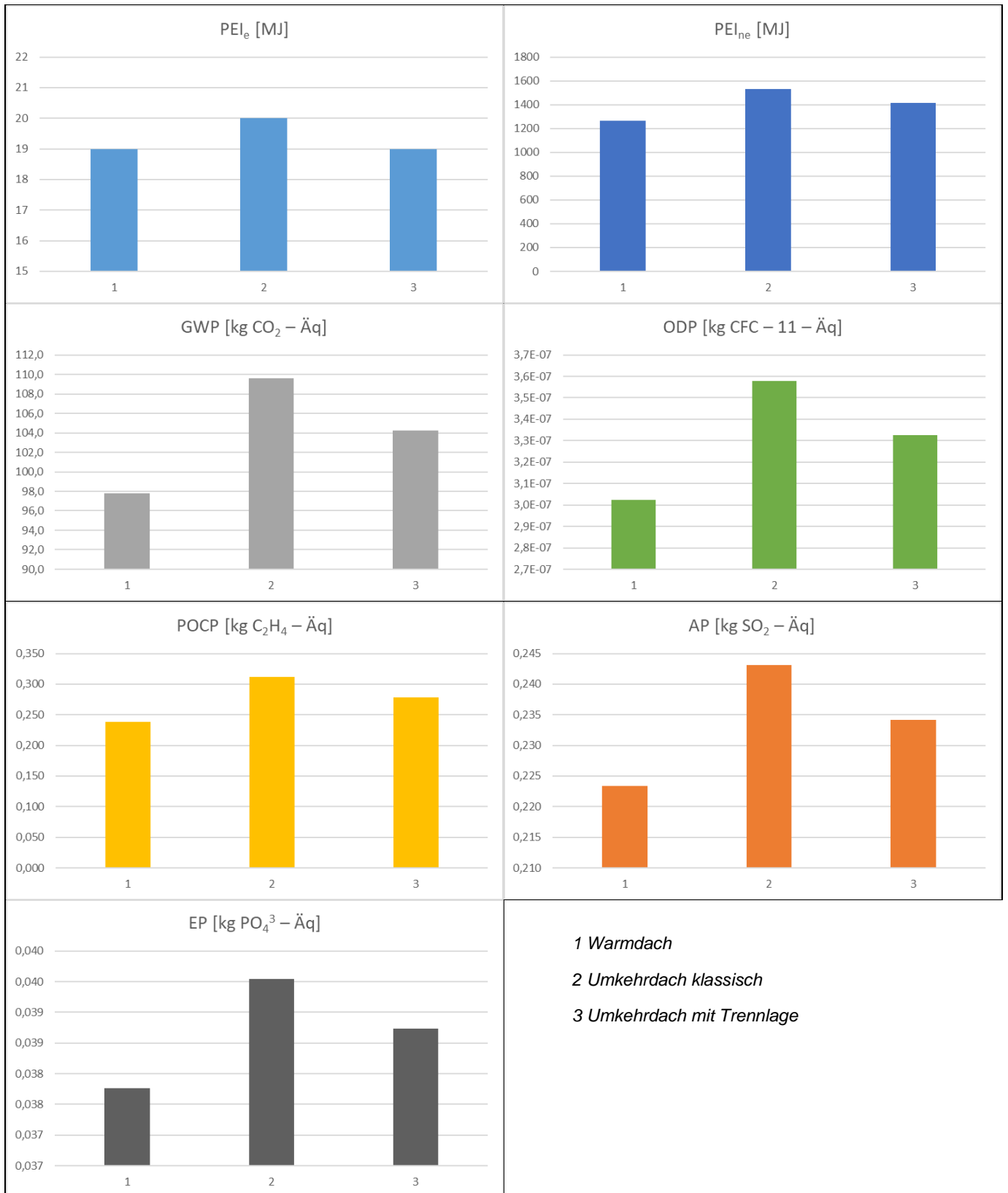


Abbildung 19: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Flachdachaufbauten

- 1 Warmdach
- 2 Umkehrdach klassisch
- 3 Umkehrdach mit Trennlage

## INNENWÄNDE

Beim Vergleich der massiven Innenwände ist – wie auch schon in der Rohbauvariante – der deutliche Unterschied zwischen den verschiedenen Bauweisen erkennbar. Der erneuerbare Primärenergiebedarf ist bei der massiven Betonwand mit einem Wert von 19 MJ (Abbildung 20 PEI<sub>e</sub>) am geringsten, jedoch bei allen anderen Umweltwirkungen am höchsten. Besonders auffällig ist dies bei den Werten für das Ozonbildungspotenzial (Abbildung 20 POCP), das Versauerungspotenzial (Abbildung 20 AP) und das Eutrophierungspotenzial (Abbildung 20 EP). Gerade bei der Kategorie des Ozonbildungspotenzials ist ein massiver Unterschied aufgrund des ausgesprochen hohen Wertes von 0,019 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – Äq der Betonwand ersichtlich. Kalksteinwände weisen niedrige Werte bei dem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (Abbildung 20 PEI<sub>ne</sub>) auf, v.a. aber bei dem Versauerungspotenzial und bei dem Eutrophierungspotenzial sind erhebliche Unterschiede zu den anderen Bauweisen zu erkennen. Die massive Ziegelwand zeichnet sich mit 67,7 MJ durch den höchsten Anteil an erneuerbarem Primärenergiebedarf und den geringsten Werten des Ozonabbaupotenzials (3,9E-10 kg CFC – 11 – Äq) sowie des Ozonbildungspotenzials (-0,0159 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – Äq) aus (siehe Tabelle 32, Abbildung 20).

		PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
1	<b>Massivwand Kalksandstein</b> <i>Kalksandsteinwand 20cm, Gipsputz</i>	53	306	41,3	4,6E-10	0,00001	0,028	0,005
2	<b>Massivwand Beton</b> <i>Betonwand 21cm, Gipsputz</i>	19	496	66,2	1,4E-07	0,019	0,174	0,034
3	<b>Massivwand Ziegel</b> <i>Ziegelwand 24cm, Gipsputz</i>	67,7	410	52,8	3,9E-10	-0,0159	9,9E-02	1,8E-02

Tabelle 32: Vergleich der Umweltwirkungen von Innenwänden

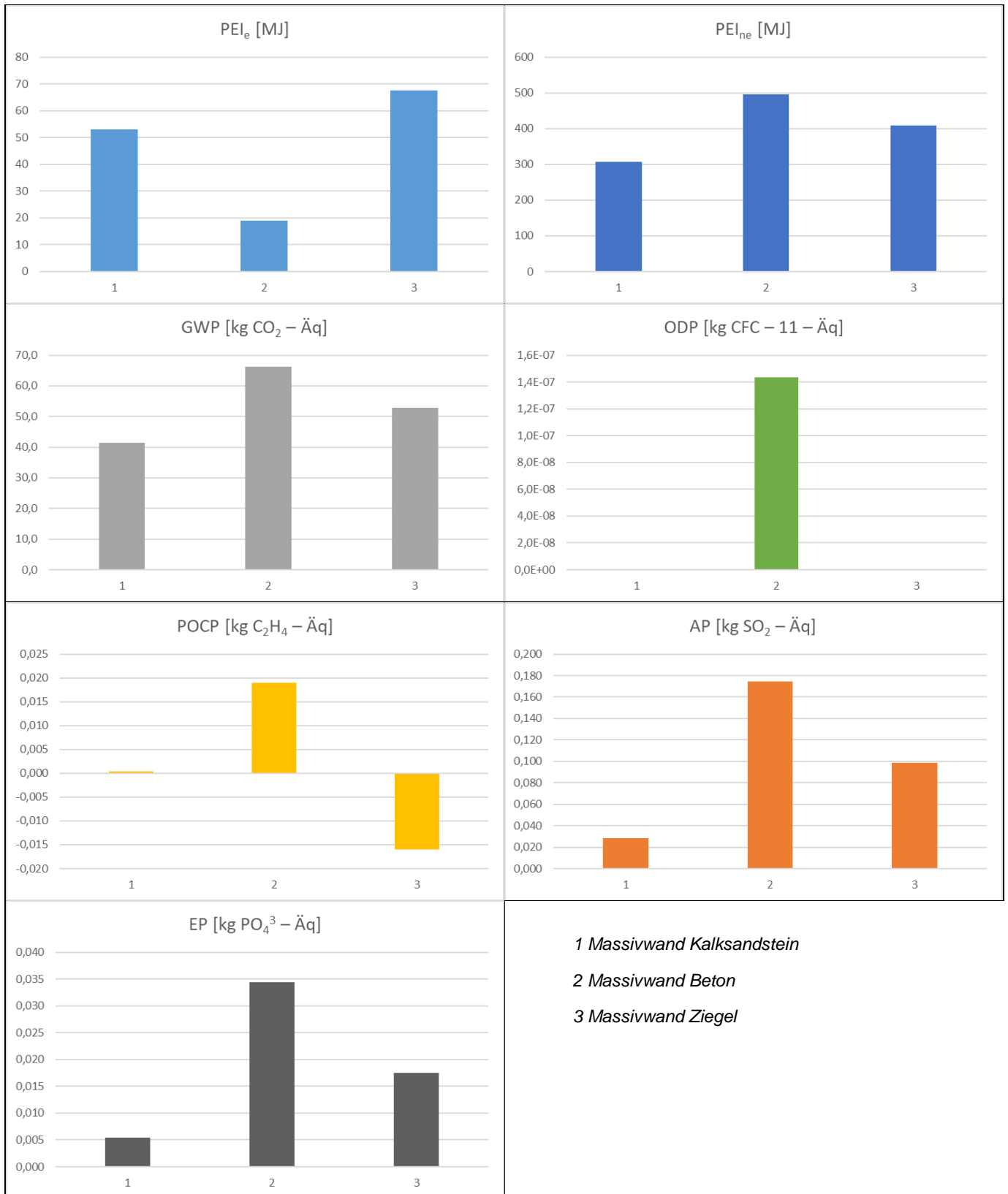


Abbildung 20: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Innenwänden

### 3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Bilanzergebnisse zeigen, dass es keine eindeutig bessere Bauweise gibt. Die Wahl des Konstruktionsmaterials hat natürlich Einfluss auf die Ökobilanz des Bauteils, wesentlicheren Einfluss hat dennoch die Wahl des Dämmstoffes und die Art der Konstruktion im Allgemeinen. Gerade bei dem Vergleich von Rohbauteilen und fertig ausgeführten Komponenten ist schnell festzustellen, dass die Wahl der Wärmedämmung einen großen Anteil an den Umweltwirkungen hat.

Im Hinblick auf Konstruktionsmaterialien beinhaltet Holz das größte Potenzial bei erneuerbarem Primärenergiebedarf im Vergleich zu allen anderen Arten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dem Rohstoff Holz die Sonnenenergie als erneuerbare Primärenergie zugeschrieben wird, während für die Herstellung der restlichen Baustoffe zum Großteil Energie aus fossilen Quellen benutzt werden muss. Die untersuchten Holzbaustoffe unterscheiden sich durch ihre Herstellungsart, die verbliebene Restfeuchte im Holz und ihre Rohdichte. Je geringer die Restfeuchte ist, desto höher ist die Rohdichte der Produkte. Ausschlaggebend für die Optimierung der Holzprodukte ist die Art der Verbindung der Einzelteile und das Maß des Einsatzes der Bindemittel. Bei der Herstellung von Holzwerkstoffen werden z.B. duroplastische Bindemittel verwendet, die der Grund für die tendenziell höheren Umweltwirkungen sind. Bei Vollhölzern hingegen werden die Kanthölzer kraftschlüssig miteinander verkeilt und es werden wenig Bindemittel im Endprodukt benötigt, was sich auf die Umweltwirkungen des Baustoffes positiv auswirkt. Zudem hat Holz aufgrund des hohen Recyclingpotenzials den geringsten Anteil an nicht erneuerbarem Primärenergiebedarf, wohingegen den höchsten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf mineralische Baustoffe verursachen.

Beton entwickelt mit steigender Druckfestigkeitsklasse auch dementsprechend mehr Umweltwirkungen. Ein steigender Anteil des Zements im Beton bewirkt eine höhere Druckfestigkeit und somit auch insgesamt mehr Umweltwirkungen des Baustoffes. Um Betonprodukte im Bezug auf ihre Umweltwirkungen zu optimieren, bietet sich demnach eine Reduktion des Zementanteils an, wenn trotzdem die Druckfestigkeit beibehalten oder verbessert werden kann. Dagegen hängen die Umweltwirkungen bei Ziegelformaten von der Art der Füllung ab. Ungefüllte Ziegel verursachen prinzipiell weniger Umweltwirkungen als beispielsweise perlitgefüllte, da durch den Zusatz des Dämmstoffeinschlusses im Ziegel die Umweltwirkungen des Ziegelproduktes erhöht werden. Je nach Bauteilaufbau lohnt es sich jedoch dies in Kauf zu nehmen, da dadurch eine eventuelle Dämmschicht weggelassen werden kann und damit die Gesamtauswirkungen auf die Umwelt reduziert werden können.

Stahl und Glas haben im Gegensatz zu den anderen üblichen Baumaterialien sehr viel höhere Umweltwirkungen in allen Kategorien, v.a. in Bezug auf den Primärenergieinhalt und auf das Treibhauspotenzial. Je nachdem in welchem Ausmaß der Verbau dieser Materialien stattfindet, sollte auf diese Tatsache Rücksicht genommen werden. Bei Stahlprodukten hängen die Umweltwirkungen stark von dem Legierungsanteil und dem Kohlenstoffgehalt ab. Un- bzw. niedriglegierte Stähle sind im Bezug auf die Umweltwirkungen dabei zu bevorzugen. Die Umweltwirkungen der Glasprodukte hingegen sind durch die Art des Verbaus und durch die Materialdicke zu beeinflussen.

Bei dem Vergleich der Bauteilvarianten ist schon im Rohbau zu sehen, dass Beton- und Ziegelaufbauten analog zur Baustoffanalyse einen wesentlich geringeren Primärenergieinhalt aufweisen als Holzbauteile. Das liegt hauptsächlich an den Werten für den erneuerbaren

Primärenergiebedarf, der v.a. bei Betonteilen sehr gering und bei Holzbauteilen wie einer Massivholzdecke oder Holztafelwänden vergleichsweise hoch ausfällt.

Während Betonaufbauten in der Kategorie für das Treibhauspotenzial und das Ozonabbaupotenzial mit die höchsten Werte besitzen, verursachen mineralische Bauweisen die wenigsten Umweltwirkungen in den Kategorien für das Photochemische Ozonbildungspotenzial, das Versauerungspotenzial sowie das Eutrophierungspotenzial. Mischbauweisen können dagegen bei richtiger Dimensionierung sowohl den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf reduzieren, als auch die Umweltwirkungen wie das Versauerungspotenzial und das Eutrophierungspotenzial möglichst geringhalten.

Diese Ergebnisse bestätigen sich tendenziell auch bei dem Vergleich der kompletten Bauteilaufbauten. Stahlbetonwände und Geschossdecken besitzen prinzipiell geringeren erneuerbaren Primärenergiebedarf, jedoch höhere Umweltwirkungen in den restlichen Kategorien. Während monolithische Bauteilvarianten mehr Umweltwirkungen verursachen als gedämmte Versionen der mineralischen Bauteile, kommt es bei Holzbauteilen auf die Art der Dämmung und die Dicke des Rohstoffes an.

Ausgehend von diesen Ergebnissen kann festgehalten werden, dass die Baustoffwahl in Abhängigkeit von den gegebenen äußeren Umständen und den Zielen des Bauprojektes zu treffen ist und es keinen universell einsetzbaren Baustoff gibt. Je nach Bedürfnissen, Zeitpunkt, Standort und Energiekonzept sind einige Baustoffe und Bauteile vorteilhafter als andere. Hinsichtlich der Energiestandards von Neubauten bedeutet dies, eine gewisse Gesamtenergieeffizienz zu erreichen und abhängig von den Gegebenheiten eine optimale Baustoff- und Konstruktionswahl zu treffen.

### 3.5 Optimierungspotenzial der Materialwahl

Um das Optimierungspotenzial der Materialwahl zu veranschaulichen, werden die Umweltwirkungen eines Bauteils berechnet und die einzelnen Funktionsschichten sukzessiv ausgetauscht. Ausgehend von den bisherigen Berechnungen wird eine Außenwand (U-Wert 0,20 W/m<sup>2</sup>K) als Beispiel gewählt und exemplarisch demonstriert, was für Unterschiede sich bei gleichbleibendem U-Wert durch den Austausch bestimmter Funktionsschichten eines Bauteils ergeben:

Als Ausgangsbau teil wird hier eine Holztafelwand mit einer Zellulosedämmung und einer Gipskartonplatte unter dem Normalputz verwendet. Tauscht man die Zellulosedämmung bei gleichbleibender Dämmstärke mit einer Mineralwoll dämmung aus (Abbildung 21), ergeben sich v.a. Unterschiede im Primärenergieinhalt des Bauteils. Der erneuerbare Primärenergiebedarf sinkt, wohingegen der nicht erneuerbare Primärenergieinhalt deutlich steigt. Außerdem erhöhen sich die Umweltwirkungen in den restlichen Kategorien durch den Austausch der Art der Dämmung (siehe Tabelle 33).

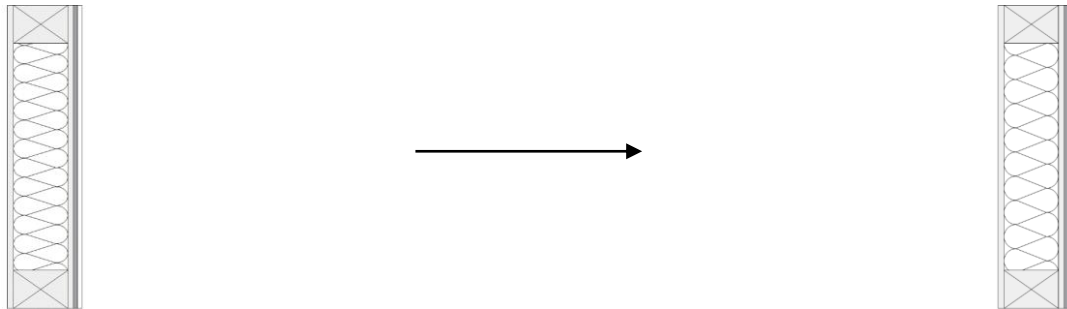


Abbildung 21: Holztafelwand mit Zellulose (links), Holztafelwand mit Mineralwolle (rechts)

		PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
<b>1</b>	<b>Holztafelwand mit Zellulosedämmung</b>	1212	-20	-58,2	-5,7E-06	0,018	0,050	0,013
	<i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 18cm, Zellulose 18cm, Holzfaserdämmplatte 2cm, Gipskartonplatte 1,25cm, Normalputz</i>							
<b>2</b>	<b>Holztafelwand mit Mineralwoll dämmung</b>	893	426	12,1	-4,4E-06	0,031	0,279	0,046
	<i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 18cm, Mineralwolle 18cm, Holzfaserdämmplatte 1,9cm, Gipskartonplatte 1,25cm, Normalputz</i>							

Tabelle 33: Optimierungspotenzial einer Außenwand beim Austausch der Dämmung



Durch den Austausch der primären Tragkonstruktion, genauer gesagt durch die Verwendung von Hochlochziegeln anstatt eines Holztafelwandaufbaus (Abbildung 22) sinkt der Anteil an erneuerbarem Primärenergiebedarf noch deutlicher und der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf steigt. Insbesondere steigen - bis auf das Photochemische Ozonbildungspotenzial - die Werte in allen weiteren Kategorien der bilanzierten Umweltwirkungen (siehe Tabelle 34).

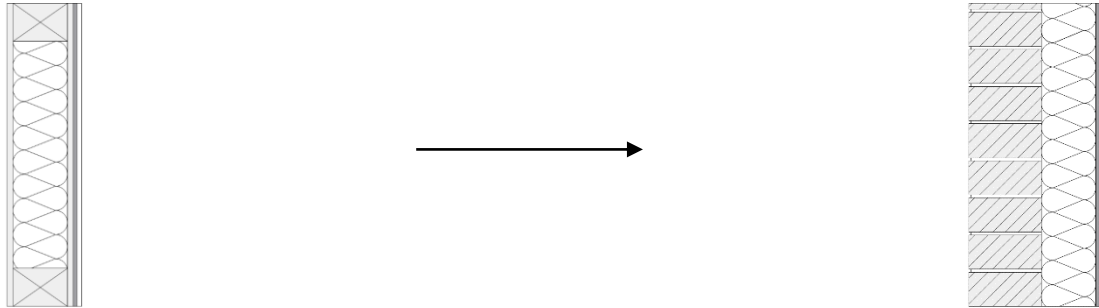


Abbildung 22: Holztafelwand mit Mineralwolle (links), Hochlochziegelwand mit Mineralwolle (rechts)

		PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
<b>2</b>	<b>Holztafelwand mit Mineralwolldämmung</b>	893	426	12,1	-4,4E-06	0,031	0,279	0,046
	<i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 18cm, Mineralwolle 18cm, Holzfaserdämmplatte 1,9cm, Gipskartonplatte 1,25cm, Normalputz</i>							
<b>3</b>	<b>Hochlochziegelwand mit Mineralwolldämmung</b>	151	1037	98,3	1,6E-06	0,003	0,436	0,068
	<i>Hochlochziegel 24cm, Dünnbettmörtel, Mineralwolle 18cm, Gipskartonplatte 1,25cm, Normalputz</i>							

Tabelle 34: Optimierungspotenzial einer Außenwand beim Austausch des Tragsystems

Der Vergleich einer weiteren Maßnahme ergibt, dass durch das Ersetzen der Gipskartonplatte unter dem Normalputz durch eine Hinterlüftung mittels Vormauerziegeln und Ankerschienen (Abbildung 23) nur minimale Unterschiede der gesamten Umweltwirkungen entstehen. Der erneuerbare Primärenergieeinheit steigt kaum merklich, genauso wie das Photochemische Ozonbildungspotenzial. Der Anteil an nicht erneuerbarem Primärenergieeinheit und die Werte in den restlichen Kategorien steigen ebenfalls geringfügig (siehe Tabelle 35).

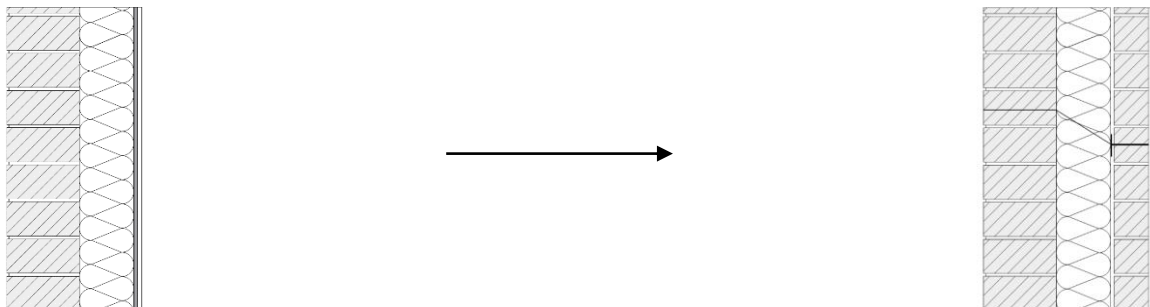


Abbildung 23: Hochlochziegelwand mit Mineralwolle (links), Hochlochziegelwand mit Mineralwolle und Hinterlüftung (rechts)

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
<b>3 Hochlochziegelwand mit Mineralwolldämmung</b>	151,63	1037	98,3	1,6E-06	0,0027	0,436	0,068
<i>Hochlochziegel 24cm, Dünnbettmörtel, Mineralwolle 18cm, Gipskartonplatte 1,25cm, Normalputz</i>							
<b>4 Hochlochziegelwand mit Mineralwolldämmung und Hinterlüftung</b>	151,83	1043	98,9	1,6E-06	0,0028	0,438	0,068
<i>Hochlochziegel 24cm, Dünnbettmörtel, Mineralwolle 18cm, Vormauerziegel 11,5cm, Ankerschienen, Normalputz</i>							

Tabelle 35: Optimierungspotenzial einer Außenwand beim Austausch des sekundären Wandaufbaus

Aus dem direkten Vergleich (Abbildung 24, Abbildung 25) ergibt sich, dass man in diesem Fall durch den Austausch der Dämmung eine Änderung der Umweltwirkungen um ca. 25 % und durch den Wechsel des Tragsystems eine Änderung der Umweltwirkungen um ca. 60% erzielen kann. Bei dieser Bilanzierung sind bei dem Austausch des sekundären Wandaufbaus kaum merkliche Unterschiede feststellbar (siehe Tabelle 36).

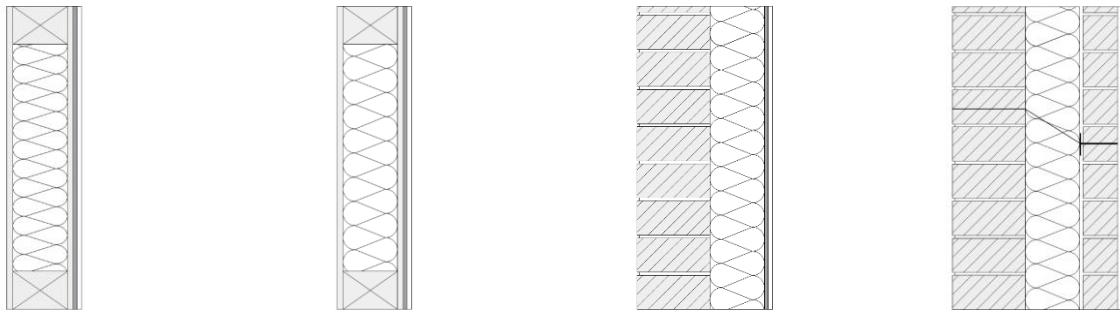


Abbildung 24: Holztafelwand mit Zellulose, Holztafelwand mit Mineralwolle, Hochlochziegelwand mit Mineralwolle, Hochlochziegelwand mit Mineralwolle und Hinterlüftung (von links nach rechts)

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
<b>1 Holztafelwand mit Zellulosedämmung</b>	1212	-20	-58,2	-5,7E-06	0,018	0,050	0,013
<i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 18cm, Zellulose 18cm, Holzfaserdämmplatte 2cm, Gipskartonplatte 1,25cm, Normalputz</i>							
<b>2 Holztafelwand mit Mineralwolldämmung</b>	893	426	12,1	-4,4E-06	0,031	0,279	0,046
<i>OSB-Platte 1,9cm, Holzbalken 18cm, Mineralwolle 18cm, Holzfaserdämmplatte 1,9cm, Gipskartonplatte 1,25cm, Normalputz</i>							
<b>3 Hochlochziegelwand mit Mineralwolldämmung</b>	151	1037	98,3	1,6E-06	0,003	0,436	0,068
<i>Hochlochziegel 24cm, Dünnbettmörtel, Mineralwolle 18cm, Gipskartonplatte 1,25cm, Normalputz</i>							
<b>4 Hochlochziegelwand mit Mineralwolldämmung und Hinterlüftung</b>	151	1043	98,9	1,6E-06	0,003	0,438	0,068
<i>Hochlochziegel 24cm, Dünnbettmörtel, Mineralwolle 18cm, Vormauerziegel 11,5cm, Ankerschienen, Normalputz</i>							

Tabelle 36: Optimierungspotenzial in der Materialwahl am Beispiel von Außenwänden

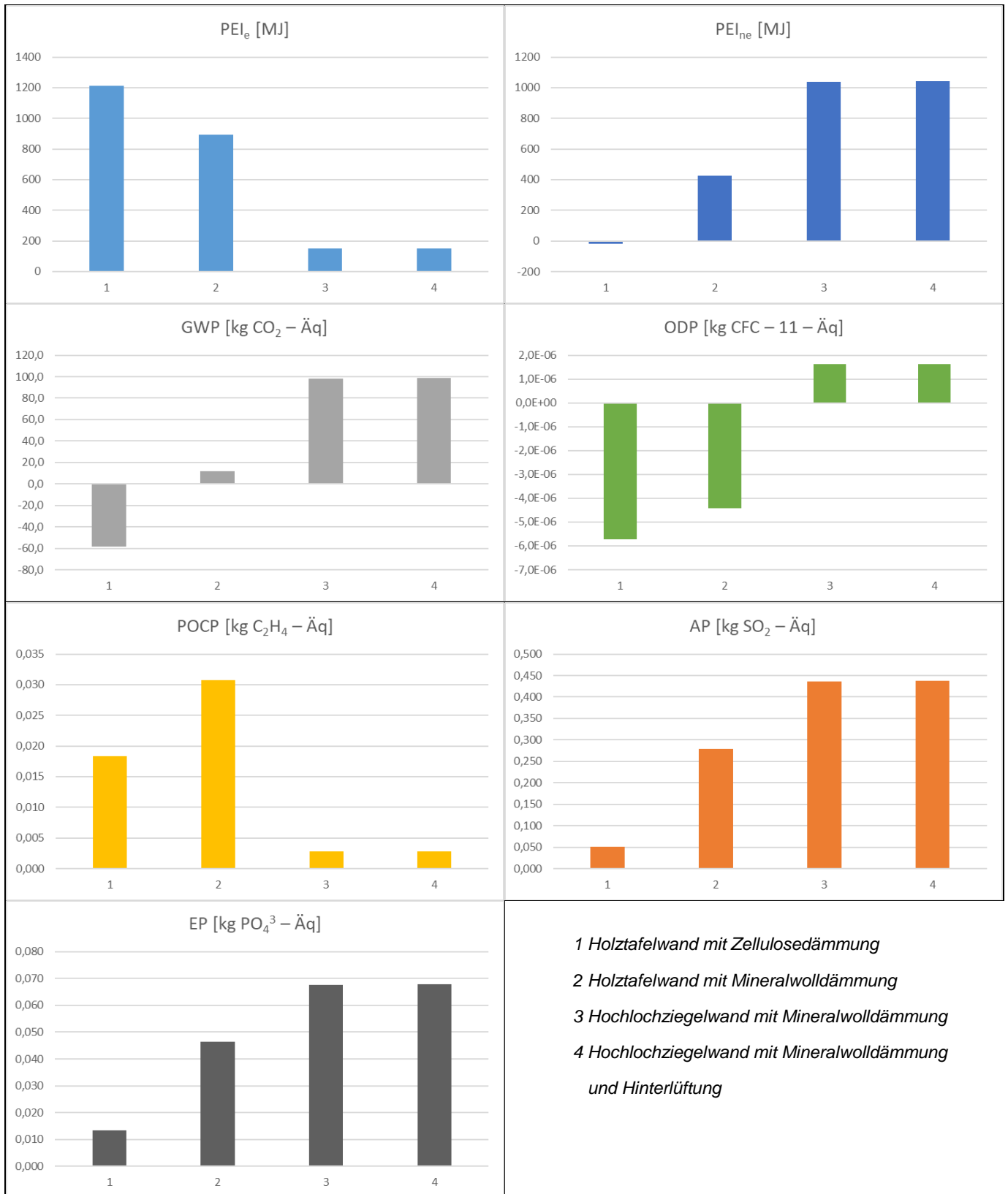


Abbildung 25: Optimierungspotenzial in der Materialwahl am Beispiel von Außenwänden (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP)

## 4 Optimierung der Materialverwendung im Bauprozess

Sowohl Nachhaltigkeit als auch ökologisches Denken ist als Prozess zu verstehen. Um einen Überblick der Optimierungsmaßnahmen in diesem Prozess zu geben, werden im Folgenden einzelne Planungsstrategien und Abläufe den allgemein gültigen Planungsphasen zugeordnet:

- Grundlagenermittlung/ Vorstudie
- Wettbewerb/ Vorplanung
- Entwurfsplanung/ Genehmigungsplanung
- Ausschreibung und Vergabe/ Ausführungsplanung
- Ausführung/ Fertigstellung
- Übergabe/ Betrieb

Aus der Analyse der Planungsphasen ergibt sich, dass eine Verschiebung der Planungsleistungen in frühere Planungsphasen notwendig ist, einerseits wegen detaillierterer Grundlagenermittlungen und andererseits aufgrund des meist höheren Detaillierungsgrades bei Vorstudien zu Bauaufträgen und Wettbewerben. Außerdem müssen oftmals Rahmenbedingungen sowie Risiken früher ermittelt und der Datenaustausch untereinander verstärkt werden. Spezialisten und Fachplaner, wie Energie- und Umweltbüros, werden frühzeitiger eingesetzt, da höhere Vorfertigungsgrade unweigerlich einen erhöhten Koordinationsaufwand und genau definierte Schnittstellen zwischen den Planern erfordern. In naher Zukunft wird der größere Aufwand in früheren Planungsphasen wohl zu Änderungen der Verträge führen, ansonsten wäre eine gesonderte Vergütung einzelner Leistungen notwendig. [1]

Desweiteren werden in diesem Kapitel Empfehlungen zur Optimierung sowohl im Materiallebenszyklus als auch im kompletten Gebäudelebenszyklus behandelt. Im Materiallebenszyklus wird hauptsächlich darauf geachtet, dass ressourcen- und umweltschonende Baustoffe eingesetzt werden, wohingegen der Fokus im Gebäudelebenszyklus auf der Anpassung der vorhergesehenen Nutzung liegt. Dies bedeutet im Materiallebenszyklus: [1]

- Nutzung dauerhaft verfügbarer Ressourcen
- Nutzung von Baustoffen mit geringem Primärenergiebedarf
- Nutzung schadstofffreier und emissionsarmer Produkte
- Austausch von Primärrohstoffen durch Recyclingmaterial
- Konstruktionsoptimierung der genutzten Bauteile
- Vorbereitung der Wiederverwendung

Bei der Optimierung der Nutzung im Gebäudelebenszyklus sind folgende Prinzipien zu beachten: [1]

- Anpassung an beabsichtigte Nutzung
- Anpassung an Dauerhaftigkeit
- Integration von effizienzsteigernden Konstruktionsweisen
- Nutzung rückbaubarer Konstruktionen
- Integration zur möglichen Umnutzung

Die oben genannten Punkte werden zwar in den Kapiteln „4.2 Materiallebenszyklus“ und „4.3 Gebäudelebenszyklus“ noch detaillierter behandelt, zuerst werden Empfehlungen zu prinzipiellen Planungsstrategien und Planungsabläufen zur Optimierung der Materialverwendung im Bauprozess gegeben.

## 4.1 Planungsstrategien und Planungsabläufe

Übergeordnete Ansätze der nachhaltigen Zielsetzung wie Effizienz, Suffizienz und Konsistenz lassen sich auf prinzipielle Strategien zum nachhaltigen Bauen übertragen. Es bedarf lediglich einiger Vereinfachungen für die Praxis. Grundsätzlich gibt es viele verschiedene Ansätze mit unterschiedlichen Maßstabsebenen, z.B. bauteilbezogene Ansätze in einer festgelegten Maßstabsebene oder auch maßstabslose Ansätze, die in diversen Maßstäben für die Anwendung geeignet sind. Diese Diversität kann zu mehreren Kreislaufmodellen führen. [1]

Ein erster Ansatzpunkt kann die Effizienzsteigerung der Herstellung sowie die Wiederverwendung von Baustoffen sein. Diese zielen auf eine verbesserte Ökobilanz im Allgemeinen ab. Denn gerade die Rückbaubarkeit und Wiederverwendbarkeit von Baustoffen und Bauteilen kann maßgeblichen Einfluss auf die Beurteilung der Umweltwirkungen haben. Als weiteren Ansatz kann man die Reduzierung der Baumaßnahmen verstehen, durch den eine verdichtete Bauweise, hohe Kompaktheit, reduzierte Erdbewegungen und ein relativ hoher Anteil an Nutzfläche im Verhältnis zum gebauten Volumen ermöglicht werden kann. Allein mit diesem Prinzip kann der Primärenergieinhalt um mehr als 50% im Vergleich zu herkömmlich geplanten Gebäuden gesenkt werden. [1] Diese Strategie ist größtenteils unabhängig von verwendeten Baustoffen und hängt eher von der Nutzung des Gebäudes und der Optimierung während des Gebäudelebenszyklus ab. [1]

Wichtig bei der Entscheidung, welcher Ansatz weiterverfolgt werden soll, ist, Einseitigkeit bei der Betrachtungsweise der Optimierung zu vermeiden. Sowohl im Material- als auch im Gebäudelebenszyklus können sich bestimmte Ansätze ergänzen oder schwächen. Darum sollten die Auswirkungen der Entscheidung immer im jeweils anderen Betrachtungszyklus überprüft werden. [1]

Außerdem sind bei genauerer Betrachtung der einzelnen Phasen im Bauprozess folgende Fragen zu beantworten: [1]

- **Grundlegende Überlegungen**
  - Welche Einflussmöglichkeiten bestehen?
  - Welche Überlegungen sind zum Erreichen der Ziele notwendig?
  - Welche Ansätze und Ziele können verfolgt werden?
- **Themen und Maßnahmen**
  - Mit welchen Maßnahmen lässt sich die Einbindung der Themen Bauökologie und Baubiologie im Prozess sicherstellen?
- **Instrumente**
  - Mit welchen Hilfsmitteln können Entscheidungsgrundlagen ermittelt werden?
  - Wie lassen sich diese mit vertretbarem Aufwand in den Prozess integrieren?
  - Welche Synergien ergeben sich durch den Einsatz einzelner Instrumente?

#### 4.1.1 Grundlagenermittlung/ Vorstudie

In der ersten Phase des Bauprozesses sind vorgeschaltete Maßnahmen und Überlegungen, wie z.B. Bestandsaufnahme und Standortanalyse, mit inbegriffen. Zu Beginn der Planung müssen grundsätzliche Rahmenbedingungen und Anforderungen kritisch hinterfragt werden, selbst gültige Standards und Normen. Natürlich werden Auflagen und Vorgaben ermittelt und eingehalten, doch erst eine detaillierte Prüfung und ein Infragestellen dieser baurechtlichen Vorlagen führen zu einem optimierten Ergebnis. Eines der Kernthemen der Grundlagenermittlung stellt die Evaluierung und Bewertung des Bestandes dar. Es werden Risiken und Potentiale geprüft, mögliche Altlasten z.B. im Boden oder im Grundwasser festgestellt und Berechnungen angestellt, ob die Erhaltung des Bestandes aufgrund des höheren PEI und GWP der Primärkonstruktion nicht dem Abriss und Neubau vorzuziehen ist. Weiterhin werden in der Anfangsphase langfristige Nutzungsanforderungen für den Betreiber sowie für die Nutzer geklärt, z.B. anhand einer Check-Liste, auf die sich später berufen werden kann. Hilfreich ist es dabei, Anforderungen zu klären und detaillierte Planungsziele in einem Pflichtenheft festzuhalten, um die Wünsche und Vorstellungen schon zu Beginn zu präzisieren. Im Rahmen der Untersuchung des Außenraums und der Maßstäblichkeit sollte auch im städtebaulichen Kontext auf Altlasten geachtet werden sowie eine hohe Nutzungsdichte mit einer möglichst optimalen Flächeneffizienz angestrebt werden. [1]

### 4.1.2 Wettbewerb/ Vorplanung

Der nächste Schritt nach den Vorstudien ist die Erarbeitung grundlegender Konzepte und die Festlegung einer Strategie. Dafür ist eine genaue Untersuchung der Nutzung des Gebäudetyps und des damit verbundenen Kontexts notwendig. Bauökologische und baubiologische Parameter sollten frühzeitig ermittelt und einer bestimmten Prioritätsstufe je nach Strategie zugewiesen werden. Dabei lassen sich oft Wechselwirkungen oder Widersprüche erkennen, bei denen ein gewisses Gleichgewicht zu suchen ist. Hilfreich bei einem solchen Entscheidungsprozess sind Varianten- und Bauteilvergleiche mithilfe von bereits vorgestellten Bewertungstools, Bauteilanalysen und Best-Case/ Worst-Case Szenarien. Abhängig vom Standort und der Nutzung, ergeben sich oft große Unterschiede der Umweltwirkungen durch die verwendete Tragstruktur, die Gebäudehülle oder den Umgang mit einer schwierigen Topografie. Wichtig ist außerdem ein intelligentes Haustechnikkonzept, das sich durch gute Leitungsführung, Position und Ausbildung der Versorgungsschächte, innovativen Umgang mit Regen- und Grauwasser, Zunutzemachen der Gebäudehülle bzw. Umgebungswärme und eine Wartungs- und Austauschfreundlichkeit auszeichnet. Ergänzt werden kann die Planung durch die Erstellung eines Mobilitätskonzeptes, das öffentliche Verkehrsmittel – wenn möglich – begünstigt, wodurch mobilitätsbedingte Umweltwirkungen stark reduziert werden können. [1]

### 4.1.3 Entwurfsplanung/ Genehmigungsplanung

In der dritten Phase werden hauptsächlich vorherige Annahmen überprüft, konkretisiert und Bauteilvergleiche und Ökobilanzen erstellt. Baustoffe aus der Vorplanung werden festgelegt, Schnittstellen der verschiedenen Gewerke werden ausgelotet, Umweltwirkungen und Kostenvergleiche der Baustoffe werden angestellt und Variantstudien zu exemplarischen Bauteilaufbauten werden durchgeführt. Dabei werden baubiologische und bauökologische Anschlusskriterien anhand von Zertifikaten und Labels definiert und optimalerweise Anforderungsprofile dafür erstellt. Außerdem wird die Konformität der Planung mit baurechtlichen und ökonomischen Anforderungen geprüft, Sonderkonstruktionen gegebenenfalls mit Spezialisten und Ämtern abgeklärt. Hierbei empfiehlt sich bereits ein hoher Detaillierungsgrad der Planung, um frühzeitige Auswirkungen abzuschätzen. Desweiteren können aufgrund entsprechender Informationen bereits (vereinfachte) Ökobilanzen durchgeführt werden, die eine quantitative Ermittlung der Umweltwirkungen sowie eine Risikoabschätzung zulassen. Daraus lassen sich mögliche Schlüsselbauteile genauer ableiten und optimieren. Wie bereits erwähnt, gibt es keine beste Allgemeinvariante, sondern nur die optimalste für das spezifische Projekt. Doch die gilt es, herauszufinden. [1]

#### 4.1.4 Ausschreibung und Vergabe/ Ausführungsplanung

In der vierten Phase werden die Durcharbeitung der genehmigten Planung, die Mengenermittlung und die Ausschreibung der Leistung als Grundlage für die Vergabe durchgeführt. Die Konstruktion in Detailplanung wird weiterentwickelt und die Produktwahl weiter spezifiziert, wodurch Fragestellungen wie Ort der Produktion und Produktionsbedingungen geklärt werden müssen, v.a. auch im Hinblick auf die ökologische Belastung, die durch Herstellung und Transport entsteht. Es sollte Ziel sein, eine angemessene Lebensdauer der Bauteile zu erreichen und den Rückbau bzw. Ersatz der Baustoffe zu verbessern. Deshalb ist die Auswahl der Baustoffe im Hinblick auf Detailausbildung und Fügung äußerst wichtig. Eine gute Zugänglichkeit und wieder lösbare Verbindungen tragen dazu bei, einen einfachen Austausch der Bauteile zu gewährleisten und somit Umweltwirkungen zu reduzieren. Genau bei diesem Schritt wirkt der Planer als Mitgestalter der Industrie, da durch gezielte Auswahl Forderungen an die Entwicklung der Baustoffindustrie gestellt werden können. Um sicherzustellen, dass die Vorgaben der Planung tatsächlich umgesetzt werden, sollten Nachhaltigkeitsaspekte in die Ausschreibung und Vergabe integriert und spezielle Anforderung an Produkte und Dienstleister gestellt werden. Bei der späteren Auswahl z.B. einer funktionellen Ausschreibung sollte nicht das günstigste, sondern eher das wirtschaftlichste Angebot mehr Anklang finden. Eine weitere Möglichkeit wäre die Einbindung technischer Vertragsbedingungen (ZTV) in den Vortext der Ausschreibung, um die ökologische Qualität einer Dienstleistung zu definieren. [1]

#### 4.1.5 Ausführung/ Fertigstellung

Neben der Reduktion von Abfall, Lärm und Staub bedarf der Bodenschutz und die Minimierung von Ressourcenverbrauch und Schadstoffemissionen besonderer Aufmerksamkeit. Der Baustellenbetrieb kann durch stetige Messungen und Kontrollen der tatsächlichen Zustände durch die Bauleitung optimiert und die Qualität des Projekts dadurch gesichert werden. Ein großer Termin- und Kostendruck steht oftmals dieser Qualitätssicherung, z.B. einem Blower-Door-Test, gegenüber, lässt sich aber durch vorausschauende Planung in den vorherigen Phasen weitestgehend beheben. Für den späteren Gebäudebetrieb ist außerdem eine umfassende Dokumentation der Produkte, wie Sicherheits- und Produktdatenblätter, äußerst hilfreich. Wichtig für die Optimierung des Bauablaufs ist zudem die Integration von ökologischen Anforderungen für die Baustellenlogistik und die Baustellenabwicklung. Das betrifft einerseits die Beschränkung der Transportwege von Baustoffen und von Aushubmaterial auf eine gewisse Distanz und den Einsatz von Fahrzeugen mit höchster Schadstoffklasse. Andererseits sollte bei der Trocknung des Rohbaus auf einer natürlichen Austrocknung und Belüftung von mindestens 30 Tagen im Gegensatz zur künstlichen Beheizung bestanden werden, was abgesehen von dem geringeren Energiebedarf des Projekts auch Vorteile für Schadstoffmessungen der Innenraumluft bietet. [1]



### 4.1.6 Übergabe/ Betrieb

In der letzten Phase sollte – wenn möglich – eine lückenlose Informationsweitergabe stattfinden. Als Nachbereitung des Bauvorhabens sollten Revisionspläne und Berechnungen an den tatsächlichen Stand angepasst und ein Zusammenhang zwischen Lebenszykluskosten und Umweltwirkungen hergestellt werden. Es wird kein direkter, kausaler Zusammenhang entstehen, dennoch lassen sich oftmals gewisse Wechselwirkungen erkennen. Deshalb empfiehlt es sich, regelmäßige Kontrollen und Maßnahmen zur Instandhaltung durchzuführen. Damit Voraussetzungen für eine optimale Bewirtschaftung geschaffen werden können, ist es außerdem von Vorteil, ein Nutzerhandbuch zum sachgerechten Umgang mit dem Projekt anzufertigen. Darin sollten Informationen bezüglich Wartung, Inspektion, Betrieb und Pflege für Nutzer und Firmen enthalten sein. [1]

## 4.2 Materiallebenszyklus

Erste Hinweise auf die Optimierung des Materiallebenszyklus lassen sich z.B. im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), in der europäischen Abfallrichtlinie (2008/98/EG), in der Richtlinie VDI 2243 „Recyclinggerechte Produktentwicklung“ oder in der im Juni 2013 in Kraft getretenen Novelle der Bauproduktrichtlinie finden. Für die Verwendung von Materialien im Bauprozess ist bereits seit 2002 die Ressourceneffizienz in der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie mit dem Ziel formuliert, die Rohstoffproduktivität gemessen am BIP bis 2020 im Vergleich zu 1994 zu verdoppeln. [58]

Prinzipiell ist eine Optimierung im gesamten Lebenszyklus möglich, also von der Erschließung über die Produktion und die Nutzung bis hin zur Nachnutzung. Um angegebene Daten genauer zuordnen zu können, werden daher häufig die Begriffe „Cradle to Gate“ (Von der Wiege zum Werkstor) oder „Cradle to Cradle“ (Von der Wiege zur Wiege“) verwendet. Ersteres ist gebräuchlicher, selbst bei **Typ III Umweltdeklarationen**. Dennoch gilt es bei der Angabe der Umweltdaten von Produkten immer auch auf die Zuordnung der Bauphasen zu achten. Es lassen sich jeweils sehr unterschiedliche Aspekte in diesen Phasen perfektionieren, dennoch gibt es einfache Grundätze zur Verbesserung innerhalb des Materialkreislaufs: [1]

- Effizienz in der Herstellung
- Ressourcenschonende Alternativen
- Modularisierung und Systembau
- Gesundheitliche Unbedenklichkeit
- Rückführung der Baustoffe in den Kreislauf

### 4.2.1 Effizienz in der Herstellung

Im Prozess der Produktherstellung entstehen bei der Rohstoffgewinnung und bei der eigentlichen Produktion die größten Umweltwirkungen. Obwohl man als Planer nur sehr wenig Auswirkungen auf die Rohstoffgewinnung hat, können Produkte anhand von EPDs und Sicherheitsdatenblättern zumindest überprüft und verglichen werden. Wesentlicheren Einfluss hat die Substitution von Baumaterial, z.B. die bewusste Auswahl von nachwachsenden Rohstoffen anstelle von abiotischem Material. Dadurch können Planer die Nutzung von Sekundärrohstoffen fördern und somit die Umweltwirkungen ihrer Projekte reduzieren. Ein gutes Beispiel ist der Ersatz von mineralischen Baustoffen durch Holz etwa bei Estrichen wie Steinholz- und Hartsteinholzestrich. Oder die Verwendung von Altmetall anstatt der Neuproduktion von Stahl. Das weltweite Verhältnis von Primärstahl zu Sekundärstahl beträgt heutzutage nur noch ca. 55% zu 45%, was sich auf den wesentlich geringeren Energiebedarf aus Recyclingmaterial und die um einiges geringeren CO<sub>2</sub> – Emissionen durch die Nutzung von Recyclingstahl zurückführen lässt. Eine weitere Maßnahme wäre eine Verkürzung der Transportwege, indem lokale Produkte und z.B. nähere Schuttabbaugebiete bevorzugt werden. [1]

### 4.2.2 Ressourcenschonende Alternativen

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Umweltwirkungen ist die Wahl von ressourcenschonenden Baustoffalternativen. Es lohnt sich oftmals aufgrund der großen Anzahl an Alternativen, schon früh im Planungsprozess Schwerpunkte zu setzen, z.B. durch die Erhöhung des Anteils an nachwachsenden Rohstoffen, durch die Optimierung der Tragkonstruktion bzw. konstruktiver Bauteile oder durch die Fokussierung auf optimierte Produkte. Wie man bei dem Baustoff- und Bauteilvergleich in Kapitel „3 Vom Baustoff zum Bauteil“ erkennen kann, beeinflusst nicht ausschließlich die Wahl des Baustoffes des Tragsystems die gesamten Umweltwirkungen des Gebäudes. Lediglich der Anteil an erneuerbarer Energie bei der Verwendung von Holzkonstruktionen unterscheidet sich sehr von anderen Systemen. Üblicherweise kann durch die Verwendung von Holz eine Reduktion der Umweltwirkungen von ca. 10-15% erreicht werden, im Wohnbau je nach Geschosshöhe sogar etwas mehr. [1] Gegenüber Stahlkonstruktionen lassen sich bei Holzaufbauten eine Verringerung des Treibhauspotenzials um bis zu 40% feststellen. [59] Doch auch bei der Verwendung von Holz gilt es, die Art der Nachnutzung zu beachten. Bei wiederholter Benutzung in der Ökobilanz verliert der Rohstoff Holz bei Effizienzsteigerung in der Energiebereitstellung aufgrund der Substitution fossiler Brennstoffe (thermisches Verfahren) an Wert. Langfristig bleiben hier nur die Umweltwirkungen bei der Recycling-Variante niedrig. [60]

Besonderes Augenmerk sollte außerdem auf der Optimierung von Tragkonstruktion sowie baukonstruktiver Bauteile liegen. Je komplexer die Anforderungen des Projektes sind, desto weniger Unterschiede zeigen sich zwischen massiven und leichten Bauweisen. Daher ist eine pauschale Bewertung nicht möglich, aber eine konstruktive Effizienz im Zusammenspiel zwischen Materialqualität und Nutzen kann angestrebt werden. Optimierungspotenziale für eine konstruktive Höhe bietet allein die Auswahl des geeigneten Tragsystems. Bei einachsiger Versteifung funktionaler Bauschichten eignet sich z.B. eine zur Serienfertigung ausgelegte Profilierung der Flächen. Bei ein- bzw. zweiachsiger Versteifung in flächigen Bauteilen eignen sich v.a. Steg- und Rippenkonstruktionen, die den Vorteil von hoher Gewichtseinsparung und genauer Abstimmung auf Einzelfälle miteinander

vereinen. Dazu ähnlich verhalten sich Sandwichkonstruktionen tragender Flächen, die bevorzugt bei mineralischen Baustoffen, Holz und Metallen eingesetzt werden. Allein durch die Verdopplung der Abstände der lastabtragenden Flächen, kann die Tragfähigkeit auf das 3,5-fache ansteigen, die Steifigkeit sogar auf das 7-fache. [61] Wenn die Aufbauhöhe der funktionalen Schicht von der konstruktiven Höhe des Tragelements getrennt werden kann, eignen sich hingegen Stabtragwerke, um Zug- und Drucklasten abzufangen. Bei der Umsetzung von Überdachungen werden oft dreidimensional gebogene Flächen mit Membranen und Stahlseilen verwendet, die ihre Steifigkeit durch innere Zug- und Druckspannung erhalten. Aufgrund der diversen Lasten und Lastabtragungsmöglichkeiten sind zumeist Mischkonstruktionen im Gebäude vorteilhaft, v.a. bei horizontalen Bauteilen wie Deckenkonstruktionen. [1]

Grundätzliche Anforderungen, wie z.B. Traglast, Brandschutz oder U-Wert, sind bei Bauteilen selbstverständlich, die Verbesserungen sollten den Bauteilen jedoch nicht nachträglich sein. Problematisch wird es, wenn eine Weiterentwicklung eines Produktes zwar die mechanischen oder materialgebundenen Eigenschaften verbessert, z.B. Faserzusätze bei Kunststoffen, dadurch aber die Recyclingfähigkeit bzw. Trennung der Baustoffe beeinträchtigt. Hierbei müssten die verschiedenen Aspekte gegeneinander abgewogen werden. Neben der technischen Verbesserung der Produkte lassen sich oft Synergien zwischen Baustoffen dazu nutzen, sich innerhalb eines Bauteils zu unterstützen. Ein elastischer Boden kann beispielsweise dazu beitragen, die Schallwirkungen des Bodenaufbaus deutlich zu reduzieren, wodurch die Trittschalldämmung, die normalerweise wesentlich höhere Umweltwirkungen besitzt, wiederum auf geringere Schallminderung dimensioniert werden kann. Dadurch verringern sich die Auswirkungen der Trittschalldämmung und damit des gesamten Bodenaufbaus. [1]

### 4.2.3 Modularisierung und Systembau

Mithilfe von Bausystemen lassen sich aus der schnellen Errichtung, der Revisionsarbeiten, der Umnutzung und den Rückbauarbeiten Vorteile ziehen. Nicht nur im Stahlbau, auch im modularen Holzwohnbau steigt meist die Ressourceneffizienz der Konstruktion mit dem Grad der Vorfertigung. Schon im Werk gefertigte Bauteile begünstigen schlankere Bauteildimensionierungen, geringere Bautoleranzen und Mängel sowie eine höhere Bauwerksqualität durch einen hohen Detaillierungsgrad. Dadurch, dass verbaute Baustoffe genau erfasst werden, erleichtert der Systembau Instandhaltung, Rückbau und Recycling der Bauteile. Zu beachten ist allerdings, dass es hierbei immerzu einer Trennung der baulichen Einheiten wie z.B. Gebäudetechnik, Ausbau und Hülle bedarf. Vor allem im Holzbau geht damit aber auch die Verwendung von Konstruktionsvollhölzern, OSB-Platten und Spanplatten einher, die mittlerweile nur noch geringe CO<sub>2</sub> Speichermöglichkeiten besitzen und schlechtere Umweltbilanzen als andere Holzwerkstoffe zur Folge haben. [1]

#### 4.2.4 Gesundheitliche Unbedenklichkeit

Um möglichst wenig Schadstoffe in das Bauwerk einzubringen, sollte die Planung das Auftreten von Schadstoffquellen verhindern bzw. eine schnelle Abführung von möglichen Quellen gewährleisten. Dies kann z.B. mittels Zwangsbelüftung der Kellerräume oder diffusionsoffener Bauweisen und Reduktion von Wärmebrücken erreicht werden. Besonders sorgfältig sollte die Auswahl der Nutzoberflächen, Oberflächenbeläge, Beschichtungen, Grundierungen und Dichtmittel ausfallen. Um Problemstoffe zu reduzieren, kann ein erster Ansatz die Substitution von Hilfsstoffen sein, wie z.B. der Einsatz von Verspannungen anstatt von Klebern bei Teppichbelägen. Die Verwendung gesundheitlich unbedenklicher Hilfsstoffe wird erleichtert durch bereits erwähnte Bewertungshilfen sowie technische Produkt- und Sicherheitsblätter, z.B. die Liste der SVHCs der ECHA. Weiterhin bieten Zertifizierungen von Umweltlabels gewisse Transparenz, was den Einsatz von schädlichen Lösungsmitteln betrifft. Durch mechanische Lüftungsanlagen kann zudem die Schadstoffaufnahme der Nutzer vermindert werden. In der Planung bedeutet dies zumeist nur geringfügige Maßnahmen auf Baustoffebene und Kostenänderungen, wobei auf eine gute Dokumentation und Transparenz im Leistungsverzeichnis sowie Kontrollen vor Ort geachtet werden sollte. [1]

#### 4.2.5 Rückführung in den Materialkreislauf

Das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz begünstigt derzeit die thermische Verwertung für Holz und Kunststoffe entgegen der Abfallrahmenrichtlinie der EU, die eine Recycling- und Verwertungsquote von 70% in Europa fordert. Daher bietet es sich für die Qualität der Planung an, nicht ausschließlich auf die Qualität des Recyclings zu achten, sondern eine generelle Rückführung in den technischen Materialkreislauf zu ermöglichen, indem z.B. recyclinggerechte Konstruktionen verwendet und Bauabfälle sortenrein sortiert werden. Zurückgewonnene Baustoffe besitzen oftmals unterschiedliche Wertigkeit, die mit der technischen Wertigkeit des Rohstoffes korreliert. Deshalb ergeben sich mehrere Optionen für ein Wiederverwendungsverfahren: [1]

Die einfachste und umweltbezogenste Variante, um Ressourcen zu schonen, ist die direkte Wiederverwendung, durch die eine Kosteneinsparung von bis zu 40% ermöglicht werden kann. Problematisch ist hierbei aber die Ungenauigkeit der Kennwerte, wodurch gewisse Zwänge entstehen. [1]

Das werkstoffliche und rohstoffliche Recycling ist das Aufbereiten von Altbaustoffen, wodurch Rezyklate entstehen. Nach mehreren Zyklen müssen bei diesem Prozess wegen der Abwertung des Rohstoffes anteilig neue Rohstoffe beigemischt werden, um die ursprüngliche Qualität zu erhalten. [1]

Die ökologisch schlechteste Variante ist die thermische Verwertung der Baustoffe, bei der Rohstoffe verbrannt und eingeschmolzen werden, um das Abfallvolumen zu reduzieren und Energie zu gewinnen. Mittels genauer Dokumentation und Kennzeichnung der Produkte können die jeweils besten Optionen für Planer ausgewählt werden. Außerdem kann eine Unterstützung des Recyclingprozesses durch den Einsatz von möglichst reversiblen Verbindungen und sortenrein verwendbaren Baustoffen sowie der Reduktion der Baustoffvielfalt begünstigt werden. [1]

## 4.3 Gebäudelebenszyklus

Wesentlich verständlicheren Realitätsbezug für Planer hat die Optimierung des Gebäudelebenszyklus. Bei der Beurteilung der Gebäude haben sich mittlerweile unterschiedliche Konzepte entwickelt, um Stärken und Schwachpunkte einer Planung zu ermitteln: [1]

- **Cradle to Cradle**  
Betont den Kreislaufgedanken von der Rohstoffgewinnung bis zur Rückführung.
- **MIPS-Konzept**  
Betont ebenfalls den Kreislaufgedanken und misst den Material-Input pro Serviceeinheit.
- **Triple-Zero-Konzept**  
Legt den Fokus auf Null-Energie, Null-Emissionen und Null-Abfall, wobei Herstellung und Rückführung im Kreislauf ausgeblendet werden.
- **Konzept der 2000-Watt-Gesellschaft**  
Definiert zusätzlich einige Zielwerte für Mobilität und Gebäudebetrieb.

Eine der Hauptphasen im Gebäudelebenszyklus ist die Nutzungsphase, da die Planung der Gebäudekonstruktion den Energieaufwand für Betrieb und energetische Dienstleistungen während der Nutzungsphase bestmöglichst abfangen sollte. Genauso sollten Nutzungswechsel bei allen Bauwerken – ausgenommen des Wohnbaus – in Betracht gezogen werden. Aufgrund unterschiedlicher Nutzungen im Laufe des Gebäudelebenszyklus empfiehlt es sich, Bauwerke in verschiedene Nutzungstypen einzuteilen: [1]

- **Hoher Betriebsenergiebedarf und niedriger Nutzungswechsel**  
Hierbei sind Materialkonzepte zur Senkung der Betriebsenergie, Energieerschließungskonzepte und Konzepte zur Lenkung des Energieflusses besonders wichtig.
- **Niedriger Betriebsenergiebedarf und lange Lebensdauer**  
Hier sollte ein Materialeinsatz geplant werden, der auf die Umweltwirkungen der Bauteile und ihrer Dauerhaftigkeit abgestimmt ist.
- **Kurze Lebensdauer**  
Dabei kann ein Materialkonzept ohne größeren Fokus auf Dauerhaftigkeit der Baustoffe optimiert werden und eher auf die Reduktion der Umweltwirkungen gerade in der Herstellungsphase und der Rückgewinnung der Baustoffe ausgerichtet sein.
- **Hoher Betriebsenergiebedarf und hoher Nutzungswechsel**  
Bei dieser ökologisch schwierigsten Variante kann die Planung nur insofern optimiert werden, als dass der Aufwand für Nutzungswechsel möglichst gering gehalten wird.

Oftmals empfiehlt es sich also ein materialbezogenes Leitbild zu erstellen, auf dem die Planung des Projekts aufbaut und das auf unterschiedlichen Maßstabsebenen der Planung funktioniert. Dabei kann man Baustoffen verschiedene Wertigkeiten zuteilen und sie in gestalterisch wertvolle oder funktionale Aspekte unterscheiden. [1]

### 4.3.1 Materialfokussierung

Positiv ist eine geringe Anzahl an Konstruktionsmaterialien; sie führt zu wiederkehrenden Detaillösungen und somit zu einem geringeren planerischen Aufwand. Hinzu kommt häufig eine höhere Qualität der Umsetzung, weniger unterschiedliche Abfälle und dadurch erleichterte Rückgewinnung bzw. Entsorgung der Baustoffe. Besonders sinnvoll ist die Fokussierung auf wenige Materialien bei kleinteilig elementierten Baustoffen mit wiederkehrenden Fügeverfahren, z.B. Mauerwerksbau. [1]

### 4.3.2 Funktionsüberlagerung

Indem ein Bauteil mehrere Funktionen erfüllt, können weiterhin Umweltwirkungen reduziert werden. Die größten Potenziale bieten Fassaden und Nutzoberflächen. Wie in Kapitel „4.2.2 Ressourcenschonende Alternativen“ im Materiallebenszyklus bereits erläutert, ergeben sich einige Vorteile aus der Funktionsüberlagerung von Baustoffen und Bauteilen. Sobald Baustoffe zusätzlich zu ihrer ursprünglichen Funktion noch zur Reduktion der Betriebsenergie beitragen, lassen sich bereits messbare Erfolge feststellen. Eine genaue Überprüfung muss aber immer im Einzelfall durchgeführt werden, da zu viel Multifunktionalität im Bauteil starke Auswirkungen auf den damit verbundenen Aufwand haben kann. [1]

### 4.3.3 Reduzierter Betriebsaufwand

Aus finanzieller Sicht werden mitunter die höchsten Ansprüche an Sauberkeit, Hygiene und Werterhaltung erhoben. Auf Baustoffebene hat die Reinigungsfreundlichkeit eine ebenso große Bedeutung. Der Nachweis verbesserter Reinigungsprozesse wird daher oftmals in Nachhaltigkeitszertifikaten gefordert, was z.B. mithilfe glatterer und fugenfreier Oberflächen und pflegeleichteren Belägen erreicht werden kann. [1]

### 4.3.4 Reduzierter Instandhaltungsaufwand

Um den Instandhaltungsaufwand möglichst gering zu halten, hat es sich in der Praxis bewährt, Baustoffe nach Alterung, Dauerhaftigkeit und Lebensdauer zu gliedern. Da viele Faktoren für einen Austausch der Baustoffe verantwortlich sind, können Studien und Fallbeispiele bei dieser Unterteilung helfen, solange man die jeweiligen Nutzungszusammenhänge und Systemgrenzen der Studien beachtet.

### 4.3.5 Optimierung von Austauschprozessen

Im besten Fall sollte das Gefüge des Bauwerks, die hierarchische Gliederung aus Baustoffen, Schichten, Elementen und Bauteilen, ohne Beschädigung der anderen Teile austauschbar sein. Ebenfalls hilfreich bei diesem Ziel ist eine Unterteilung in mehrere Einheiten: [1]

- **Werkstoffeinheit**  
Nicht weiter separierbar oder zerstörbar
- **Funktionseinheit**  
Kombination von Baustoffen und gleichzusetzen mit Bauteil
- **Nutzungseinheit**  
Kombination aus Funktionseinheiten und gleichzusetzen mit Baugruppe
- **Technische und baukonstruktive Einheit**  
Kombination aus Nutzungseinheiten

Für reibungslose Austauschprozesse ist zudem eine leichte Zugänglichkeit der Schichten und ein leichter Zugang zu Schächten für die Wartung essenziell. [1]

### 4.3.6 Optimierung der Instandhaltungszyklen

Bei der Optimierung der Instandhaltungszyklen lassen sich verschiedene Strategien unterscheiden: [1]

- **Präventive Instandhaltung**  
Vorbeugende und v.a. regelmäßige Maßnahmen zum Verhindern frühzeitigen Austauschs der Bauteile.
- **Kostenintensive Überprüfung**  
Bei hochwertigen Systemkomponenten lohnt es sich manchmal, eine zeitbezogene oder belastungsbezogene Überprüfung durchzuführen.
- **Zustandsorientierte Instandhaltung**  
Leistungsbezogene Überprüfung z.B. anhand von CO<sub>2</sub>-Messungen im Abgasstrom von Heizungen, um bei Unterschreiten der Mindestwerte Komponenten auszutauschen.

Im Falle eines Austausches gilt es zu beurteilen, in welchem Maß der Austausch des Bauteils stattzufinden hat. Je nach Konstruktion und Nutzung kann es mehrere Maßnahmen für Nutzungseinheiten geben: [62]

- **Zusammenfassende Maßnahmen**

Wenn die Lebensdauer der einzelnen Bauteile und Baustoffe aufeinander abgestimmt ist, lassen sich größere Umbauarbeiten leichter durchführen.

- **Kleinteilig langfristige Maßnahmen**

Funktionsbezogener Austausch der Bauteile, um den Wert des Gebäudes auf konstantem Niveau zu halten.

- **Kleinteilig mittelfristige Maßnahmen**

Moderate Änderungen an Bauwerken, wodurch zumindest die im Material gebundene Energie in der Ökobilanz wiedergewonnen werden kann.

#### 4.3.7 Recyclinggerechtes Konstruieren

Optimalerweise ist die Rückführung aller Bauteile in den Materialkreislauf anzustreben. Ein hochwertiges Recycling kann dadurch erreicht werden, dass die verwendeten Einheiten auf die geringste Größe reduziert werden, z.B. Werkstoffeinheit. Besonders wichtig dabei sind ohne Einschränkung lösbare Verbindungen, Reduktion der Fügstellen und Anzahl der Fügeverfahren, langfristig funktionsfähige Verbindungen und eine dauerhafte Kennzeichnung der Baustoffe. *„Je näher ein Bauteil [...] der Werkstoffebene kommt, desto weniger wichtig ist sein zerstörungsfreier Rückbau und desto wichtiger wird die Verträglichkeit von Baustoffen und Fugemitteln beim werkstofflichen Recycling“* [1]



## 5 Conclusio

In dieser Arbeit wurde der These nachgegangen, ob derzeit ein optimaler Baustoff aufgrund von ökologischen und bautechnischen Kriterien existiert. Aber genauso wenig wie es eine universale Bauweise für jede Gelegenheit gibt, existiert kein allgemein einsetzbarer Baustoff, der den untersuchten Kriterien entspricht. Denn im Kontext des Gebäudes gibt es viele Aspekte, die zu beachten sind; letztendlich stehen Baustoffe in einem funktionalen Zusammenhang mit dem Baugefüge und auch untereinander.

Die Untersuchung der einzelnen Baustoffe ergab zwar erhebliche Unterschiede zwischen den Materialien, doch jeder Baustoff wies in gewissen Kategorien sowohl Stärken als auch Schwächen auf. Holz als Baustoff weist z.B. ein hohes Potenzial an Primärenergiebedarf auf, der große Anteil daran ist aber der erneuerbare Primärenergiebedarf. Denn Holz wird im Gegensatz zu allen anderen Rohstoffen die Sonnenenergie als erneuerbare Primärenergie zugeschrieben, während für die Herstellung der restlichen Baustoffe zum Großteil Energie aus fossilen Quellen benötigt wird. Ausschlaggebend für die Optimierung der Holzprodukte ist die Art der Verbindung der Einzelteile und das Maß des Einsatzes der Bindemittel. Bei der Herstellung von Holzwerkstoffen werden z.B. duroplastische Bindemittel verwendet, die der Grund für die tendenziell höheren Umweltwirkungen sind. Bei Vollhölzern hingegen werden die Kanthölzer kraftschlüssig miteinander verkeilt und es werden wenig Bindemittel im Endprodukt benötigt, was sich auf die Umweltwirkungen des Baustoffes positiv auswirkt. Vergleicht man den nicht erneuerbaren Anteil an Primärenergiebedarf der untersuchten Baustoffe, besitzt Holz aufgrund des hohen Recyclingpotenzials den geringsten Anteil davon.

Im Gegensatz dazu besitzen mineralische Baustoffe geringere Werte für den Primärenergiebedarf, verzeichnen aber in einigen anderen Kategorien wie dem Treibhauspotenzial, dem Photochemischen Ozonbildungspotenzial oder dem Eutrophierungspotenzial deutlich höhere Werte. Außerdem ist der Großteil des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar und trägt nicht positiv zur Umweltbilanz bei. Bei der Bilanzierung unterschiedlicher mineralischer Produkte ist weiterhin auffällig, dass Beton mit steigender Druckfestigkeitsklasse auch dementsprechend mehr Umweltwirkungen entwickelt. Ein steigender Anteil des Zements im Beton bewirkt eine höhere Druckfestigkeit und somit auch insgesamt mehr Umweltwirkungen des Baustoffes. Um Betonprodukte im Bezug auf ihre Umweltwirkungen zu optimieren, bietet sich demnach eine Reduktion des Zementanteils an, wenn trotzdem die Druckfestigkeit beibehalten oder verbessert werden kann.

Dagegen hängen die Umweltwirkungen bei Ziegeln nicht unbedingt von den Ziegelformaten, sondern von der Art der Füllung ab. Ungefüllte Ziegel verursachen prinzipiell weniger Umweltwirkungen als mit Dämmung gefüllte, da durch den Einschluss von Dämmung in den Ziegel die Umweltwirkungen des Ziegelproduktes erhöht werden. Je nach Art der verfüllten Dämmung können unterschiedlich hohe Auswirkungen festgestellt werden. Spätere Bauteilaufbauten können von gefüllten Versionen der Ziegel profitieren, indem eine zusätzliche Dämmschicht minimiert und damit die Umweltwirkungen reduziert werden können.

Glas und Stahl besitzen im Vergleich der Rohstoffe sehr viel höhere Umweltwirkungen in allen Kategorien. Die größten Werte im Vergleich zu den anderen untersuchten Baustoffen waren v.a. in den Kategorien für den Primärenergiebedarf und das Treibhauspotenzial feststellbar. Je nach Ausmaß des späteren Verbaus sollte auf diese Tatsache Rücksicht genommen werden. Bei Stahlprodukten hängen

die Umweltwirkungen stark von dem Legierungsanteil und dem Kohlenstoffgehalt ab. Un- bzw. niedriglegierte Stähle sind im Bezug auf die Umweltwirkungen dabei zu bevorzugen. Die Umweltwirkungen der Glasprodukte hingegen sind durch die Art des Verbaus und durch die Materialdicke zu beeinflussen.

Teilweise analog zu der Baustoffanalyse sind ähnliche Ergebnisse bei dem Vergleich der Rohbauvarianten der Bauteile zu sehen. Beton- und Ziegelbauweisen besitzen einen wesentlich geringeren Primärenergiebedarf als Holzaufbauten. Hauptsächlich ist das auf die Werte des erneuerbaren Primärenergiebedarfs zurückzuführen, die v.a. bei Betonbauteilen sehr gering und bei Holzbauteilen wie einer Massivholzdecke oder Holztafelwänden vergleichsweise hoch ausfallen.

Weiterhin besitzen mineralische Bauweisen die geringsten Umweltwirkungen in den Kategorien für das Photochemische Ozonbildungspotenzial, das Versauerungspotenzial und das Eutrophierungspotenzial, speziell Betonaufbauten weisen aber in den Kategorien für das Treibhauspotenzial und das Ozonabbaupotenzial die höchsten Umweltwirkungen der untersuchten Bauteile auf. Bei richtiger Dimensionierung der Baustoffe können Mischbauweisen dagegen sowohl den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf reduzieren als auch die Umweltwirkungen wie das Versauerungspotenzial und das Eutrophierungspotenzial möglichst gering halten.

Bei genauerer Untersuchung des Zusammenhangs der Baustoffe im Bauteilgefüge wurde ebenso die Relevanz der Dämmung in Bezug auf die Umweltwirkungen nachgewiesen. Tauscht man beispielsweise eine Zellulosedämmung bei gleichbleibender Dämmstärke durch eine Mineralwolldämmung aus, ergeben sich v.a. Unterschiede im Primärenergiebedarf des Bauteils. Der erneuerbare Primärenergiebedarf sinkt, wohingegen der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf deutlich steigt. Außerdem erhöhen sich die Umweltwirkungen des Bauteils in den restlichen Kategorien ebenso. Wenn das Dämmungsmaterial gewechselt wird, beträgt der Unterschied der Umweltwirkungen des Bauteils etwa 25% unabhängig von dem Konstruktionsmaterial.

Wechselt man die primäre Tragkonstruktion des Bauteils, z.B. durch den Austausch eines Holztafelwandaufbaus durch Hochlochziegel, wird der Anteil an erneuerbarem Primärenergiebedarf deutlich gesenkt und der Anteil an nicht erneuerbarem Primärenergiebedarf gesteigert. Ebenso erhöhen sich die Werte in den Kategorien für das Treibhauspotenzial, das Ozonabbaupotenzial, das Versauerungspotenzial und das Eutrophierungspotenzial. Insgesamt ist durch den Wechsel des tragenden Materials eine Änderung der Umweltwirkungen um ca. 60 % feststellbar.

Lediglich geringe Änderungen der Umweltwirkungen des Bauteils ergeben sich durch den Austausch der Sekundärkonstruktion. Dadurch lassen sich bei den untersuchten Bauteilen nur geringfügige Wertänderungen nachweisen.

Einerseits hat demnach die Wahl des Konstruktionsmaterials großen Einfluss auf die Umweltwirkungen der Bauteile, andererseits beeinflussen aber auch die Wahl des Dämmstoffes und die Art der Konstruktion die Ökobilanz. Speziell bei dem Vergleich der bilanzierten Rohbauteile zu den fertig ausgeführten Komponenten ist ersichtlich, dass die Wärmedämmung einen großen Anteil zu den Umweltwirkungen beiträgt.

Bei der Beurteilung der Gesamtsituation spielen dennoch Aspekte wie Standort, klimatische Verhältnisse, Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger, Nutzerverhalten oder spezielle Bedürfnisse des Bauherrn eine so große Rolle, dass sie bei der Baustoffwahl berücksichtigt werden müssen.

Angesichts der Komplexität dieses Themas ist innerhalb der Betrachtung dieser Arbeit feststellbar, dass ein idealer Baustoff in einem ausgewogenen Verhältnis zwischen ökologischen Aspekten und bautechnischen Anforderungen stehen muss und je nach äußeren Gegebenheiten zu wählen ist. Durch die Auswahl von angemessen umweltgerechten Baustoffen und Füge-techniken ist zumindest ressourcenschonendes und nachhaltiges Bauen realisierbar.

Aufgrund von gesetzlichen Vorschriften und Mindeststandards wird es in Zukunft immer notwendiger, nachhaltige Kriterien in den gesamten Planungsprozess einzubeziehen. Dennoch ist festzustellen, dass heutzutage die Ergebnisse wegen unterschiedlicher Datengrundlagen stark variieren. Wie in dieser Arbeit schon gezeigt wurde, gibt es kein einheitliches, internationales Zertifizierungssystem, auf dessen Grundlage eine allgemeine nachhaltige Entwicklung aufbauen könnte. Jedem Bewertungssystem und jeder Datenbank liegen andere Kriterien und Ziele zugrunde, die sich in den Ergebnissen widerspiegeln. Daher ist es ratsam, sich schon früh im Planungsprozess damit auseinanderzusetzen und die Ziele der Bauplanung daran anzupassen. Durch den in dieser Arbeit vorgelegten Baustoffkatalog und Bauteilvergleich soll eine bessere Übersichtlichkeit in diese Thematik gebracht werden.

Es bleibt die Erkenntnis, dass nachhaltige Gebäudeplanung einer ganzheitlichen und flexiblen Planung bedarf. Langfristiges Denken und eine Abstimmung der Lebensdauern von Baustoffen mit gewissem Maß an Nutzungsflexibilität ist essenziell für das ökologische Bauen.



## 6 Glossar

<b>VOC</b>	flüchtige organische Verbindung (volatile organic compound)
<b>BREEAM</b>	britisches Bewertungssystem für ökologische Gebäude
<b>LEED</b>	amerikanisches Bewertungssystem für ökologische Gebäude
<b>Minergie-ECO</b>	schweizer Bewertungssystem für ökologische Gebäude
<b>DGNB</b>	deutsches Gütesiegel für ökologische Gebäude
<b>BNB</b>	deutsches Bewertungssystem für ökologische Gebäude
<b>MAK-Werte</b>	maximale Arbeitsplatzkonzentration (früher)
<b>BAT-Werte</b>	biologische Arbeitsstofftoleranzwerte (früher)
<b>AGW-Werte</b>	Arbeitsplatzgrenzwerte (heute)
<b>BGW-Werte</b>	biologischer Grenzwert (heute)
<b>DFG</b>	Deutsche Forschungsgemeinschaft
<b>DIN ISO 14020</b>	Norm zur Kommunikation der Umwelteigenschaften von Bauprodukten
<b>MIPS</b>	Material-Input pro Serviceeinheit
<b>DIN EN ISO 14040</b>	Grundsätze und Rahmenbedingungen einer Ökobilanzierung
<b>DIN EN ISO 14044</b>	Anforderungen und Anleitung einer Ökobilanzierung
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment
<b>PE</b>	Primärenergiebedarf [MJ]
<b>KEA</b>	Kummulierter Energieaufwand [MJ]
<b>Graue Energie</b>	kummulierter nicht erneuerbarer Energieaufwand ohne Nutzungsphase [MJ]
<b>GWP</b>	Treibhauspotenzial [kg CO <sub>2</sub> – Äq]
<b>ODP</b>	Ozonabbaupotenzial [kg CFC – 11 – Äq]
<b>POCP</b>	Photochemisches Ozonbildungspotenzial [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> – Äq]
<b>AP</b>	Versauerungspotenzial [kg SO <sub>2</sub> – Äq]
<b>EP</b>	Eutrophierungspotenzial [kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> – Äq]
<b>AGÖF</b>	Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.
<b>TVOC-Werte</b>	Summe der VOC-Werte in der Luft
<b>WECOBIS</b>	Datensammlung zur ökologischen & baubiologischen Baustoffauswahl
<b>SVHC</b>	Substances of Very High Concern
<b>ECHA</b>	European Chemicals Agency
<b>CAS-Nummern</b>	internationaler Bezeichnungsstandard für chemische Stoffe

<b>EC-Nummern</b>	internationaler Bezeichnungsstandard für chemische Enzyme
<b>GISBAU</b>	Gefahrenstoff-Informationssystem der BG BAU
<b>GISCODE</b>	Deklarationssystem im GISBAU
<b>BG BAU</b>	Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft
<b>JRC</b>	Joint Research Centre der Europäischen Kommission
<b>DIN EN 15978</b>	Spezifizierung der Ökobilanz bei Gebäuden
<b>EPD</b>	Environmental Product Declaration
<b>EN 15804</b>	Anwendungshinweise für EPDs
<b>BMVBS</b>	deutsches Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
<b>BMUB</b>	deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
<b>WINGIS</b>	Datenbank zur ökologischen & baubiologischen Baustoffauswahl
<b>Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile</b>	österreichische Übersicht von Richtwerten und Nutzungsdauern von Bauteilen
<b>Baubook</b>	österreichisches Online Informationssystem für Bauteile
<b>Eco2Soft</b>	österreichisches Online Bewertungstool der IBO
<b>IBO</b>	österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie
<b>SIA</b>	Schweizerische Vereinigung der Ingenieure und Architekten
<b>SIA 112/1</b>	Empfehlungen zum nachhaltigen Bauen
<b>SIA 2032</b>	Empfehlung für die Berechnung Grauer Energie und der Treibhausgasemissionen
<b>Elektronischer Bauteilkatalog</b>	schweizer Informationssystem für Bauteile
<b>SNARC</b>	schweizer Bewertungstool für Bauteile
<b>Minergie-P</b>	schweizer Bewertungsstandard für ökologische Gebäude
<b>Minergie-A</b>	schweizer Bewertungsstandard für ökologische Gebäude
	World Green Building Council
<b>SNBS</b>	Standard Nachhaltigen Bauens der Schweiz
<b>NNBS</b>	Netzwerk für Nachhaltiges Bauen der Schweiz
<b>TQB</b>	österreichisches Bewertungssystem für ökologische Gebäude
<b>ÖGNI</b>	Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
<b>GI</b>	schweizer Label: Gutes Innenraumklima

<b>SHI-Gebäudepass</b>	deutsches Gütesiegel für Innenraumklima des Sentinel Haus Institutes
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt
<b>WHO</b>	World Health Organisation
<b>SCERT</b>	schweizer Zertifizierungsstelle für Produkte und Personen im Bauwesen
<b>Ökobaudat</b>	Online Datenbank zur ökologischen & baubiologischen Baustoffauswahl
<b>SimaPro</b>	forschungsorientiertes Programm zur Ökobilanzierung
<b>GaBi</b>	forschungsorientiertes Programm zur Ökobilanzierung
<b>OpenLCA</b>	forschungsorientiertes Programm zur Ökobilanzierung
<b>LEGEp</b>	praxisorientiertes Programm zur Ökobilanzierung
<b>SBS-Tool</b>	praxisorientiertes Programm zur Ökobilanzierung
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>Haus der Zukunft</b>	österreichisches Projekt zur Modernisierung von Gebäuden
<b>Niedrigenergiehaus</b>	Gebäudestandard, bei dem gewisse energetische Anforderungen unterschritten werden
<b>nNZEB</b>	nearly Net Zero-Energy Buidling
<b>Passivhaus</b>	Gebäudestandard, bei dem gewisse energetische Anforderungen noch weiter unterschritten werden
<b>WLG</b>	Wärmeleitgruppen
<b>WLS</b>	Wärmeleitfähigkeitsstufen
<b>ZTV</b>	Zusätzliche technische Vertragsbedingungen
<b>KrWG</b>	deutsches Kreislaufwirtschaftsgesetz

## 7 Anhang: Baustoffkatalog

Der folgende von mir erstellte Baustoffkatalog wurde anhand der Daten der Ökobaudat angefertigt und vergleicht die ökologischen Eigenschaften der Baustoffe innerhalb ihrer Baustoffgruppe. Da die ökologischen Eigenschaften von Baustoffen jeweils in unterschiedlichen Einheiten angegeben werden, werden sie zu einem Großteil auf bestimmte funktionale Einheiten innerhalb ihrer Baugruppe berechnet. Die Unterteilung in Baugruppen ist notwendig, da es nicht sinnvoll ist, Betonmassen mit Bitumenbahnen auf Grundlage der hochgerechneten Daten auf 1m<sup>3</sup> zu beziehen. Deshalb wird zusätzlich zu den Eigenschaften der Baustoffe immer die Einheit in der jeweiligen Baugruppe angegeben, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Auch hier sind für einen besseren Überblick in den verschiedenen Kategorien jeweils die höchsten Werte in **rot** und die niedrigsten Werte in **grün** markiert.

### 7.1 Mineralische Baustoffe

#### BINDEMITTEL

Als Bindemittel werden Stoffe bezeichnet, mit denen einzelne Bestandteile eines Baustoffes sowohl untereinander als auch mit einem Untergrund verbunden werden können. Prinzipiell unterscheidet man organische und mineralische Bindemittel, wobei im Folgenden mineralische Bindemittel behandelt werden. [9]

In der Kategorie Bindemittel werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 37, Abbildung 26). Es sind hier nur Daten für die Herstellungsphase vorhanden (A1-A3).

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Zement CEM II 42,5	0,5986	2,326	0,7914	3,39E-13	0,0001289	0,001055	0,0001166
Zement CEM III 42,5	0,446	1,364	0,3734	2,42E-13	0,000061	0,0005146	0,00006081
Zement CEM IV 42,5	0,5914	2,732	0,7347	3,72E-13	0,0001134	0,001005	0,0001163
Feinkalk CaO	0,4786	4,395	1,451	4,09E-13	0,00001312	0,0003527	0,00006824
Kalziumhydroxid Ca(OH) <sub>2</sub>	0,4327	3,337	1,102	2,46E-13	0,00001331	0,0002696	0,00005109
Anhydrit Mix	0,1323	1,727	0,09293	3,49E-13	0,00003182	0,0005506	0,00002444
Calciumsulfatestrich	0,165	0,913	0,111	7,08E-12	0,0000118	0,000173	0,0000252
Lehmpulver	0,1405	1,334	0,3511	9,54E-14	0,00002513	0,0003714	0,00004331

Tabelle 37: Vergleich der Umweltwirkungen von Bindemitteln



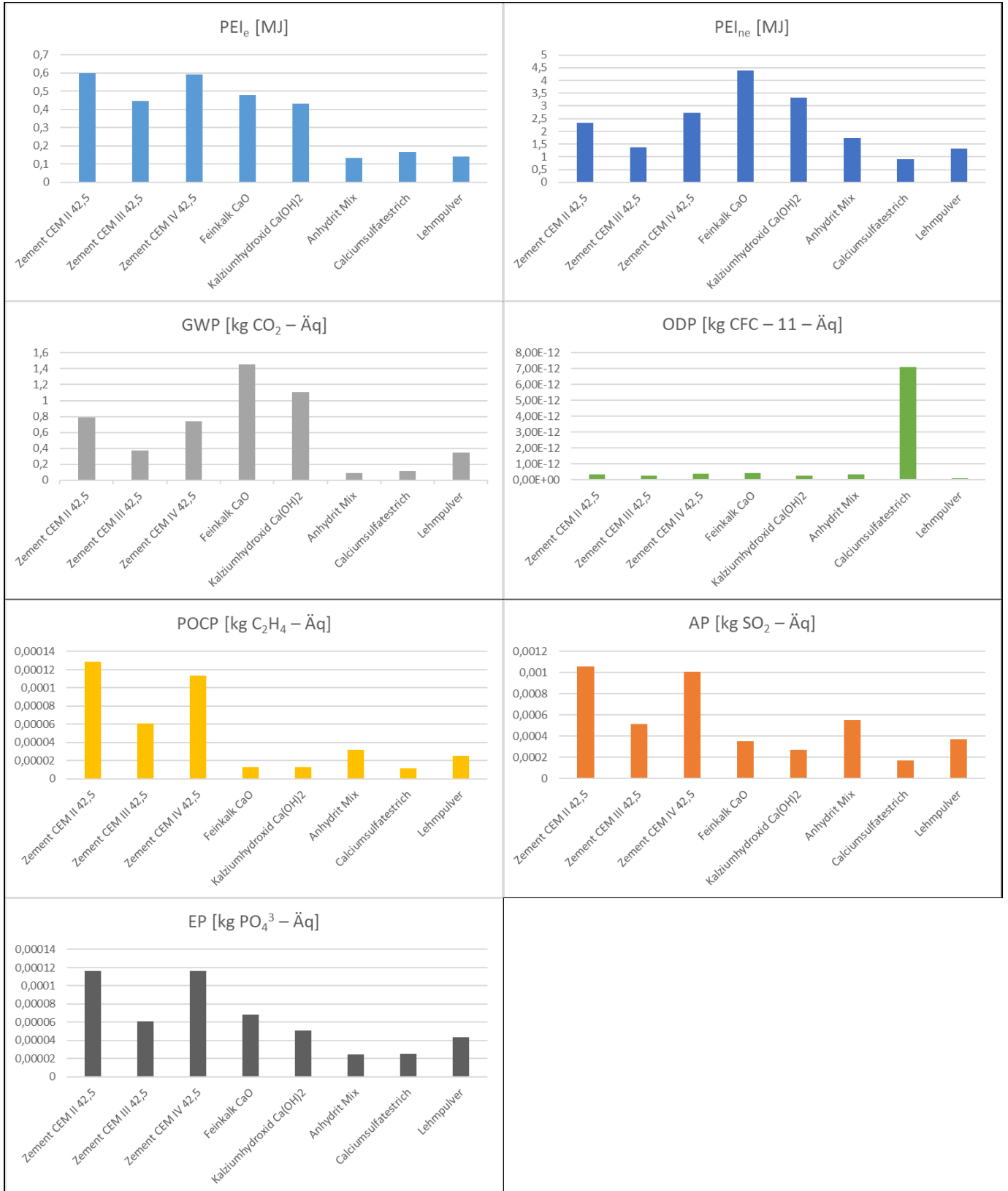


Abbildung 26: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Bindemitteln

## ZUSCHLÄGE

Zuschlagsstoff ist ein Sammelbegriff für organische und anorganische Materialien, welche Eigenschaften wie Geschmeidigkeit, Flexibilität oder Wasserrückhaltevermögen von Mörtel, Estrichen oder Beton bestimmen. [9]

In der Kategorie Zuschläge werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 38, Abbildung 27). Es sind hier nur Daten für die Herstellungsphase vorhanden (A1-A3).

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Sand 0/2	0,01067	0,03817	0,002892	5,39E-15	-3,18E-07	0,000007214	0,000001337
Sand 0/2 getrocknet	0,01342	0,5354	0,03399	7,39E-15	0,000003301	0,00002838	0,000004638
Schotter 16/32	0,08726	0,2004	0,01577	4,68E-14	0,000001133	0,00002596	0,000004934
Schotter 16/32 getrocknet	0,08808	0,5203	0,03572	4,75E-14	0,000003514	0,0000391	0,000006952
Bimssand	0,01439	0,1102	0,008442	5,14E-15	-0,000002226	0,00005919	0,00001361
Lava Körnung	0,003465	0,05254	0,003834	4,90E-16	0,000003508	0,00003577	0,000007692
Blähton Körnung	0,8757	5,658	0,3897	4,59E-13	0,0001673	0,00253	0,0001277
Blähschiefer	0,2522	2,099	0,3444	1,38E-13	0,000138	0,003309	0,0001252
Blähglas Körnung	1,313	4,902	0,2776	2,70E-13	0,000006299	0,0006393	0,0002048
Perlite 0-1	0,2029	7,082	0,5158	1,13E-13	0,00006859	0,0005536	0,000008472

Tabelle 38: Vergleich der Umweltwirkungen von Zuschlägen

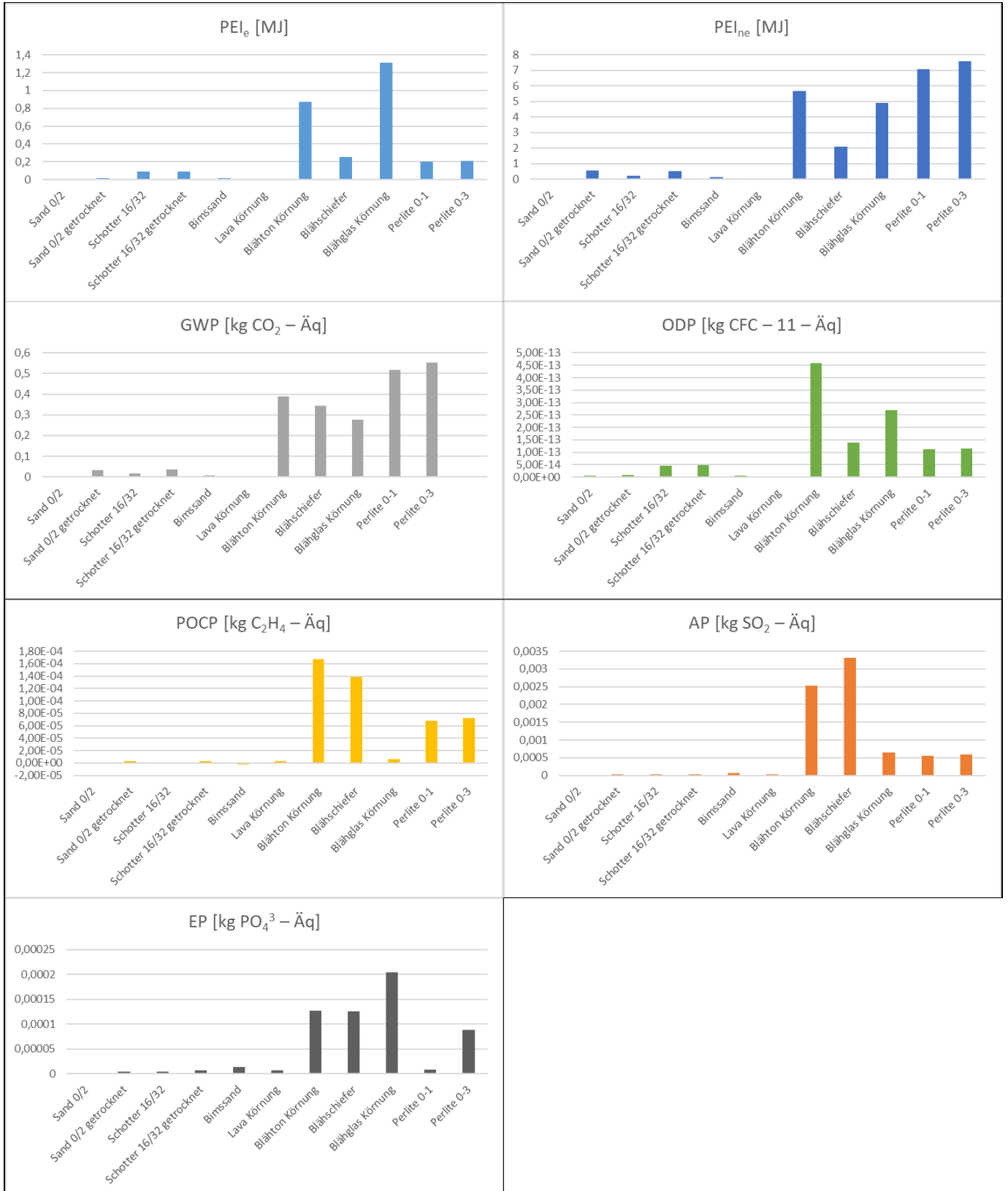


Abbildung 27: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Zuschlägen

## MAUERSTEINE (KG)

Wie bereits in Kapitel „3.2.1 Materialverhalten“ über Mauersteine erwähnt, werden Mauersteinsorten in Natursteine und künstlich hergestellte Mauersteine differenziert. Die vom Menschen hergestellten Mauersteine variieren in ihrer Materialzusammensetzung, ihren Abmessungen und den Rohdichte- sowie den Festigkeitsklassen. [9]

In der ersten Kategorie Mauersteine werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 39, Abbildung 28). Es sind großteils Daten für alle Phasen des Lebenszyklus inklusive des Recyclingpotentials vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Kalksandstein	175	997	136	1,54E-09	0,00239	0,0893	0,0171
Ziegel Österreich	0,376	1,99	0,189	1,21E-12	0,0000269	0,000255	0,00000254
Dachsteine	0,158	1,35	0,209	6,06E-10	0,0000395	0,000309	0,0000364
Dachziegel Österreich	0,283	4,42	0,255	4,014E-09	0,0000507	0,00034	0,0000367
Vegetationssubstrat	2,053	1,581	-0,01932	3,68E-13	0,00001008	0,0002061	0,00008474

Tabelle 39: Vergleich der Umweltwirkungen von Mauersteinen (kg)

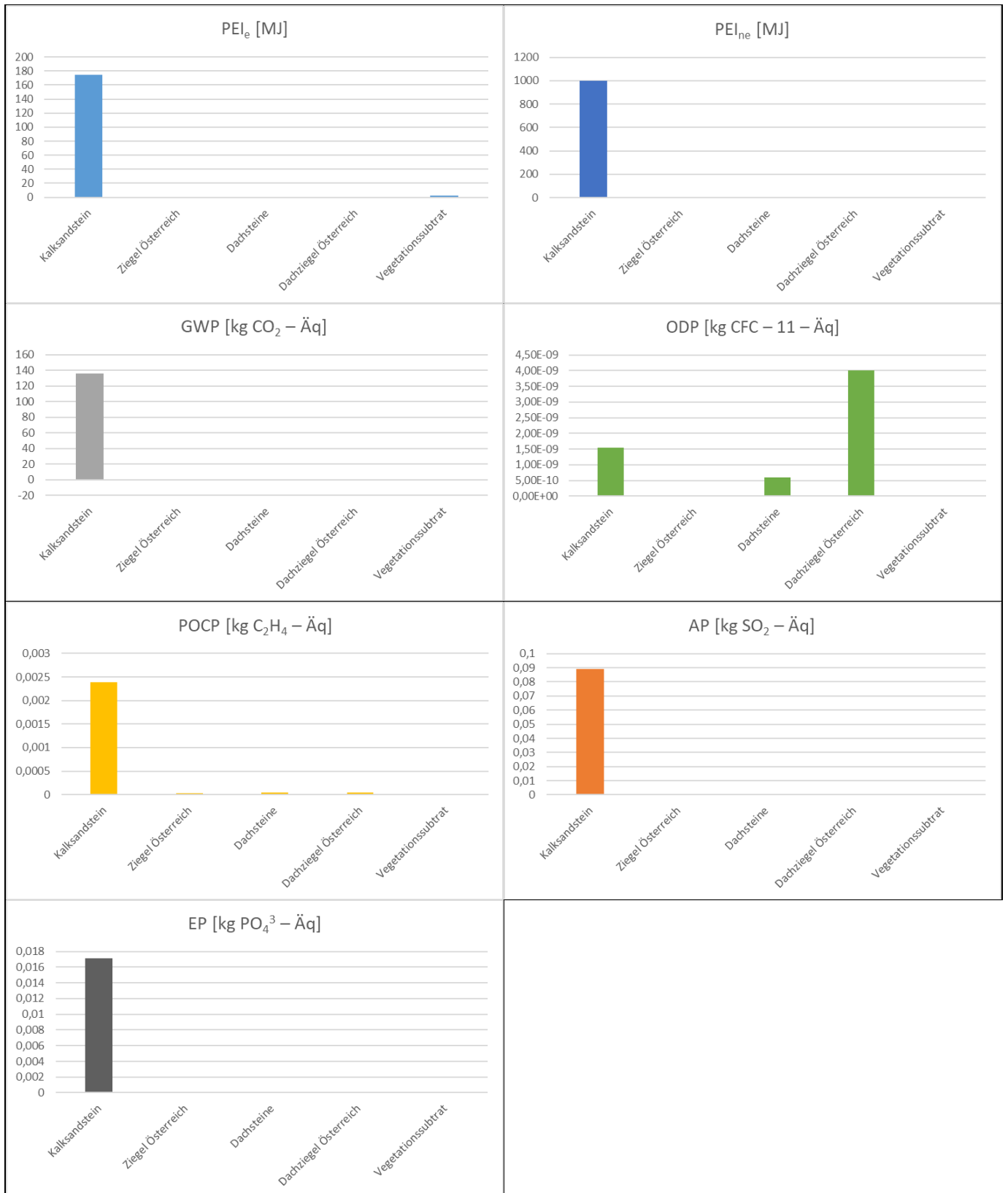


Abbildung 28: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Mauersteinen (kg)

## MAUERSTEINE (M<sup>3</sup>)

In der zweiten Kategorie Mauersteine werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 40, Abbildung 29). Hier sind hauptsächlich Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Mauerziegel	261,372	1295,03	138,294	1,46E-09	0,0131877	0,196732	0,0212094
Mauerziegel gefüllt	287,095	1782,97	177	2,20E-09	0,0271106	0,356827	0,0405602
Porenbeton P4 05 bewehrt	352,4	1742	265,6	2,97E-10	0,02098	0,3207	0,04318
Porenbeton P4 05 unbewehrt	350,7	1368	223,5	1,88E-10	0,0113	0,2309	0,03213
Blähton LB Planstein AW	378,9	1808	183,5	1,72E-10	0,03655	0,7403	0,05604
Großformatige LB Elemente	74,685	981,7	202,302	1,30438E-07	0,02924	0,29936	0,040812
LB Mauersteine AW	75,6	549	74,1	1,39E-07	0,0127	0,168	0,18
LB Mauersteine Hbl	22,8	323	64,1	3,46E-08	0,0155	0,117	0,0182
LB Mauersteine Vbl leicht	24	326	72,5	3,91E-08	0,0109	0,108	0,0159
LB Mauersteine Vbl leicht + Trass Zement	20,2	265	52,4	1,10E-07	0,00821	0,0796	0,0124
Plan-Blöcke mit Dämmung	38,857	673,56	98,897	1,01053E-06	0,020831	0,24964	0,032027
Beton Mauersteine	269,7	1238	247,4	1,91E-10	0,01268	0,4454	0,07054
Glasbausteine	2353	4,29E+04	4009	1,86E-09	1,209	1,71E+01	3,273
Lehmstein	68,83	1533	96,06	3,81E-11	0,01153	0,07322	0,01122
Stampflehmwand	3,199	125,4	9,44	8,37E-13	0,005597	0,03673	0,007551

Tabelle 40: Vergleich der Umweltwirkungen von Mauersteinen (m<sup>3</sup>)



Abbildung 29: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Mauersteinen (m<sup>3</sup>)

## BAUTEILELEMENTE

Bauteilelemente werden in einer Fabrik vorgefertigt, dort gelagert, bei Bedarf auf die Baustelle geliefert und vor Ort montiert. Aus großformatigen Fertigteilen werden Decken, Wände und Dächer hergestellt, ansonsten sind Fertigteilkonstruktionen aus Stützen und Balken, sowie Sanitärzellen im Bauvorhaben üblich. [9] In der Kategorie Bauteilelemente werden die Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>2</sup> des Baustoffes gerechnet (Tabelle 41, Abbildung 30). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Betonfertigteil Decke 20cm	114,1	523,2	86,62	1,12E-10	0,007539	0,1602	0,02293
Betonfertigteil Decke 40cm	228,2	1046	173,2	2,24E-10	0,01508	0,3204	0,04587
Betonfertigteil Wand 12cm	38,31	210,7	39,76	3,54E-11	0,00232	0,07376	0,0113
Betonfertigteil Wand 40cm	127,8	702,6	132,5	1,18E-10	0,007738	0,2459	0,03767
Isospan 1 Holzbetonmantelsteine	938	270,7	-56,06	4,58E-10	0,00602	0,04882	0,00742
Isospan 2 Holzbetonmantelsteine mit S30/7 EPS Dämmung	661,4	179	-40,81	6,63E-08	0,02592	0,04644	0,00627
Isospan 2 Holzbetonmantelsteine mit S36,5/16,5 EPS Dämmung	626,5	251	-35,08	1,25E-07	0,04523	0,05441	0,0073
Isospan 3 Holzbetonmantelsteine	630,7	651,6	-10,05	8,00E-10	0,01135	0,07041	0,01193
Isospan 4 Holzbetonmantelsteine N15	558,8	79,29	-37,46	1,41E-10	0,00335	0,03	0,0041
Isospan 4 Holzbetonmantelsteine N25	736,3	100,8	-49,73	1,83E-10	0,00438	0,03922	0,00536
Keramische Fliesen	18,23	220,3	12,94	5,66E-10	0,0021	0,02419	0,00268
Steinzeugfliesen glasiert	8,04	99,8	6,374	4,32E-12	0,0006131	0,010	0,001279
Steinzeugfliesen unglasiert	8,116	111,1	7,004	4,37E-12	0,0006681	0,01064	0,001203
Natursteinplatte hart IB	102,7	442,7	35,33	4,35E-10	0,01115	0,1276	0,01025
Natursteinplatte weich IB	46,32	208,1	16,52	1,95E-10	0,005109	0,05848	0,004829
Schiefer	52,83	202,8	16,32	4,06E-10	0,009327	0,09263	0,02131
Faserzementplatte	58,28	80,24	7,199	3,24E-11	0,003588	0,01959	0,002348
Gips Wandbauplatte	5,32	329,7	20,97	1,17E-09	0,00271	0,0226	0,0027
Gipsfaserplatte	1,84	47,33	3,08	3,90E-10	0,000388	0,00407	0,000698
Gipskartonplatte	9,594	33,38	2,327	1,71E-12	0,0002109	0,003239	0,0009246
Gipsplatte Feuerschutz 12,5mm	1,79	32,32	2,12	2,29E-10	0,000386	0,00356	0,000838
Gipsplatte Trockenestrich	3,53	65,76	4,22	4,51E-10	0,000623	0,00657	0,0016
Gipsplatte DIN EN 520/ DIN 18180	1,75	32,21	2,09	2,23E-10	0,000296	0,00324	0,000796
Trockenestrich 25mm Gipsfaser	10,97	117,2	7,773	6,30E-12	0,0007961	0,00822	0,001838
Trockenestrich 25mm Gipskarton	19,13	68	4,696	3,35E-12	0,0004501	0,006015	0,001822
Mineralfaser Deckenplatte	7,022	57,85	3,646	2,16E-11	0,001275	0,01801	0,002246
Spannbeton Fertigteildecke	58,65	545,8	69,2	6,10E-08	0,010244	0,12765	0,014959

Tabelle 41: Vergleich der Umweltwirkungen von Bauteilelementen



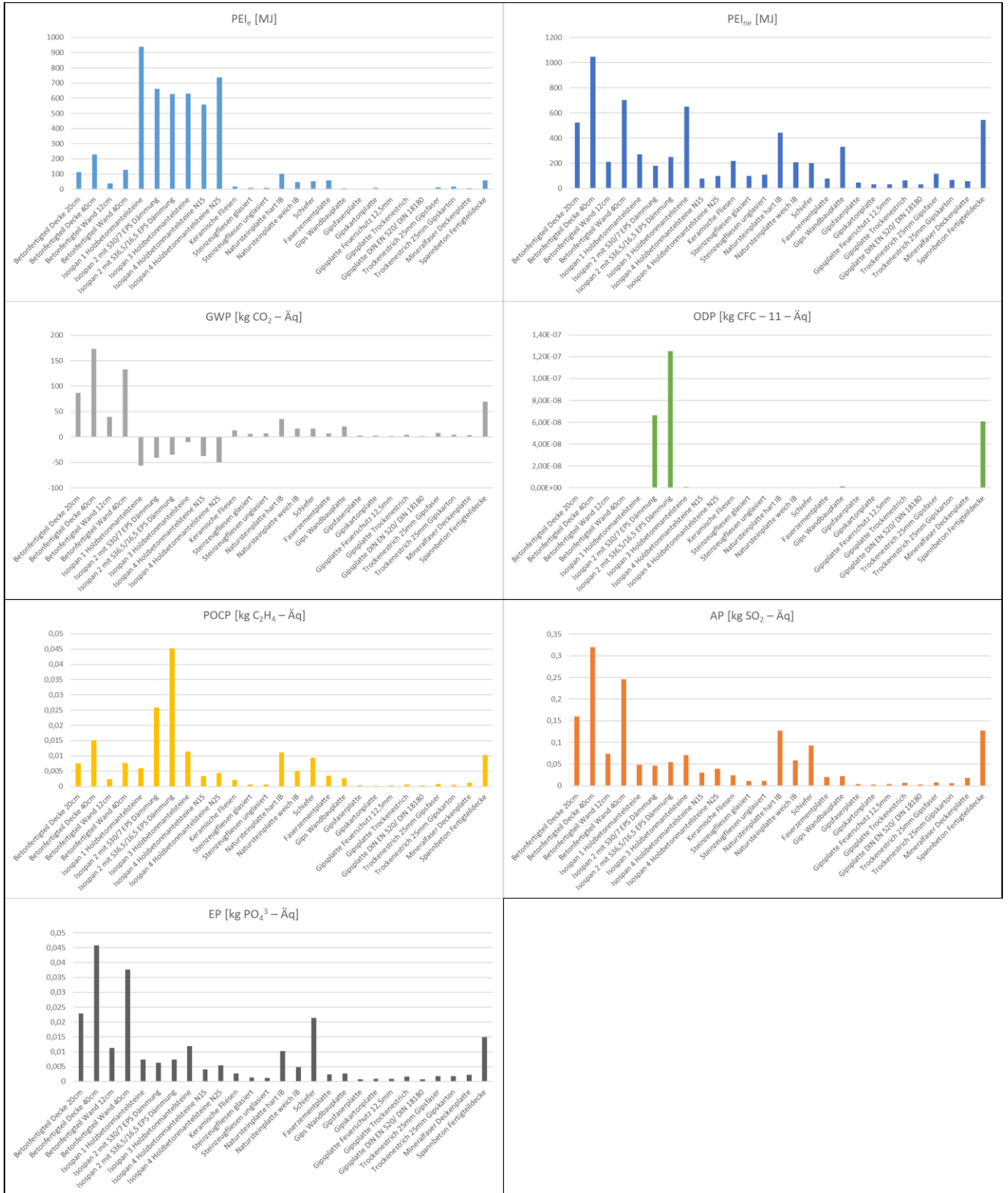


Abbildung 30: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Bauteilelementen

## MÖRTEL UND PUTZE

Als Mörtel wird ein Gemisch aus einem oder mehreren Bindemitteln, Wasser, Gesteinskörnung bis maximal 4 mm und gegebenenfalls Zusätzen bezeichnet, wohingegen Putze ein Gemisch aus Sand, Wasser und Gips sind. [9]

In der Kategorie Mörtel und Putze werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 42, Abbildung 31). Hier sind hauptsächlich Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Leichtmauermörtel	0,533	4,96	0,578	8,57E-11	0,00000927	0,0000927	0,0015
Normalmauermörtel	0,229	0,716	0,0877	1,34E-11	0,0000104	0,000173	0,0000273
Modifizierter Mörtel Gruppe 1	1,2	7,02	0,465	5,16E-09	0,000146	0,00172	0,000175
Modifizierter Mörtel Gruppe 2	3,32	9,65	0,93	2,04E-10	0,000177	0,00273	0,000353
Modifizierter Mörtel Gruppe 3	1,25	24,6	1,11	2,85E-08	0,000451	0,00287	0,000314
Calciumsulfatestrich Mörtel	0,0889	1,62	0,123	1,20E-11	0,00000032	0,000328	0,0000389
Zementestrich Mörtel	0,0794	1,07	0,156	1,30E-11	0,0000127	0,000217	0,00004
Gips-Kalkputz	0,11	1,95	0,15	2,17E-11	0,0000182	0,000184	0,0000225
Gipsputz	0,21	2,12	0,14	2,29E-11	0,0000209	0,000204	0,0000265
Putzmörtel-Leichtputz	0,479	3,36	0,376	6,47E-11	0,0000245	0,000691	0,000141
Putzmörtel-Normal & Edelputz	0,416	2,07	0,242	5,24E-10	0,00000304	0,000359	0,0000851
Putzmörtel-Wärmedämmputz	0,584	7,94	0,969	6,66E-11	0,0000795	0,00116	0,000197
Fliesenkleber	0,5021	1,514	0,3334	2,96E-13	0,00004942	0,0004886	0,00006688
Gipskleber	0,14	1,66	0,11	1,13E-11	0,0000156	0,0000151	0,0000201
Holzboden-Spachtelmasse HSP 34	1,2	7,02	0,465	5,16E-09	0,000146	0,00172	0,000175
Kleber für Gipsplatten	0,1277	1,555	0,106	7,08E-14	0,0000128	0,0000991	0,00001571
Objekt-Spachtelmasse OSP 31	1,2	7,02	0,465	5,16E-09	0,000146	0,00172	0,000175
Universal-Spachtelmasse USP 32	1,2	7,02	0,465	5,16E-09	0,000146	0,00172	0,000175

Tabelle 42: Vergleich der Umweltwirkungen von Mörtel und Putzen

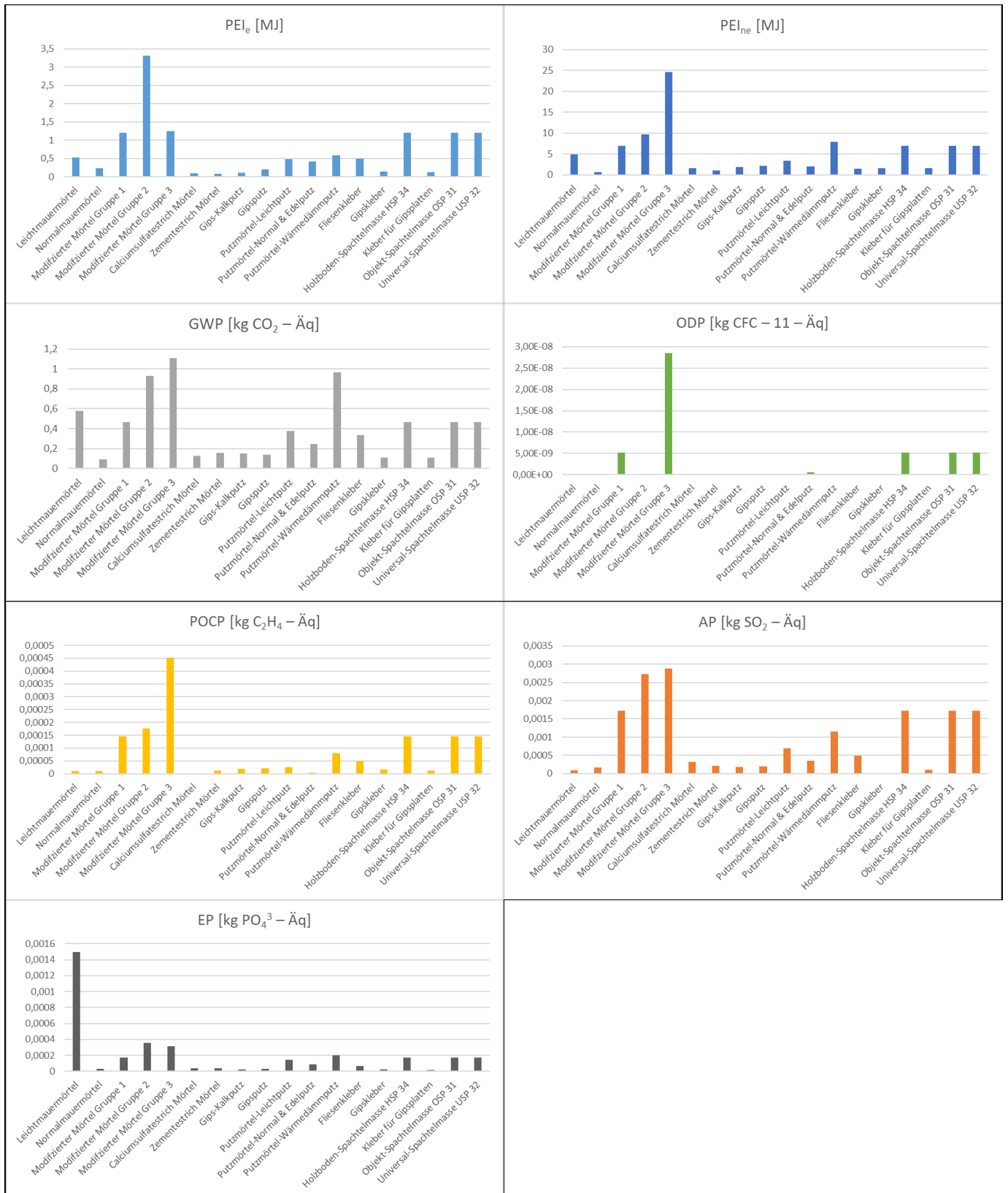


Abbildung 31: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Mörtel und Putzen

## BETON UND MÖRTEL

Wie bereits in Kapitel „3.2.1 Materialverhalten“ über Beton erwähnt, bestehen Betonprodukte aus Zement, Sand bzw. Kies und Wasser, gegebenenfalls werden noch Zusatzstoffe zur Verbesserung der Materialeigenschaften hinzugefügt. [55]

In der Kategorie Beton und Mörtel werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 43, Abbildung 32). Hier sind hauptsächlich Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Beton C 25/30	77,1	909	211,1	6,94E-07	0,0361	0,297	0,0472
Beton C 35/45	92,2	1120	265,1	7,98E-07	0,0442	0,364	0,0572
Beton C 50/60	112,7	1418	334,7	9,56E-07	0,054	0,451	0,069
Transportbeton C 20/25	171,8	939,6	230,8	1,06E-10	0,0106	0,3881	0,05508
Transportbeton C 30/37	219,5	959,9	286,1	1,17E-10	0,0196	0,4573	0,0621
Kalkzementmörtel	157,7	820,1	196,4	1,59E-10	0,01621	0,3289	0,06357
Zementmörtel	268	1293	375,5	2,23E-10	0,04427	0,5684	0,09162
Kunstharzputz	3131	28100	1259	2,74E-09	1,67	4,02	0,5268

Tabelle 43: Vergleich der Umweltwirkungen von Beton und Mörtel



Abbildung 32: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Beton und Mörtel

## ASPHALT

Asphalt ist eine technisch hergestellte oder natürliche Mischung aus Gesteinskörnungen mit dem Bindemittel Bitumen. Hauptsächliche Anwendung findet er im Straßenbau, für Wege und Plätze sowie im Hochbau als Gussasphaltestrich und als Abdichtung. [9]

In der Kategorie Asphalt werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 44, Abbildung 33). Es sind hier nur Daten für die Herstellungsphase vorhanden (A1-A3).

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Splittmastixasphalt	0,07357	4,08	0,07737	6,37E-14	0,000006849	0,0001882	0,00002347
Gussasphalt	0,08133	4,69	0,09803	6,61E-14	0,00001075	0,000214	0,00002608
Asphaltbinder	0,07195	3,871	0,07852	6,19E-14	0,000005856	0,0001821	0,0000232
Asphalttragschicht	0,07019	2,954	0,07126	5,98E-14	9,84E-07	0,000154	0,0000213
Tragdeckschicht	0,07371	4,118	0,07978	6,38E-14	0,000007136	0,0001898	0,00002371

Tabelle 44: Vergleich der Umweltwirkungen von Asphalt

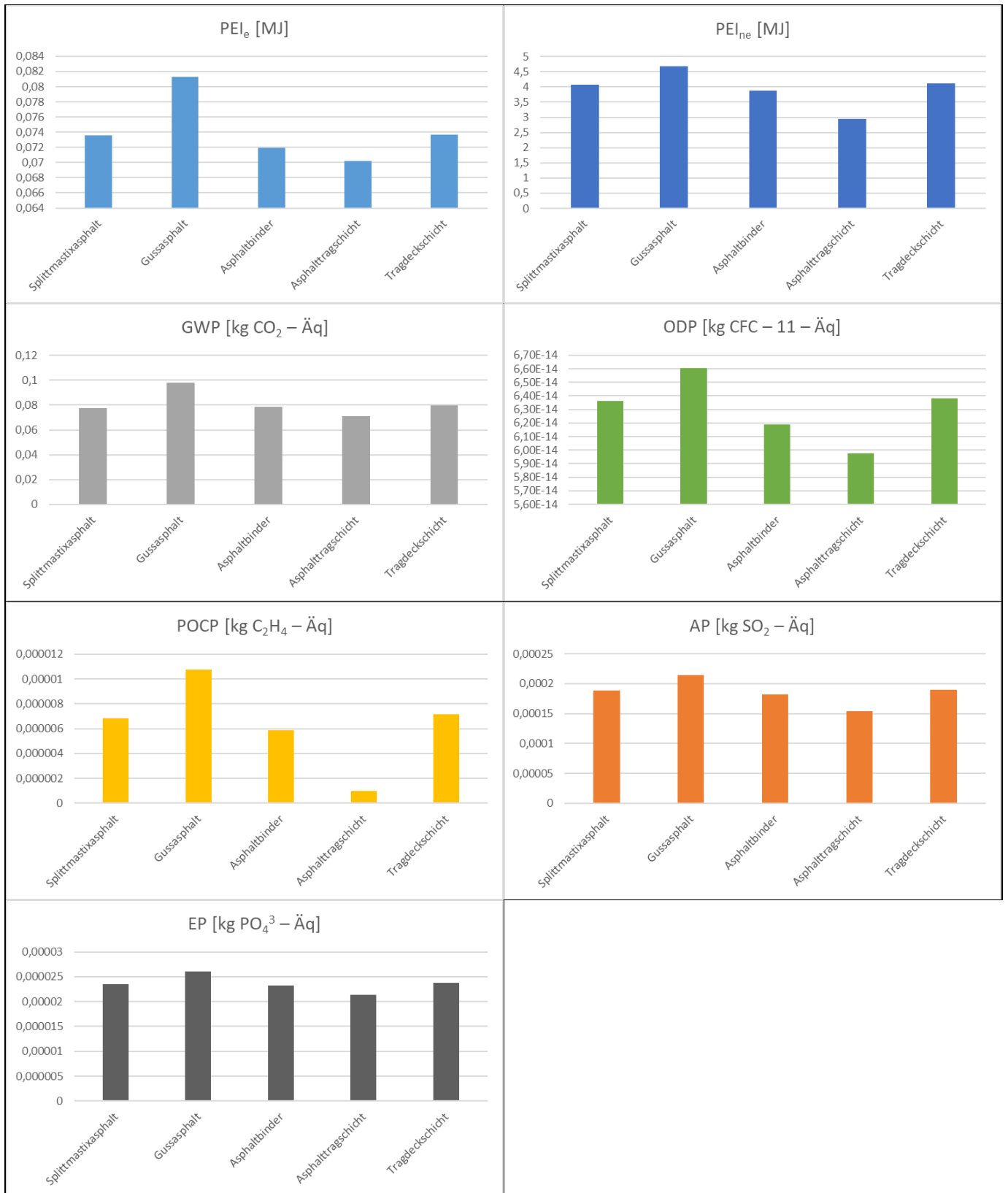


Abbildung 33: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Asphalt

## 7.2 Dämmstoffe

### MINERALWOLLE

Mineraldämmstoffe bzw. Mineralfaserdämmstoffe (Stein und Glaswolle mit inbegriffen) werden aus geschmolzenem Gestein bzw. Glas hergestellt, das zu feinen Fäden ausgezogen oder durch Düsen geblasen wird. Dessen Erscheinung ähnelt einer handelsüblichen Watte. [9]

In der Kategorie Mineralwolle werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 45, Abbildung 34). Bis auf die Steinwolle sind auch hier nur Daten für die Herstellungsphase vorhanden (A1-A3).

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Einblasdämmung	135,2	852,5	66,05	7,35E-11	0,007931	0,2227	0,04541
Bodendämmung	276,4	1721	136,8	2,01E-10	0,03361	0,6124	0,09189
Fassadendämmung	127,2	819,2	71,6	9,35E-11	0,01927	0,3363	0,047
Flachdachdämmung	294	2038	211,6	2,21E-10	0,06489	1,068	0,1338
Schrägdachdämmung	90,55	572	47,43	6,62E-11	0,01216	0,2171	0,03153
Steinwolle (hoch)	219,7	1934	140,9	5,07E-06	0,0554	1,05	0,142
Steinwolle (mittel)	154,1	1185	82,64	3,10E-06	0,0339	0,624	0,0849
Steinwolle (niedrig)	99,85	564,8	34,35	1,46E-06	0,016	0,276	0,0374

Tabelle 45: Vergleich der Umweltwirkungen von Mineralwolle



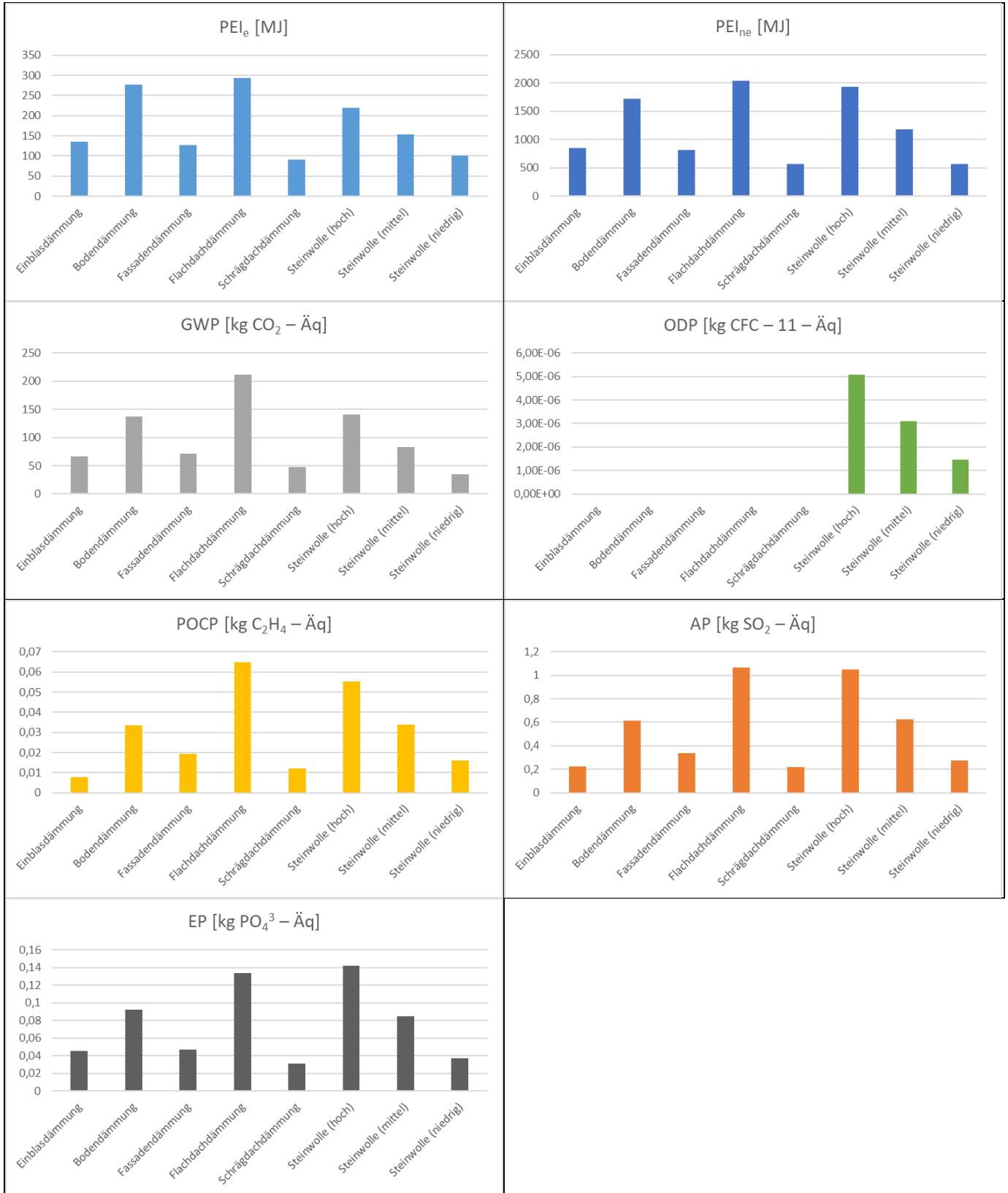


Abbildung 34: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Mineralwolle

## EXPANDIERTES POLYSTYROL

Expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS) ist ein geschlossenzelliger, harter Dämmstoff aus Polystyrol. Je nach Herstellungsart bei aufgeschäumtem Polystyrol wird zwischen dem eher grobporigen EPS (Expandierter Polystyrol-Hartschaum) und dem feinporigeren XPS (Extrudierter Polystyrol-Hartschaum) unterschieden. [9]

In der Kategorie Expandiertes Polystyrol werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 46, Abbildung 35). Hierbei sind bis auf die Nutzungsphase (B1-B7) Daten zu allen Lebenszyklusphasen erfasst.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
EPS-Hartschaum B/P-035	27,5	2230	75,4	4,09E-07	0,542	1,71E-01	0,0155
EPS-Hartschaum B/P-040	22,7	1590	53,8	2,89E-07	0,475	1,22E-01	0,0112
EPS-Hartschaum W/D-035	21,3	1810	59,5	3,41E-07	0,447	1,36E-01	0,0125
EPS-Hartschaum W/D-040	22,2	1530	52,5	2,73E-07	0,43	1,20E-01	0,0109
EPS-Hartschaum grau	21,8	1420	49,7	2,50E-07	0,384	1,13E-01	0,0105

Tabelle 46: Vergleich der Umweltwirkungen von Expandiertem Polystyrol

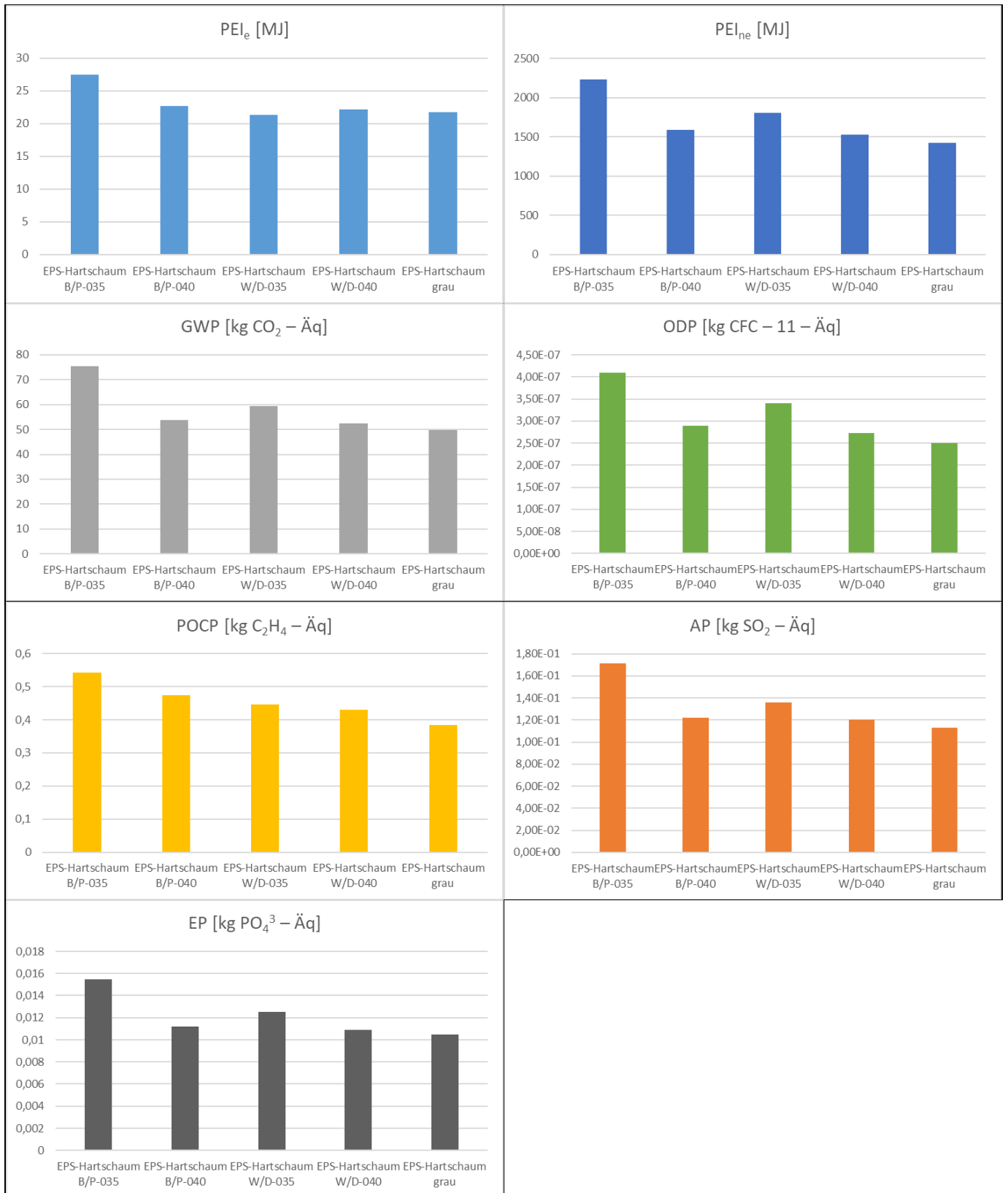


Abbildung 35: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Expandiertem Polystyrol

## POLYURETHAN HARTSCHAUM

Polyurethan-Hartschaum ist ein druckbelastbarer Dämmstoff. Der Hartschaum, zumeist zu Platten oder Blöcken verarbeitet, entsteht durch eine chemische Reaktion von flüssigen Rohstoffen und Treibmitteln wie Pentan oder CO<sub>2</sub> und weiterer Hilfsstoffe. Eingesetzt wird das Material im Dach, im Boden, als Perimeterdämmung, in Decken, in der Außenwand, als WDVS und als Innendämmung. [9]

In der Kategorie Polyurethan Hartschaum werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>2</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 47, Abbildung 36). Hierbei sind bis auf die Nutzungsphase (B1-B7) Daten zu allen Lebenszyklusphasen erfasst.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
PU-Dämmplatten Aluminium	22,4	312	15	1,90E-05	0,00924	0,044	0,00478
PU-Dämmplatten Aluminium (Mehrlagen)	16,6	293	12,9	1,90E-05	0,00861	0,033	0,00438
PU-Dämmplatten Mineralflies	11,4	291	13,1	1,90E-05	0,00975	0,0313	0,00445
PU-Dämmplatten Blockschaum	16,3	325	14,8	2,34E-05	0,0196	0,0306	0,0049

Tabelle 47: Vergleich der Umweltwirkungen von Polyurethan Hartschaum

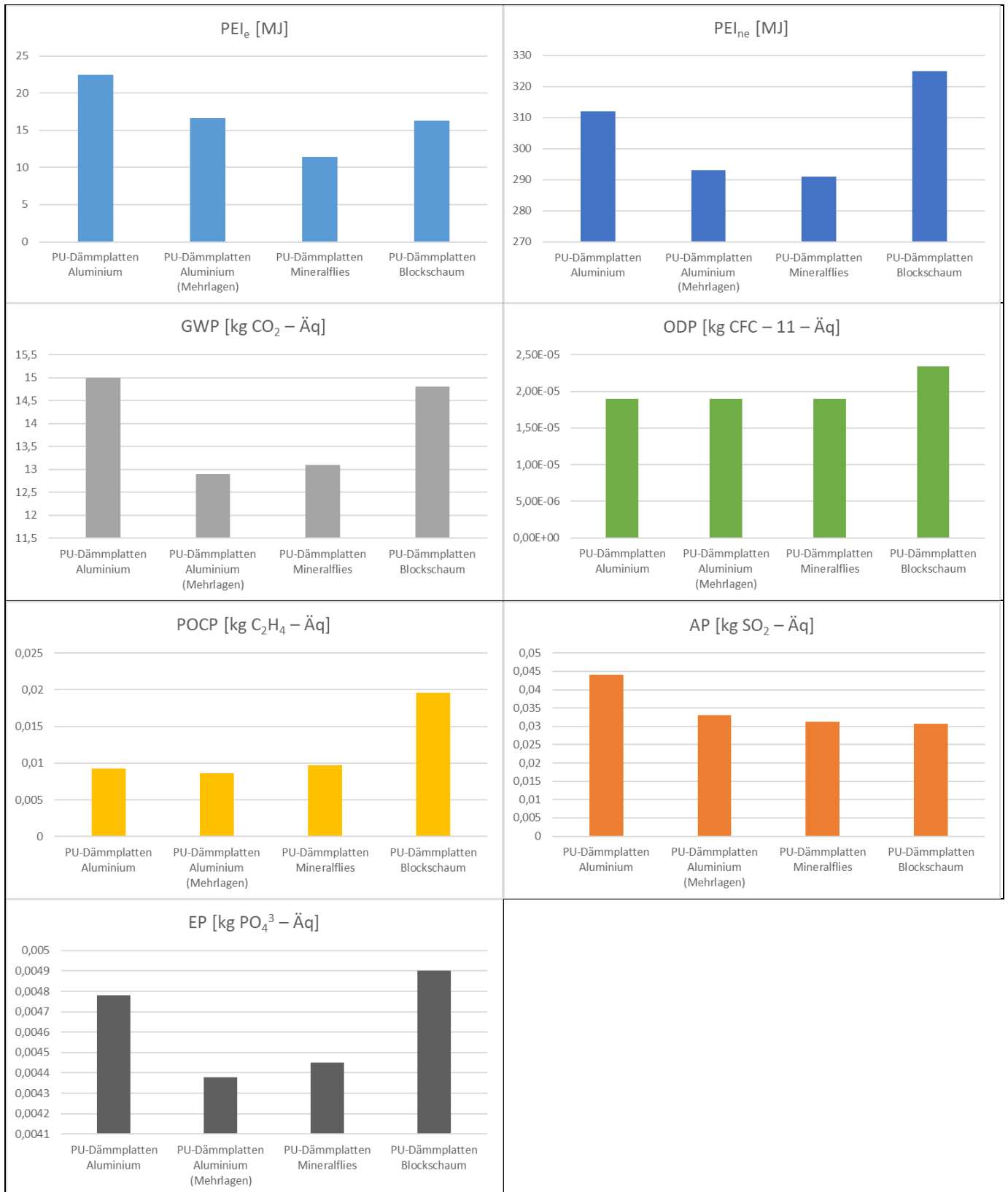


Abbildung 36: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Polyurethan Hartschaum

## SCHAUMGLAS

Schaumglas ist ein aus Glas durch Zugabe von Kohlenstoff werksmäßig aufgeschäumter, geschlossenzelliger Dämmstoff. Er besteht hauptsächlich aus Recyclingglas (>66%) und Rohstoffen wie Sand, Dolomit und Kalk. Während des Aufschäumprozesses entsteht eine hermetisch abgeschlossene Materialstruktur mit dünnen Zellglaswänden. [9]

In der Kategorie Schaumglas werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 48, Abbildung 37). Hierbei sind bis auf die Nutzungsphase (B1-B7) Daten zu allen Lebenszyklusphasen erfasst.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
FOAMGLAS F	10,4	23	1,48	2,33E-11	0,000248	0,00317	0,000389
FOAMGLAS T4	9	20,5	1,32	2,40E-11	0,000225	0,00292	0,000359
FOAMGLAS W&F	8,66	19,8	1,26	2,52E-11	0,000222	0,00289	0,000348

Tabelle 48: Vergleich der Umweltwirkungen von Schaumglas

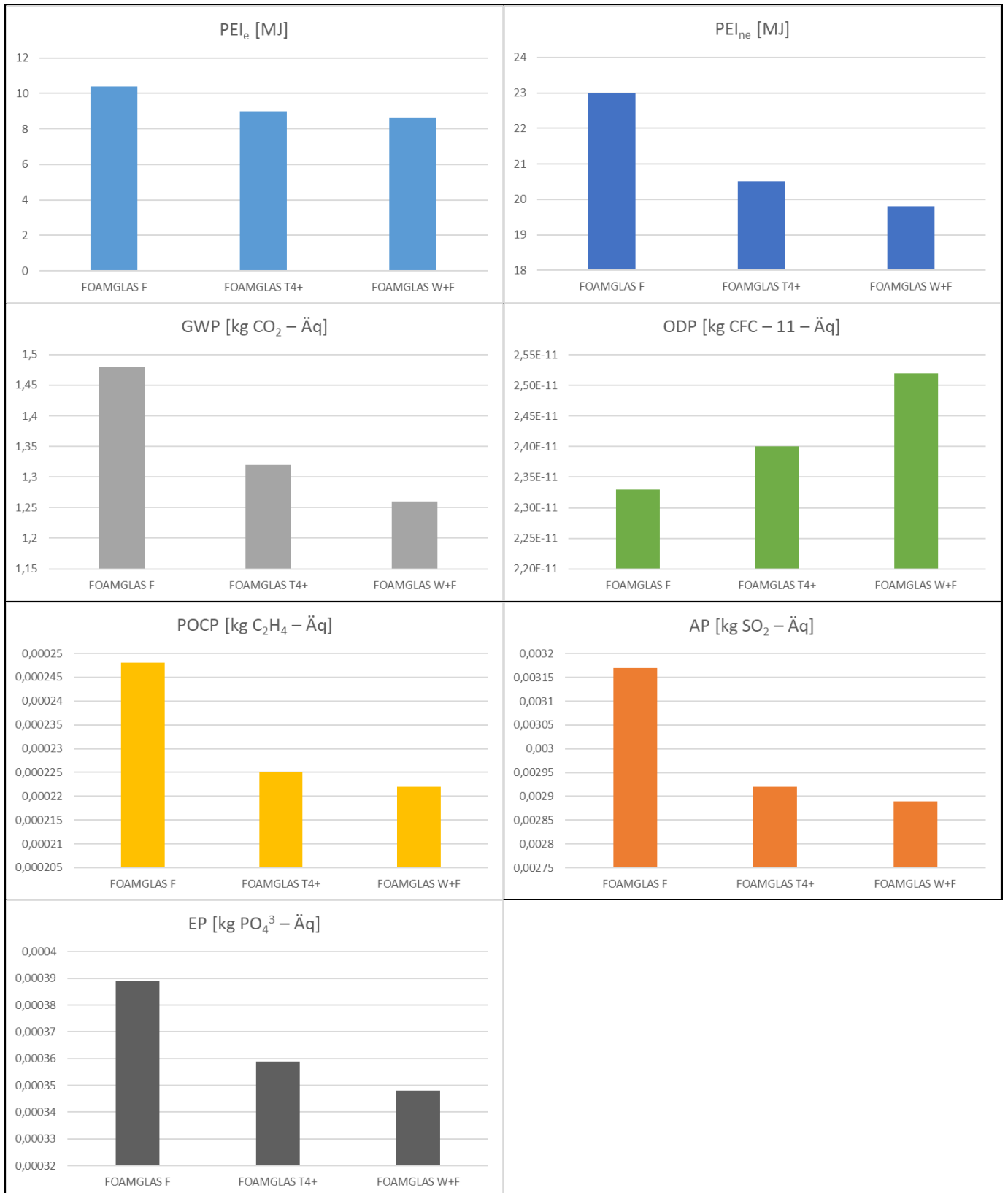


Abbildung 37: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Schaumglas

## BLÄHPERLIT

Blähperlite entsteht durch eine Aufblähung des namensgebenden Ursprungstoffes. Fein gemahlene Perlitkörner werden bei Temperaturen von mehr als 1000°C schnell erhitzt und expandieren infolgedessen. Die entstehenden größeren und gröberen Körner kommen meist zum Auffüllen von Hohlräumen und als Schüttung im Fußboden zur Anwendung. [9]

In der Kategorie Blähperlite werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 49, Abbildung 38). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
TecTem Insulation Board Outdoor	437	4303	267	1,56E-06	0,0498	1,02	0,0913
TecTem Insulation Board Indoor Climaprotect	604	6032	377	1,84E-06	0,0698	1,44	0,129

Tabelle 49: Vergleich der Umweltwirkungen von Blähperlite



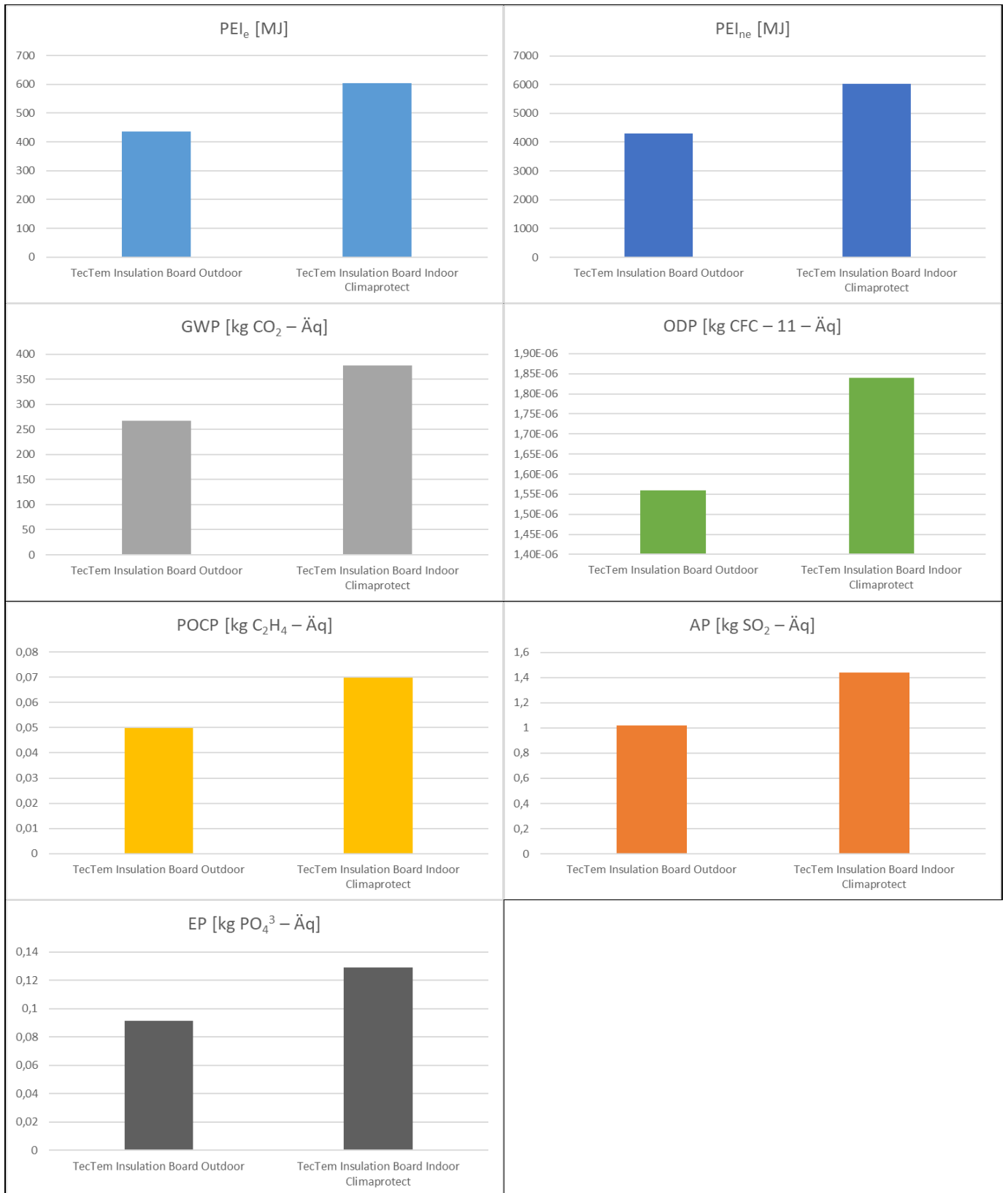


Abbildung 38: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Bläherlit

## HOLZFASERN

Holzfasern können als Platten oder lose Einblasdämmung verbaut werden. Der Einblasdämmstoff entsteht in einem einfachen Arbeitsschritt durch die Zerfaserung von Holzhackschnitzel, wohingegen zur Herstellung der Platten Restholz mithilfe von Hitze und unter Druck zerfasert und anschließend üblicherweise unter Zugabe von Wasser zu einem Brei vermengt und gepresst wird. [9]

In der Kategorie Holzfasern werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 50, Abbildung 39). Hierbei sind bis auf die Nutzungsphase (B1-B7) Daten zu allen Lebenszyklusphasen erfasst außer bei der Holzfaserdämmplatte, die im Nassverfahren hergestellt wurde.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	3598	1853	-214,9	1,91E-10	0,0231	0,1534	0,0258
Holzfaserdämmplatte	3340	2080	-164	8,75E-10	0,0281	0,196	0,0316
Holzfaserdämmstoff	3713	1822	-173	7,85E-07	0,067711	0,305035	0,0697839

Tabelle 50: Vergleich der Umweltwirkungen von Holzfasern

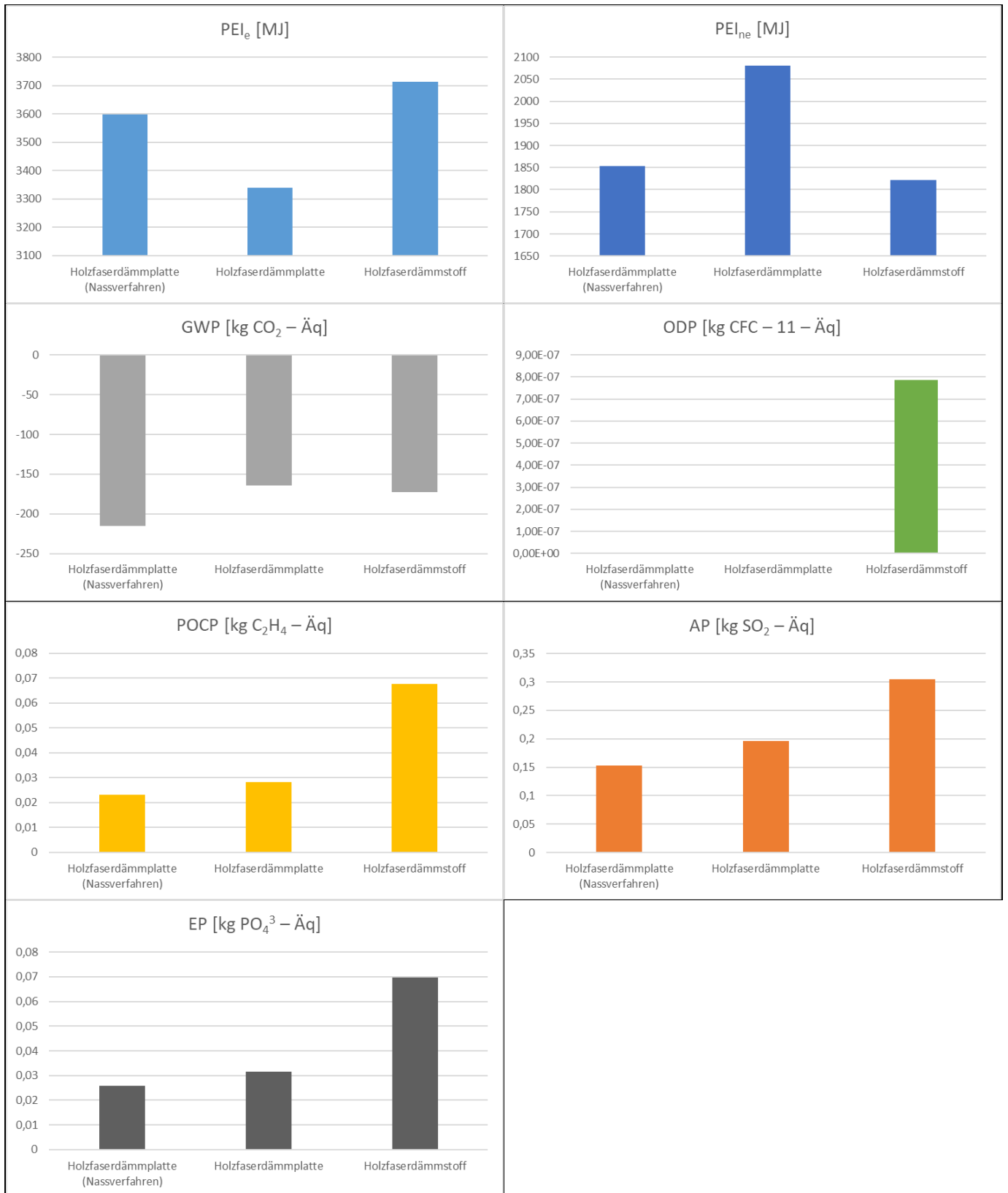


Abbildung 39: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Holzfasern

## ZELLULOSEFASER

Zellulosedämmstoffe werden aus Altpapier hergestellt. Sortierte Druckerzeugnisse werden unter Beigabe von Zusätzen in einem mehrstufigen Zerreiß- und Mahlverfahren mechanisch zerkleinert. Die so entstandenen, losen Flocken können entweder direkt verwendet oder beispielsweise mit Textilfasern zu Matten weiterverarbeitet werden. [9]

In der Kategorie Zellulosefaser werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 51, Abbildung 40). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3), die Phase für das Ende des Lebenszyklus (C1-C4) und das Recyclingpotential (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
ISOCELL- Einblasdämmstoff (frei)	399,6	56,18	-35,86	1,03E-07	0,0024	0,028	0,005
ISOCELL- Einblasdämmstoff (Raum)	927,5	130,4	-83,24	2,36E-07	0,005	0,065	0,012
Zellulosefaserplatten	1421	1999	-11,59	1,43E-09	0,03789	0,7247	0,193

Tabelle 51: Vergleich der Umweltwirkungen von Zellulosefasern

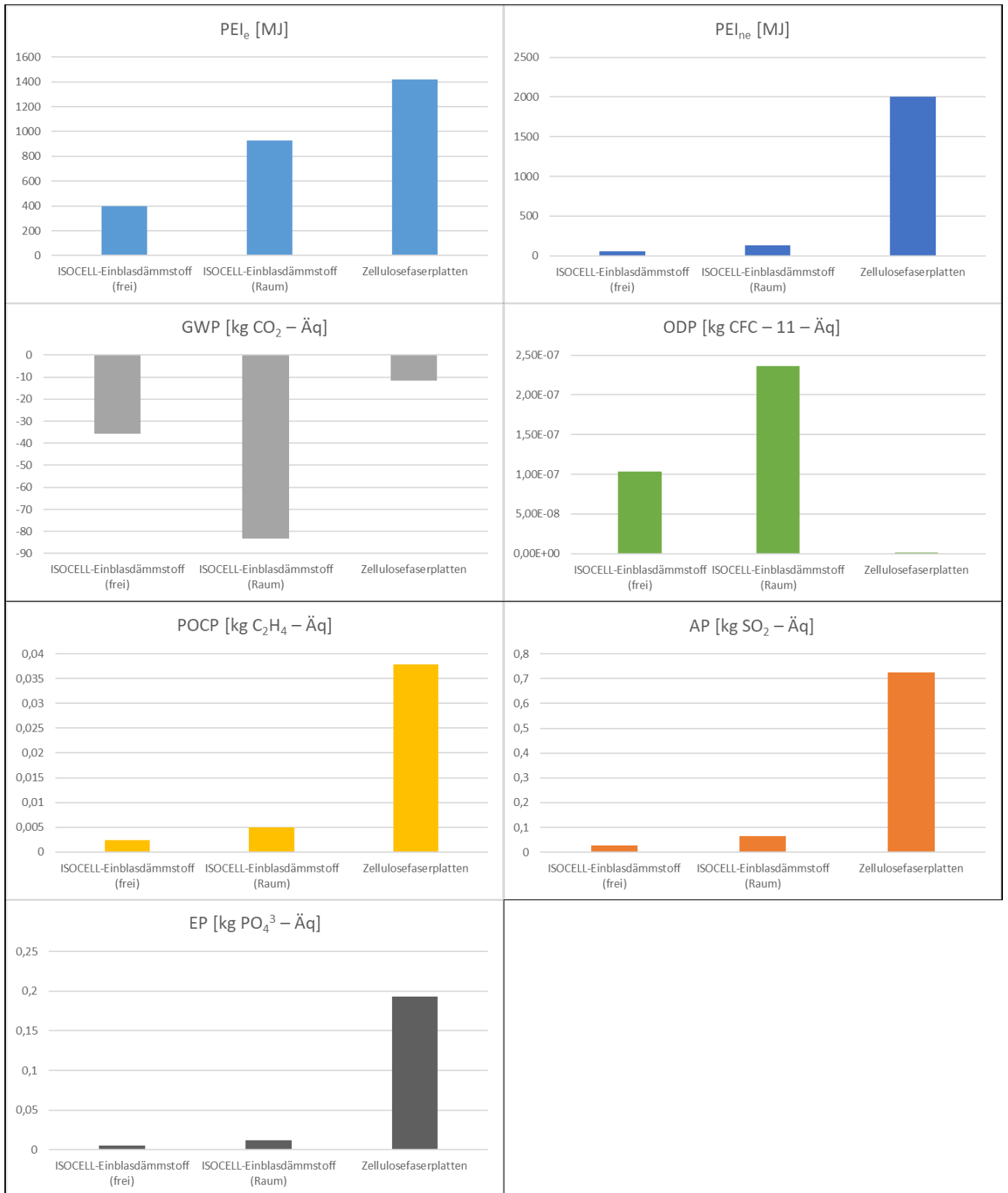


Abbildung 40: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Zellulosefasern

## BAUMWOLLE

Baumwolle besteht fast ausschließlich aus Zellulose und wird zumeist mit Borsalz gegen Nagetiere und Insektenbefall imprägniert. Zur Dämmung werden die Naturfasern als Matte, als Dämmfilz für die Trittschalldämmung in Böden oder als Flocken zum Einblasen in Hohlräume verwendet. [9]

In der Kategorie Baumwolle werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 52, Abbildung 41). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Baumwolle konventionell	24,41	11,71	-0,7779	1,80E-11	0,0003291	0,00757	0,01161
Baumwolle ökologisch	24,15	3,474	-1,476	1,45E-11	0,000123	0,007318	0,008104

Tabelle 52: Vergleich der Umweltwirkungen von Baumwolle

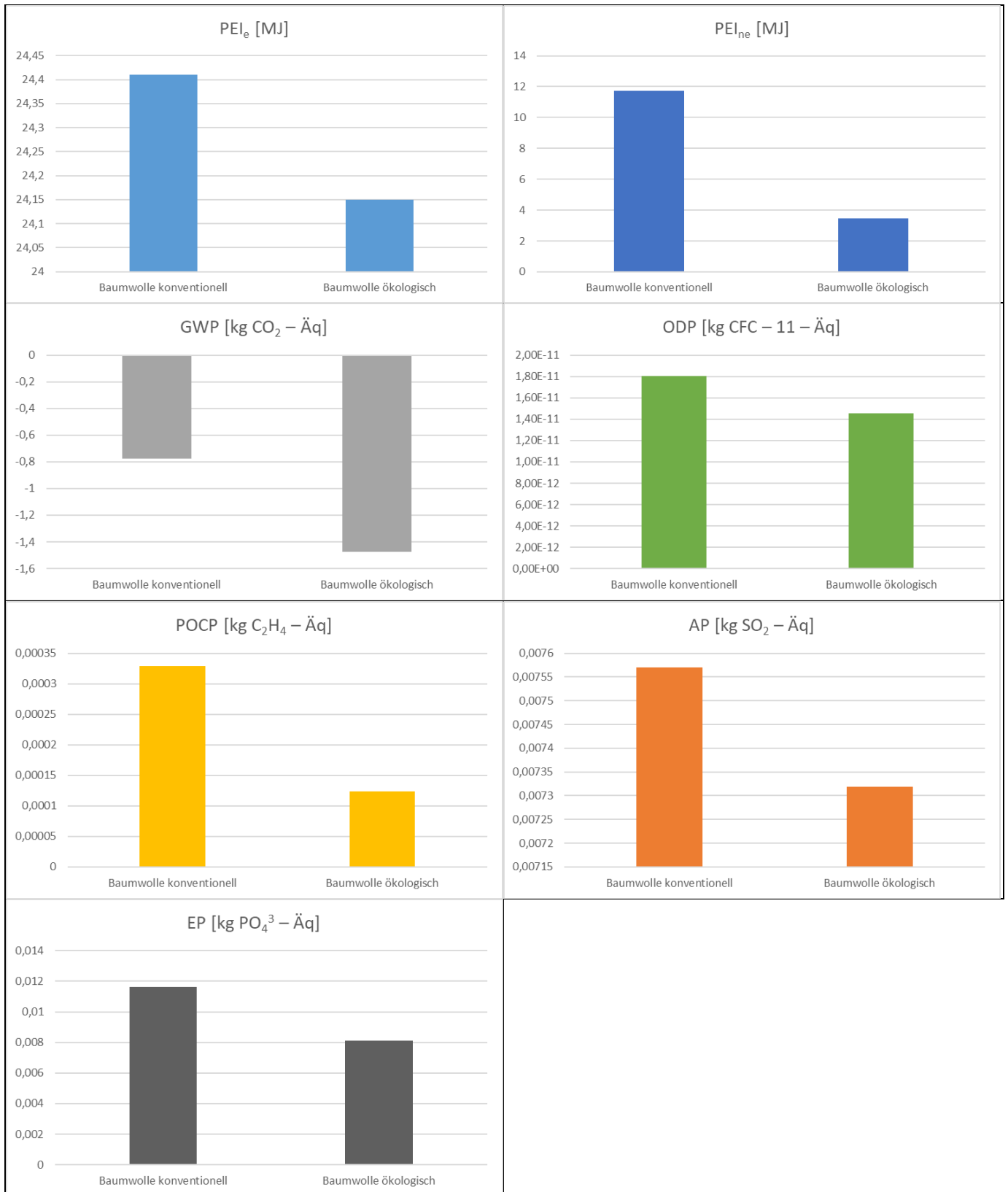


Abbildung 41: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Baumwolle

## KALZIUMSILIKATE

Kalziumsilikat ist ein mineralisch basierender Baustoff, der aus Kalk, Quarzsand, Wasserglas und Zellulose besteht und unter überhitztem Wasserdampf und hohem Druck zu Platten gehärtet wird. Dabei entsteht eine feinporige, offene Struktur mit hoher kapillarer Saugfähigkeit und einem hohen Wasseraufnahmevermögen. [9]

In der Kategorie Calciumsilikate werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 53, Abbildung 42). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Porenbeton Granulat	13,63	64,66	4,96	7,53E-12	-0,004129	0,02504	0,006375
Multipor Mineraleämmplatte	311	1349	101	3,21E-09	0,016	0,186	0,0231

Tabelle 53: Vergleich der Umweltwirkungen von Kalziumsilikaten





Abbildung 42: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Kalziumsilikaten

## 7.3 Holz

### VOLLHOLZ

Als Vollholz werden grundsätzliche Holzwerkstoffe auf Vollholzbasis bezeichnet. Aufgrund der unterschiedlichen verwendeten Strukturelemente werden nämlich Holzwerkstoffe unterteilt in solche auf Vollholzbasis, Furnierwerkstoffe, Spanwerkstoffe, Faserwerkstoffe oder Verbundwerkstoffe. [9]

In der Kategorie Vollholz werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 54, Abbildung 43). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3), die Phase für das Ende des Lebenszyklus (C1-C4) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Hobelware	10860	948,6	-719,2	1,90E-07	0,1016	0,4506	0,09855
Laubschnittholz getrocknet	22860	1462	-1120	1,75E-07	0,1878	1,182	0,26
Nadelschnittholz frisch	8504	433,4	-763,8	2,45E-08	0,01587	0,1446	0,03272
Nadelschnittholz getrocknet	10270	730,6	-734,7	1,07E-07	0,0927	0,3773	0,08392
Schnittholz frisch	8145	249,6	-778,8	3,05E-10	0,005712	0,1183	0,02725
Schnittholz gehobelt	9308	332,4	-755	4,54E-10	0,08236	0,2532	0,05122
Schnittholz trocken	9485	3300	-784	4,97E-10	0,08255	0,2419	0,04926
Konstruktionsvollholz	10610	1256	-709,4	2,51E-07	0,1024	0,4823	0,1067
Balkenschichtholz	10670	1933	-671,4	5,74E-07	0,1105	0,5541	0,1239
Brettschichtholz (Durchschnitt)	10850	2391	-643,2	8,825E-07	0,1251	0,6437	0,1505
Brettschichtholz (Sonderformen)	10850	2391	-643,2	8,825E-07	0,1251	0,6437	0,1505
Brettschichtholz (Standardformen)	11350	2316	-652,6	8,833E-07	0,1316	0,696	0,1625
Admonte Massivholzmehrschichtprodukte	1504	101,3	-6,446	1,05E-07	0,003757	0,02709	0,00531
Brettsperrholz	10580	2178	-633,4	6,54E-07	0,1121	0,5667	0,1254

Tabelle 54: Vergleich der Umweltwirkungen von Vollholz



Abbildung 43: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Vollholz

## HOLZWERKSTOFFE

Holzwerkstoffe werden durch das Zerkleinern von Holz und anschließendes Zusammenfügen der Strukturelemente erzeugt. Größe und Form der Holzpartikel entscheiden maßgeblich über die Art des Holzwerkstoffes und über seine Eigenschaften. Die Holzpartikel können mit Bindemitteln und/oder mechanisch verbunden sein.

In der Kategorie Holzwerkstoffe werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 55, Abbildung 44). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3), die Phase für das Ende des Lebenszyklus (C1-C4) und die Recyclingphase (D) vorhanden. [9]

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
3- und 5-Schicht Massivholzplatte	10390	2397	-637,3	1,34E-06	0,117	0,5706	0,1385
Drei-Schichtholzplatte	26495,9	1605	-686,6	2,42E-10	0,05449	1,306	0,2595
Fünf-Schichtholzplatte	26353,3	1038	-710,8	1,83E-10	0,02323	1,117	0,2377
Furniersperrholz	34123,2	6691	-836,9	6,68E-06	0,3425	1,664	0,4523
Sperrholzplatte	14468,3	3444	-724,4	6,14E-10	0,06953	1,171	0,2125
Furnierschichtholz	16026,6	6586	-469,2	4,32E-10	0,02737	1,194	0,2477
Oriented Strand Board	12638,4	8226	-580,7	4,06E-06	0,6729	1,371	0,1869
SWISS KRONO OSB	12766	4808	-760,5	1,36E-04	0,1503	1,039	0,1392
Eurodekor beschichtete Spanplatten	142,6	94,41	-13,29	9,68E-09	0,004259	0,02358	0,005956
Eurolight beschichtet	236,7	179,6	-7,859	2,74E-10	0,006602	0,02768	0,007335
Eurolight roh	230,3	150,4	-9,853	2,35E-10	0,005678	0,02374	0,006347
Eurospan Rohspanplatten	7767	3781	-811,9	2,47E-08	0,1972	1,122	0,2796
MDF (Roh)	17533,6	7531	-668,6	3,58E-08	0,378	1,276	0,4844
Röhrenspanplatte	6658	2630	-267,3	2,28E-06	0,1443	0,3224	0,09974
Spanplatte	17003,6	7054	-812,9	1,98E-01	1,224	0,1918	0,00002586
Spanplatte, melaminbeschichtet	9564	5402	-662,8	8,96E-06	0,2743	0,6543	0,2317
Spanplatte, roh	9193	3876	-784	5,12E-06	0,2414	0,4551	0,1586
DHF-Platte	16200	3385	-748,8	3,30E-09	2,695	3,44	0,9675
Hochdichte Faserplatte	16095	7434	-822,7	9,15E-06	0,4013	1,029	0,3298
MDF beschichtet	350,7	201	-8,1	1,22E-08	0,008861	0,03185	0,01218
Mitteldichte Faserplatte	15169,5	6963	-697,9	8,30E-06	0,3714	0,9823	0,3085
WPC Fassadenelemente	85,29	235	-0,558	3,72E-09	0,002705	0,01763	0,002047
WPC Terrassendielen	202,3	535	0,253	9,56E-09	0,007819	0,04391	0,005488

Tabelle 55: Vergleich der Umweltwirkungen von Holzwerkstoffen



Abbildung 44: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Holzwerkstoffen

## HOLZBÖDEN

Holzböden sind Fußbodenbeläge aus Holz, vorzugsweise aus Hartholz von Laubbäumen, das in kleine Stücke gesägt und zu Mustern zusammengesetzt ist. Trotz ihrer Holzdekore zählen Lamine nicht zu den Holzböden [9], sind aber im Folgenden zum Vergleich aufgeführt.

In der Kategorie Holzböden werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>2</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 56, Abbildung 45). Bis auf die Steinwolle sind auch hier nur Daten für die Herstellungsphase vorhanden (A1-A3).

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Laminatboden DPR	177	85,2	-4,46	1,17E-08	0,00243	0,0167	0,00478
Laminatfußboden DPL	163	106	-4,03	9,23E-10	0,00813	0,0155	0,00532
Massivholzböden	717,70	131,36	-11,374	1,52E-06	0,00785	0,0466	0,010568
Massivholzparkett	741	101,2	-12,1	1,74E-07	0,007541	0,04715	0,01086
Mehrschichtparkett	490	145,6	-5,147	5,27E-07	0,006463	0,04427	0,01
Stabparkett	249,4	79,29	-14,72	7,15E-12	0,0123	0,03591	0,007965
Korkplatten 4mm	36,91	14,05	-1,929	4,15E-12	-0,000515	0,002634	0,0007115
Korkplatten 6mm	55,36	21,07	-2,893	6,23E-12	-0,0007726	0,003951	0,001067
Korkplatten 8mm	73,81	28,1	-3,858	8,31E-12	-0,00103	0,005269	0,001423

Tabelle 56: Vergleich der Umweltwirkungen von Holzböden

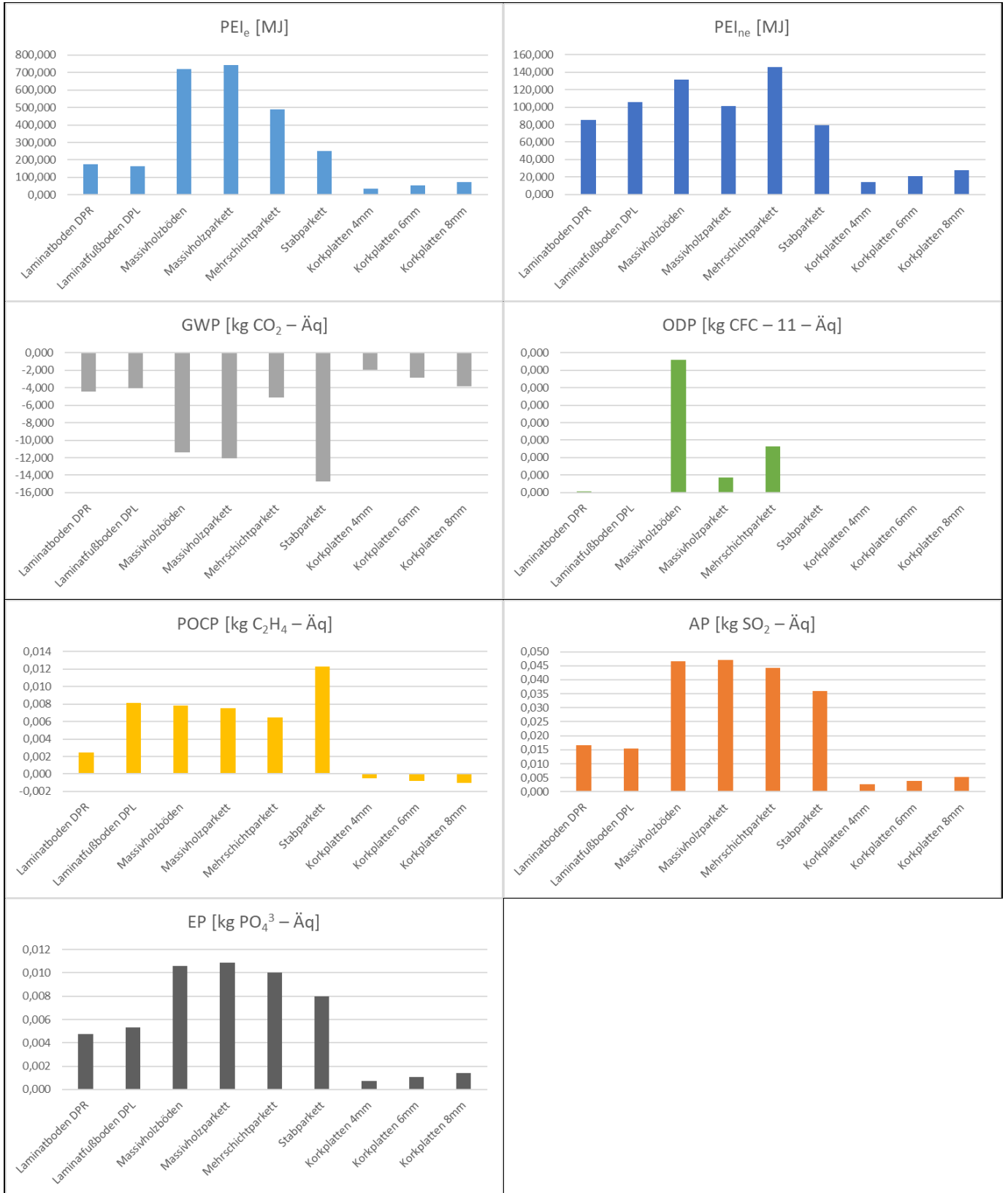


Abbildung 45: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Holzböden

## 7.4 Metalle

### STAHL UND EISEN

In der Werkstoffwissenschaft gilt alles schmiedbare Eisen ohne Nachbehandlung als Stahl. Er zeichnet sich durch hohe Festigkeit, gute Bearbeitbarkeit durch Gesenkschmieden und Umformen und vor allem durch geringe Werkstoffkosten aus. Großer Nachteil ist die Oxidbildung, was zur Folge hat, dass Bauteile aus Stahl dauerhaften Korrosionsschutz benötigen. [9]

In der Kategorie Stahl und Eisen werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 57, Abbildung 46). Es sind hier Daten großteils für die Herstellungsphase (A1-A3), der Phase des Endes des Lebenszyklus (C1-C4) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Bewehrungsstahl	3,302	9,436	0,7448	2,66E-12	0,0002886	0,001621	0,0001984
Baustähle	0,84	17,8	1,735	1,39E-10	0,000698	0,00352	0,00037
MSH-Profile	1,229	26,97	2,605	2,724E-11	0,001163	0,008324	0,0007288
Stahlprofil	2,745	11,46	1,039	3,72E-12	0,0003723	0,002286	0,0002443
Stahl Feinblech	0,9594	22,35	2,459	8,91E-12	0,0007474	0,005686	0,0005445
Gewindefurchende Schrauben (Bi-Metall)	10,6	74,1	5,3	2,23E-07	0,00329	0,05891	0,00193
Gewindefurchende Schrauben (Stahl)	5,83	41,4	2,91	1,14E-09	0,000563	0,007195	0,00066

Tabelle 57: Vergleich der Umweltwirkungen von Stahl und Eisen



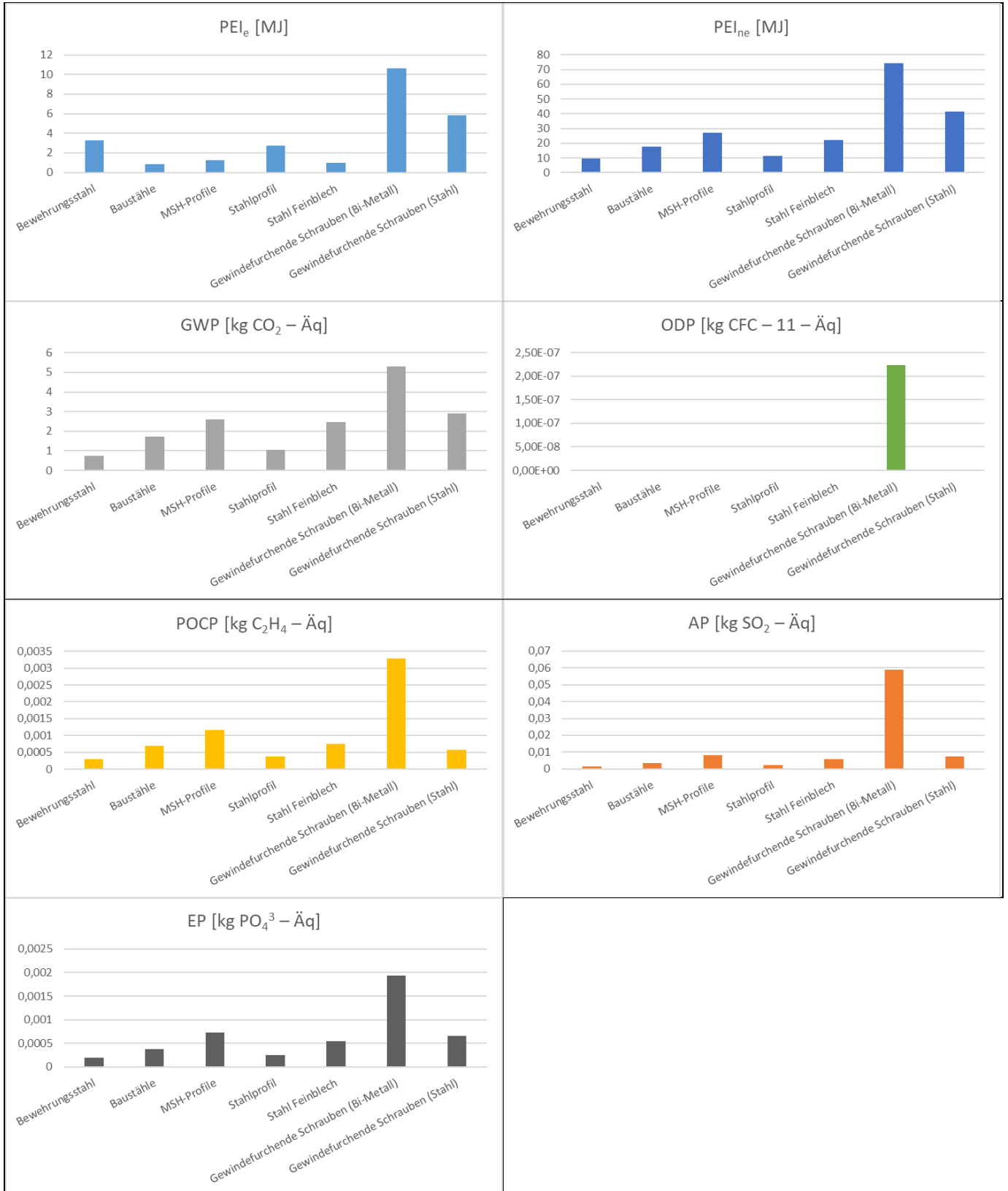


Abbildung 46: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Stahl und Eisen

## EDELSTÄHLE

Als Edelstahl werden legierte oder unlegierte Stähle mit hohem Reinheitsgrad bezeichnet. Allgemein wird Edelstahl für nichtrostenden Stahl verwendet, hängt aber eigentlich von der jeweiligen Legierung wie des Stahls ab, wie z.B Chrom oder Nickel und muss nicht zwingend nichtrostende Eigenschaften besitzen. Im Gegensatz zu Stahl werden bei Edelstahl höhere Preise aufgrund der Bearbeitung und höherer Werkstoffkosten veranschlagt. [9]

In der Kategorie Edelstahl werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 58, Abbildung 47). Es sind hier Daten größtenteils für die Herstellungsphase (A1-A3), der Phase des Endes des Lebenszyklus (C1-C4) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Edelstahlblech	7,927	44,56	3,606	3,73E-11	0,001132	0,02211	0,001325
Edelstahl Trinkwasserrohr	7,564	46,67	3,911	4,69E-11	0,001362	0,02401	0,001393
Gewindefurchende Schrauben	12,6	88	6,29	2,62E-07	0,00385	0,06912	0,00227

Tabelle 58: Vergleich der Umweltwirkungen von Edelstählen

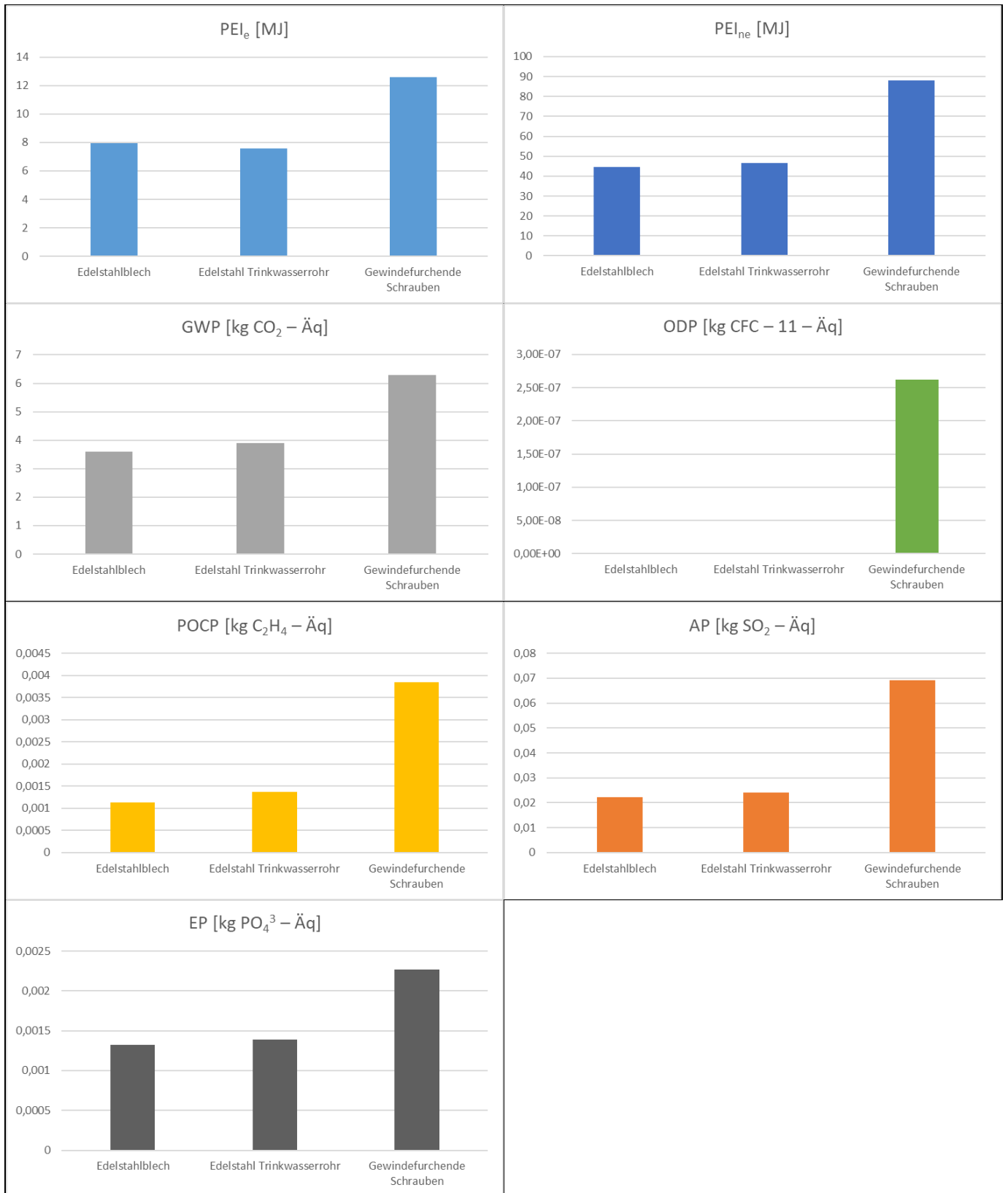


Abbildung 47: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Edeltählen

## ALUMINIUM

Ausgangsstoff für die Herstellung des Leichtmetalls Aluminium ist das Erz Bauxit. Nach einem chemischen Reinigungsverfahren wird anschließend in einem elektrolytischen Verfahren Reinaluminium hergestellt. Unter dem Oberbegriff Aluminium werden heute sowohl Reinaluminium als auch Aluminiumlegierungen bezeichnet. Aufgrund des geringen Gewichts von  $2,7 \text{ g/cm}^3$  (1/3 von Stahl), der guten Korrosionsbeständigkeit und der guten Weiterverarbeitbarkeit findet Aluminium viele Anwendungen im Bauwesen. [9]

In der Kategorie Aluminium werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 59, Abbildung 48). Es sind hier Daten für die Herstellungsphase (A1-A3), der Phase für das Ende des Lebenszyklus (C1-C4) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Aluminiumblech	43,76	145,9	10,62	9,92E-11	0,0023	0,03877	0,002647
Aluminium Profil	45,29	148,9	10,85	1,00E-10	0,002292	0,03898	0,002671

Tabelle 59: Vergleich der Umweltwirkungen von Aluminium



Abbildung 48: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Aluminium

## KUPFER

Der glänzend hellrote Baustoff Kupfer, der v.a. in Fassaden eingesetzt wird, besteht zu 100% aus Cu-DHP. Der Werkstoff ist sehr gut formbar, zeichnet sich durch seine Beständigkeit aus und ist sehr langlebig. Bei Kontakt mit Luft bildet sich eine Oxidschicht, die dem Stoff nach und nach seine grüne Patina verleiht. [9]

In der Kategorie Kupfer werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 60, Abbildung 49). Es sind hier Daten für die Herstellungsphase (A1-A3), der Phase des Endes des Lebenszyklus (C1-C4) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Blanke Kupfer-Hausinstallationsrohre	3,63	21,8	1,97	4,26E-11	0,000506	0,00809	0,000791
Innenverzinnte Kupfer-Hausinstallationsrohre	5,33	45,5	3,5	8,67E-11	0,000709	0,0101	0,00103
PE-Schaum ummantelte Kupfer-Hausinstallationsrohre	4,36	38,7	2,29	9,51E-11	0,000652	0,00816	0,000745
PE-ummantelte Kupfer-Hausinstallationsrohre	2,97	45,8	2,07	1,14E-10	0,000766	0,00713	0,000634
PU-Schaum ummantelte Kupfer-Hausinstallationsrohre	4,35	49,9	2,85	1,14E-10	0,00094	0,00879	0,000988
PVC-ummantelte Kupfer-Hausinstallationsrohre	3,63	31,4	1,83	1,15E-10	0,000831	0,0063	0,000738

Tabelle 60: Vergleich der Umweltwirkungen von Kupfer

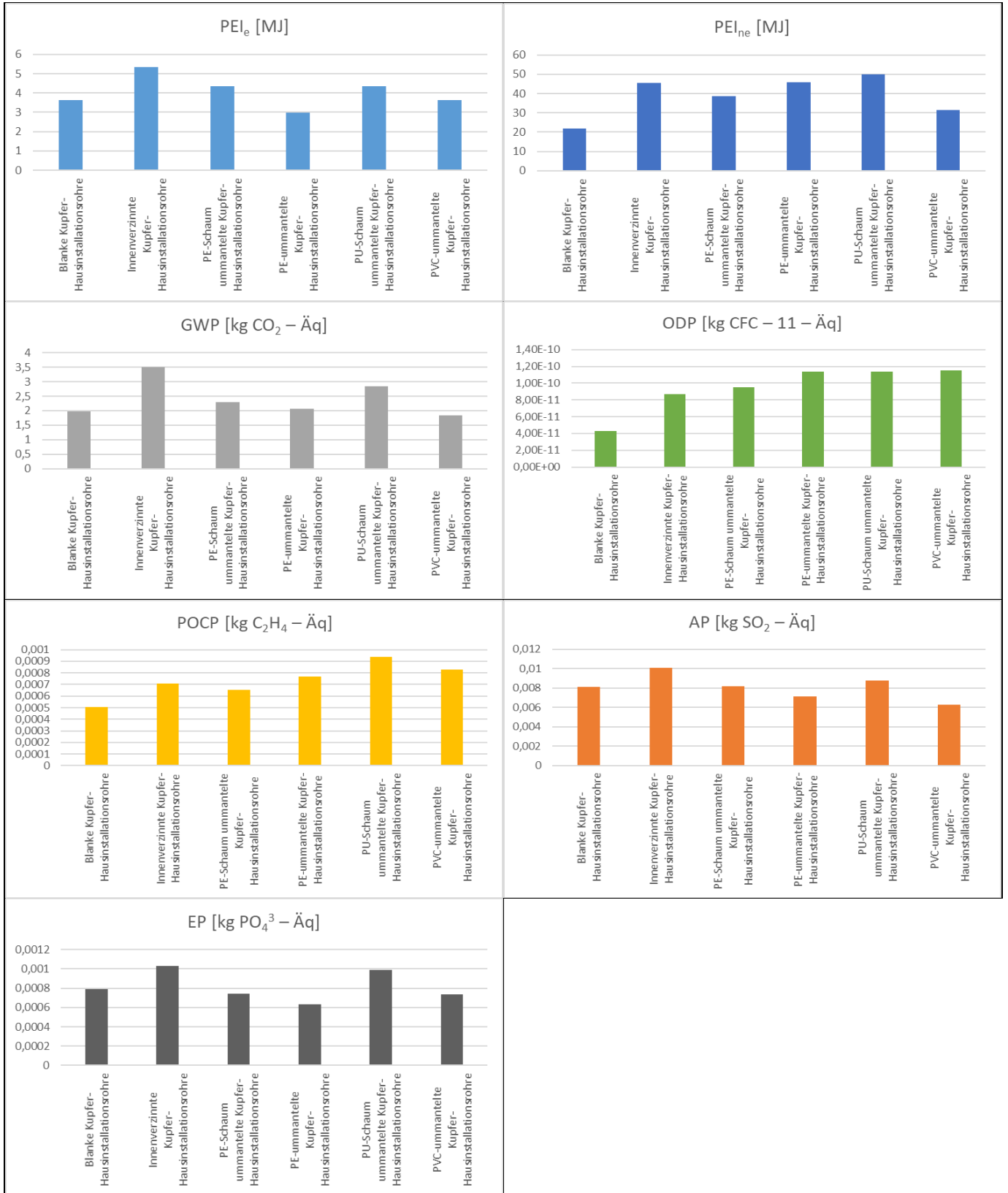


Abbildung 49: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Kupfer

## ZINK

Zinkbleche werden für Dacheindeckungen, für Anschlüsse, für Regenrinnen und Fallrohre, als Fassadenbekleidung sowie für Abdeckungen und Außenfensterbänke verwendet. Legiertes Zink, Titanzink, ist korrosionsfester, weniger spröde und dadurch mechanisch deutlich belastbarer als reiner Zink. Außerdem wird Zink mitunter als Oberflächenkorrosionsschutz für andere Metalle (z.B. Stahl) benutzt. Das Material hat eine geringe Wärmedehnung, geringe Abtragungsraten und kann sehr gut verarbeitet werden. [9]

In der Kategorie Zink werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 61, Abbildung 50). Es sind hier Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
NedZink Naturel	1,27	19,7	1,71	9,89E-08	0,000123	0,0114	0,00217
NedZink NOVA	1,37	22,2	2,09	1,11E-07	0,000203	0,012	0,00326

Tabelle 61: Vergleich der Umweltwirkungen von Zink



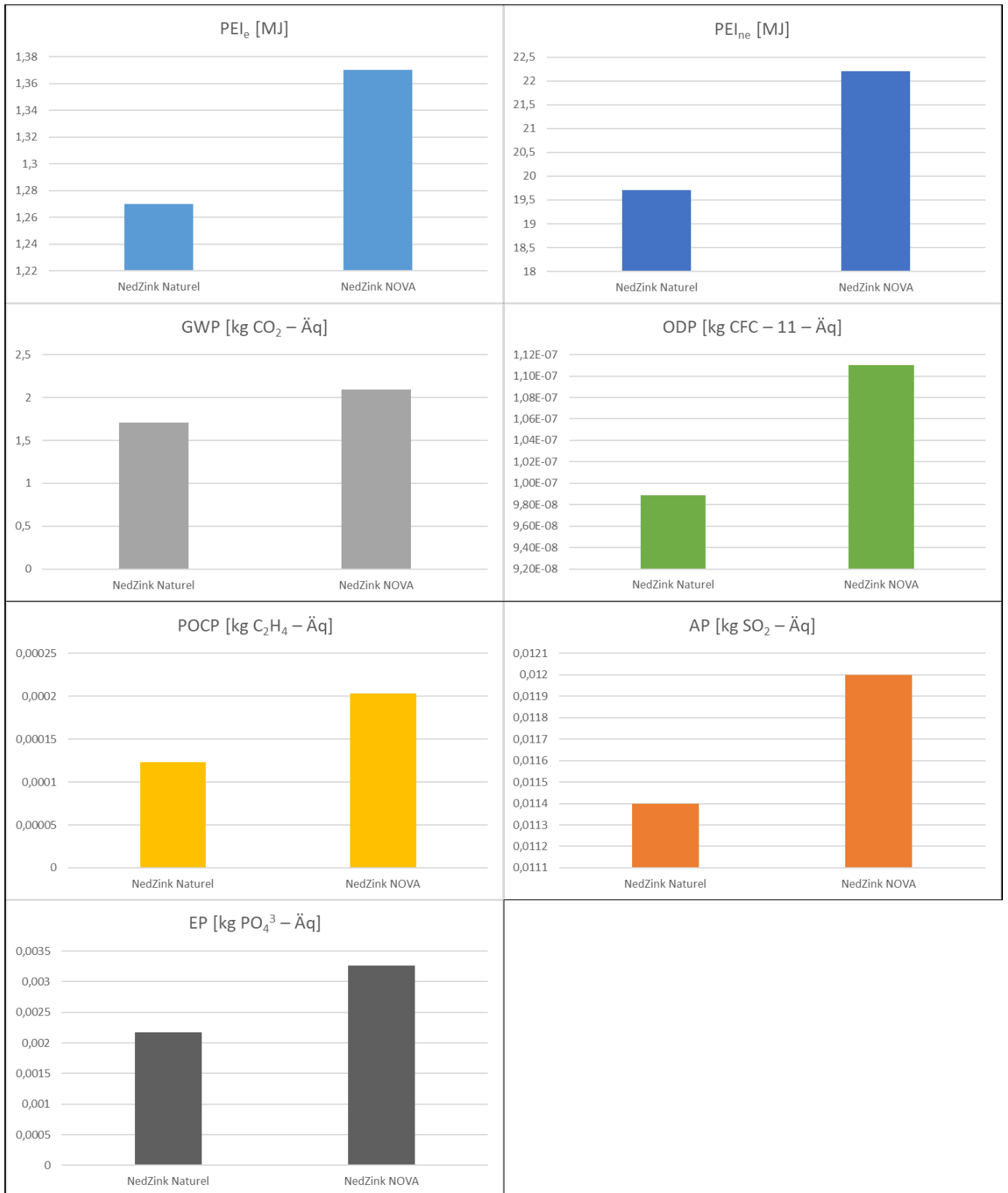


Abbildung 50: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Zink

## OBERFLÄCHENBEHANDLUNGEN

Neben Stahl und Aluminium finden vor allem Kupfer, Blei, Zinn und Zink Verwendung bei Oberflächenbehandlungen. Diese treten meistens als Legierungen in Erscheinung, da sie im Vergleich zu Reinmetallen über bessere Werkstoffeigenschaften verfügen. [9]

In der Kategorie Oberflächenbehandlungen werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 62, Abbildung 51). Es sind hier nur Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Eloxiertes Aluminiumblech	27,15	93,81	6,502	1,52E-11	0,0008566	0,01068	0,002259
Metallbeschichtung	5,064	35,78	2,288	3,55E-12	0,001935	0,004494	0,0004795
Metalllack	4,332	34,42	2,44	3,98E-12	0,003248	0,008314	0,0004024

Tabelle 62: Vergleich der Umweltwirkungen von Oberflächenbehandlungen

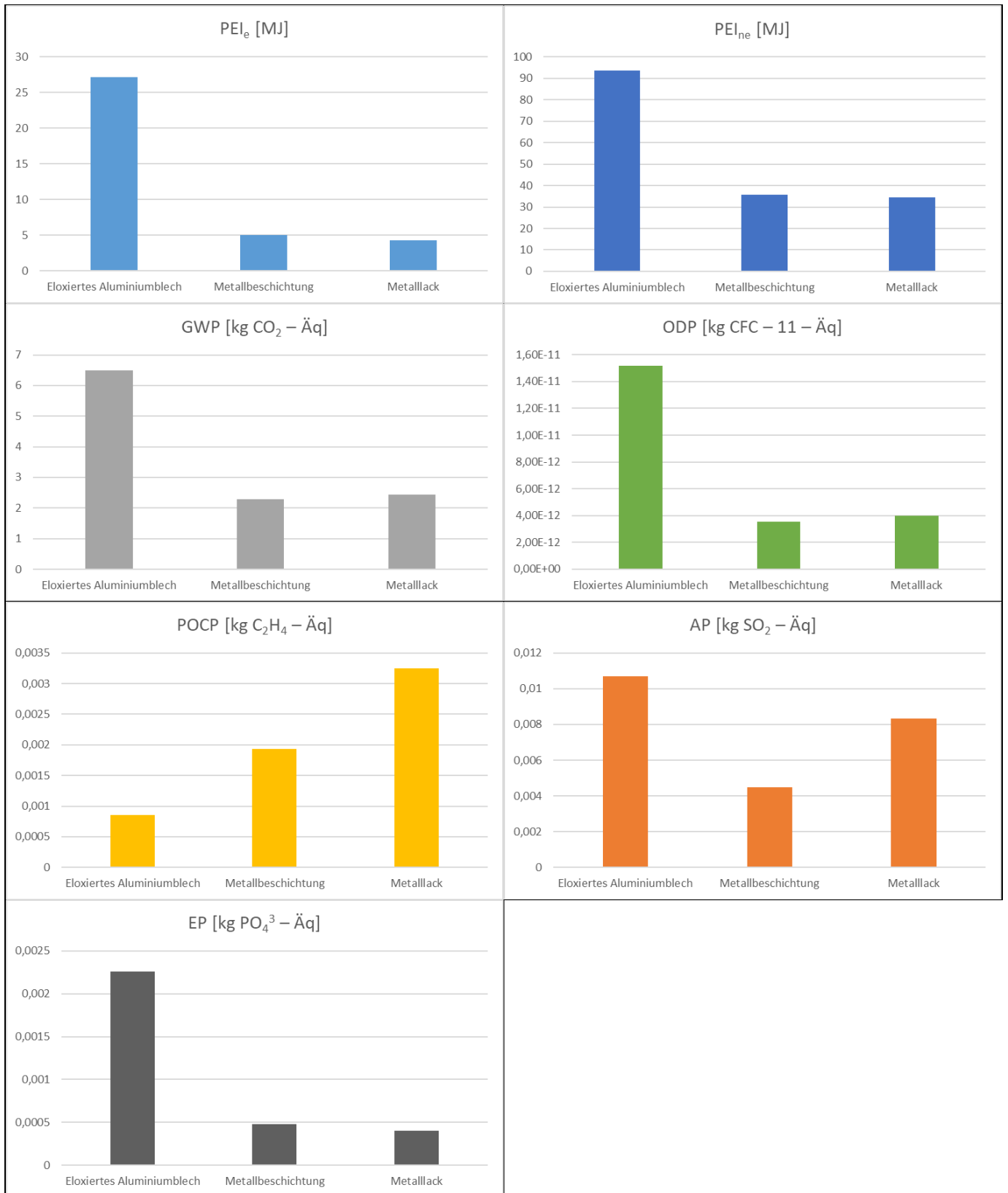


Abbildung 51: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Oberflächenbehandlungen

## 7.5 Beschichtungen

### GRUNDIERUNGEN

Grundierungen werden zur Vorbereitung von Bodenbelagsarbeiten ausgeführt. Eine Abstimmung auf den Untergrund sowie den Mörtel ist absolut notwendig und wird je nach Funktion unternommen. Zumeist werden Grundierungen in einem vorgegebenen Wasserverhältnis bei ca. 5°C bis 25°C vor Ort gemischt. Üblich sind heutzutage lösemittelfreie Varianten, entweder Dispersionsgrundierungen auf Kunstharzbasis oder Zweikomponentige Grundierungen auf Epoxidharzbasis. [9]

In der Kategorie Grundierungen werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 63, Abbildung 52). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3), die Errichtungsphase (A4-A5) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Dispersionsbasierte Grundierungen (a)	2,77	50,2	2,29	5,72E-10	0,0017	0,0241	0,000714
Dispersionsbasierte Grundierungen (b)	3,94	74,7	3,95	1,01E-09	0,00176	0,0287	0,00113
Dispersionsputz	3,19	22,4	1,22	1,08E-10	0,000561	0,00959	0,000412
Dispersionsilikatschutz	2,41	17,9	0,946	7,87E-11	0,000416	0,00683	0,000339
Silikonharzputz	4,06	25,2	1,39	1,24E-10	0,000608	0,0102	0,000477

Tabelle 63: Vergleich der Umweltwirkungen von Grundierungen

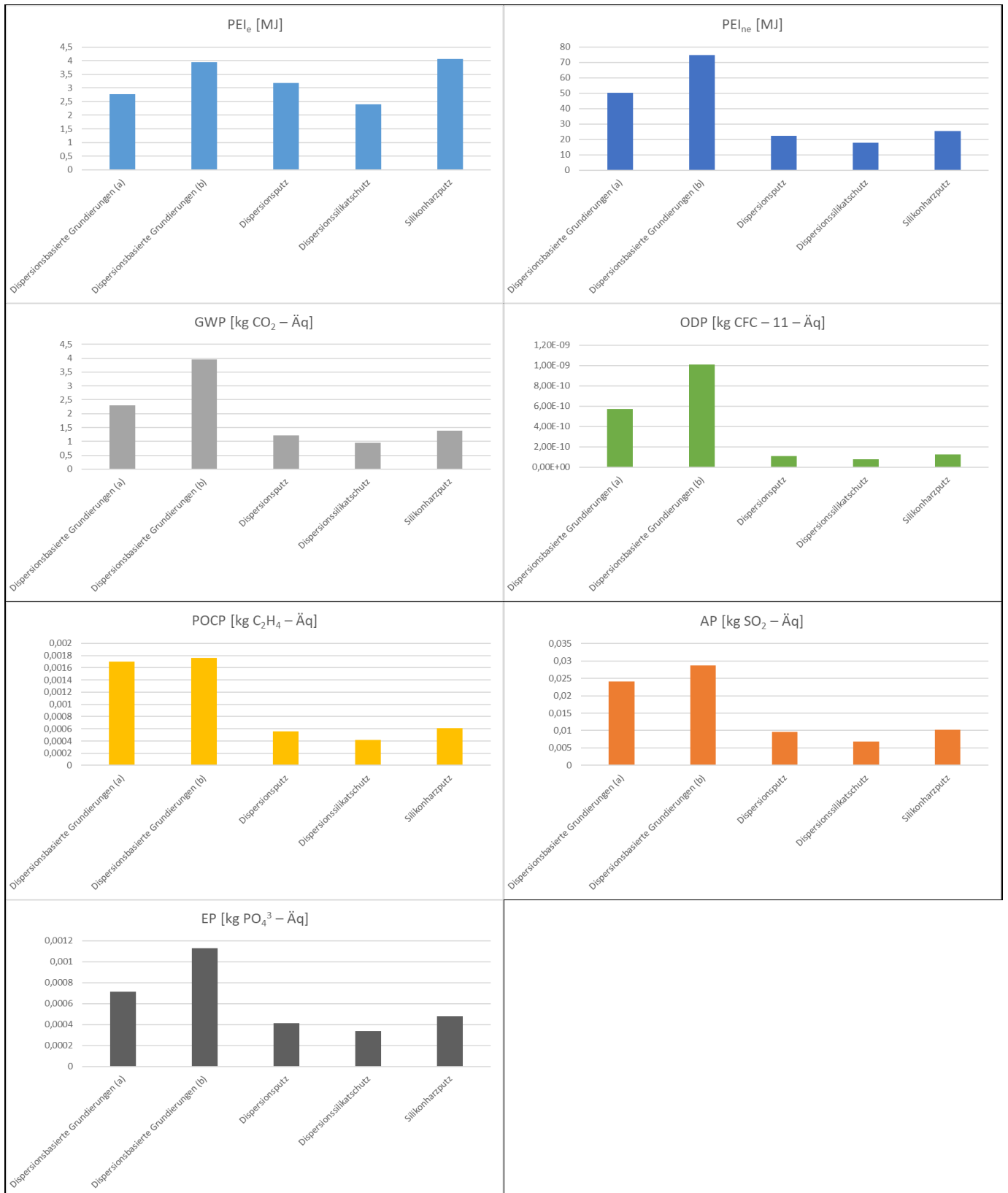


Abbildung 52: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Grundierungen

## FASSADENFARBEN

Die sichtbare Strahlung (380 nm –780 nm) wird in ihrer Gesamtheit als weißes Licht wahrgenommen. Werden die einzelnen Wellenlängen jedoch nochmals aufgespalten, werden die Spektralfarben sichtbar, da jede Wellenlänge eine charakteristische Farbe hat. Je nach Oberflächenbeschaffenheit eines Körpers wird ein Teil der Strahlung reflektiert, und der andere absorbiert. [9] Das bedeutet, dass bei der Auswahl der Fassadenfarben einerseits die Beschaffenheit des Ausgangsstoffes maßgebend für die Farbe ist und andererseits der spätere Verwendungszweck und die Art der Beleuchtung zu beachten sind.

In der Kategorie Fassadenfarben werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 64, Abbildung 53). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3), die Errichtungsphase (A4-A5) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Dispersionsfarbe	4,884	44,79	2,261	5,06E-12	0,0008897	0,0096	0,0007327
Silikat-Dispersionsfarbe	3,553	26,22	1,457	3,43E-12	0,0004623	0,006308	0,0004837
Silikonharzfarbe	4,24	23	1,371	8,90E-12	0,0007973	0,01847	0,0004512

Tabelle 64: Vergleich der Umweltwirkungen von Fassadenfarben

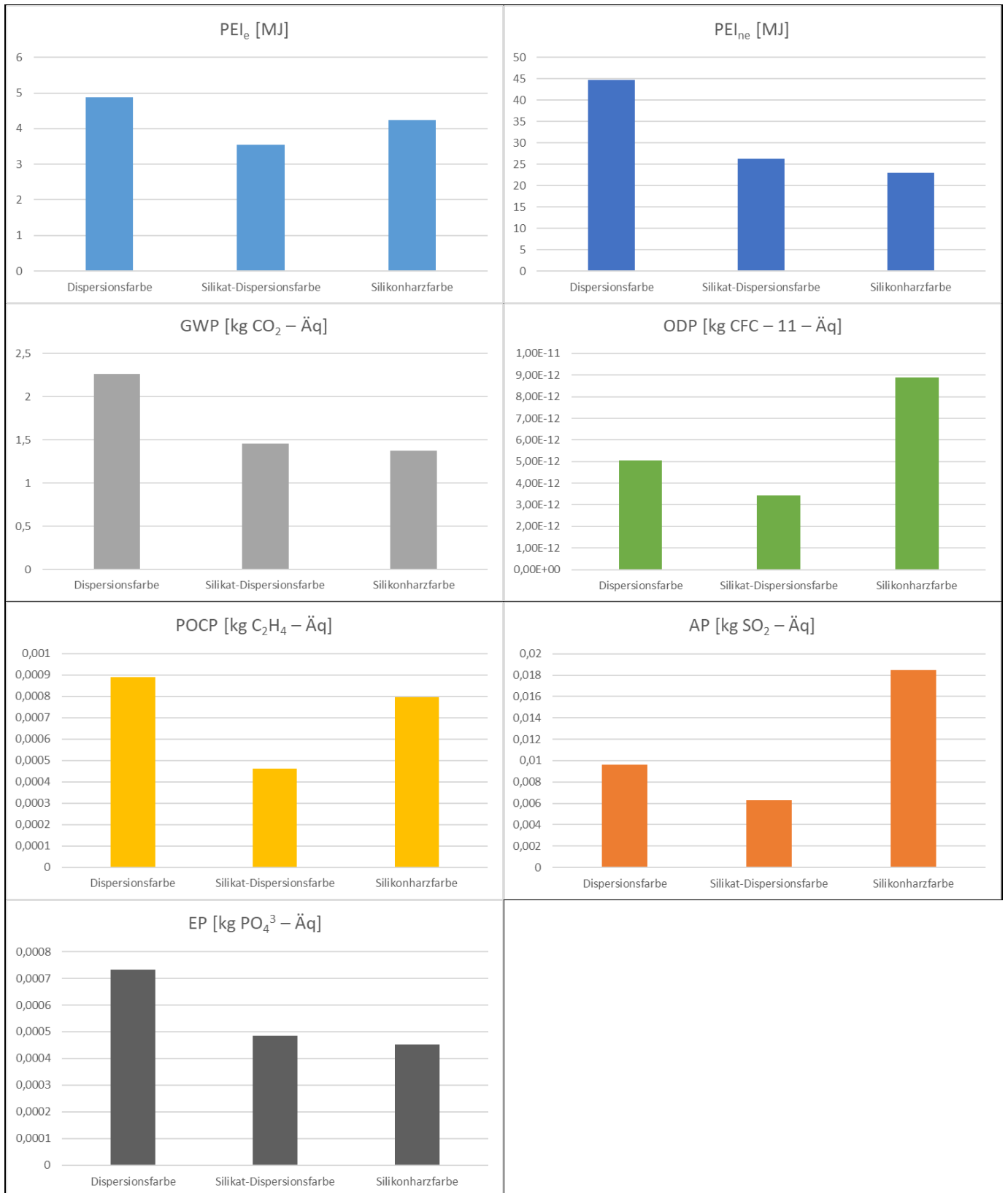


Abbildung 53: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Fassadenfarben

## LACKE UND LASUREN

Lacke und Lasuren finden sehr vielseitige Anwendungsbereiche. Allen gemeinsam ist ihre materialschützende Wirkung. In der Regel liegt die Dicke einer Beschichtung zwischen 0,5 µm und 60,0 µm [9]

In der Kategorie Lacke und Lasuren werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 65, Abbildung 54). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3), die Errichtungsphase (A4-A5) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Lacksysteme Holzfenster Decklack	5,067	43,18	2,238	3,57E-12	0,0009065	0,009689	0,0007147
Lacksysteme Holzfassade deckend	5,692	57,31	2,955	8,57E-12	0,001081	0,02108	0,0008245
Lacksysteme Holzfassade halb-pigmentiert	3,744	63,76	2,931	3,88E-12	0,0005757	0,004341	0,0007512
Parkettlack (Grundierung Holz)	5,694	73,21	3,626	6,32E-12	0,000824	0,005037	0,0006949
Parkettlack transparent	3,25	36,97	1,898	4,29E-12	0,0005587	0,003115	0,000376
Lösemittellack	3,246	77,72	3,37	9,63E-12	0,002151	0,03238	0,0006958
Pulverlackierung	7,813	94,63	5,097	2,02E-11	0,002746	0,06637	0,001251
Wasserlack	5,01	44,44	2,449	5,46E-12	0,0009789	0,01021	0,0008179

Tabelle 65: Vergleich der Umweltwirkungen von Lacken und Lasuren



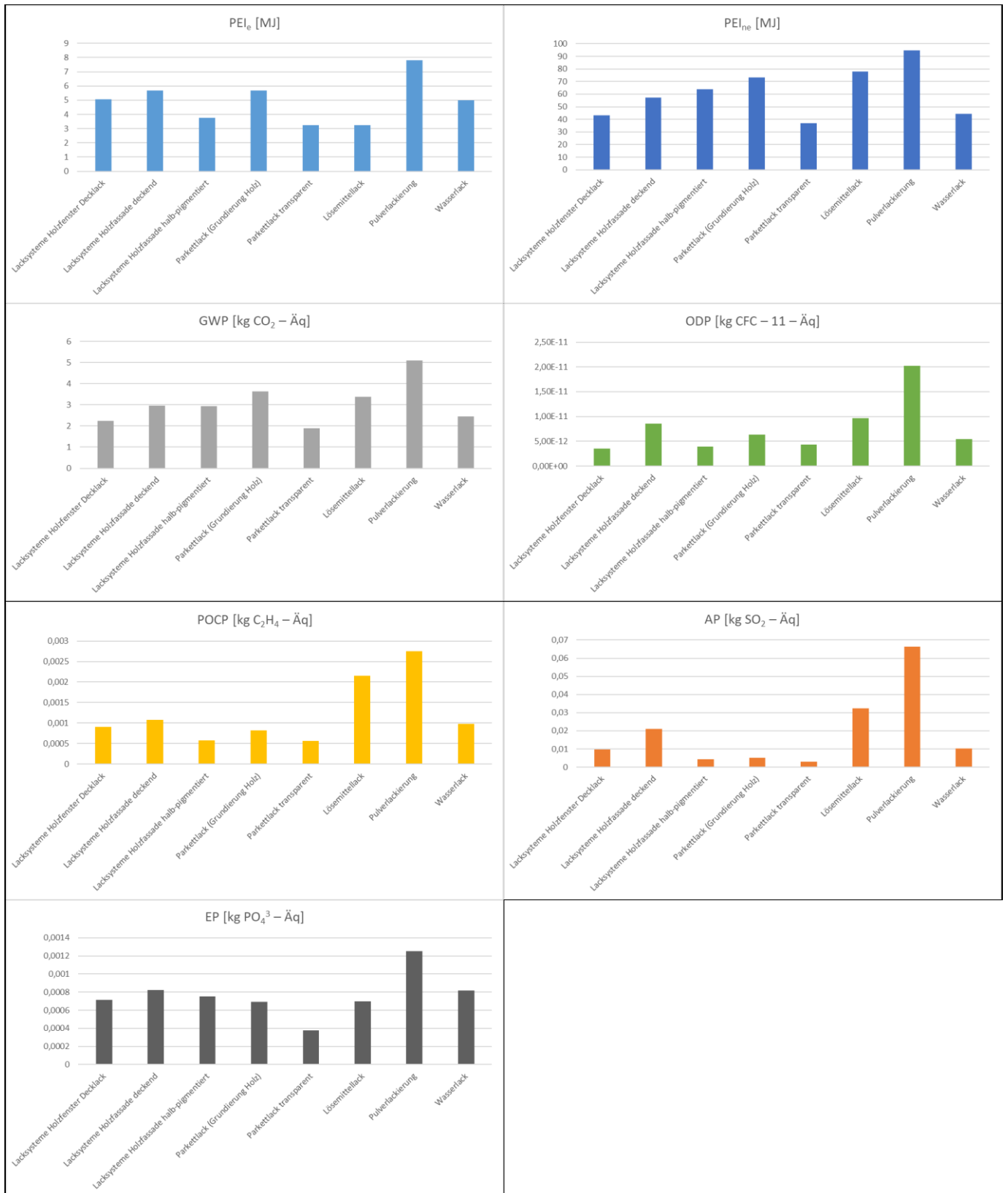


Abbildung 54: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Lacken und Lasuren

## REAKTIONSHARZE

Reaktionsharze bestehen grundsätzlich aus 2 Komponenten. Sie werden im flüssigen Zustand an der Baustelle gemischt sowie verarbeitet und erhärten durch chemische Reaktion in relativ kurzer Zeit. Bei entsprechender Zusammensetzung können hohe mechanische Festigkeiten sowie Widerstandsfähigkeiten gegen Chemikalien und Witterungseinflüsse erreicht werden. [63] In der Kategorie Reaktionsharze werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 66, Abbildung 55). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3), die Errichtungsphase (A4-A5) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis (gefüllt, hoher Gehalt)	2,95	68,5	2,66	3,46E-08	0,0012	0,00511	0,000584
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis (gefüllt, niedriger Gehalt)	3,18	121	6,09	4,42E-08	0,00191	0,00906	0,0013
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis (ungefüllt, hoher Gehalt)	7,32	203	12,3	2,06E-08	0,0033	0,0165	0,00282
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis (ungefüllt, niedriger Gehalt)	3,03	122	5,99	4,75E-08	0,00189	0,009	0,00127
Reaktionsharze auf Epoxidharzbasis (ungefüllt)	5,5	78,6	3,3	4,52E-08	0,00139	0,00657	0,000832
Reaktionsharze auf Polyurethanbasis (gefüllt, lösemittelfrei)	3,18	89,2	4,66	3,40E-08	0,0025	0,0143	0,00267
Reaktionsharze auf Polyurethanbasis (ungefüllt, polyolfrei)	5,22	178	8,82	9,97E-09	0,00239	0,0156	0,00265
Reaktionsharze auf Polyurethanbasis (ungefüllt, polyolhaltig)	3,86	119	5,87	3,44E-08	0,00291	0,0156	0,00474
Reaktionsharze auf Polyurethanbasis (lösemittelhaltig < 10%)	4,27	85,1	4,34	3,26E-08	0,00241	0,0155	0,00222
Reaktionsharze auf Polyurethanbasis (lösemittelhaltig 10% - 50%)	4,32	124	5,75	2,22E-08	0,00219	0,0102	0,0015
Methacrylatharzprodukte (hochgefüllt, Fließen)	2,19	45	1,92	3,03E-10	0,00138	0,00684	0,000468
Methacrylatharzprodukte (hochgefüllt, Mörtel)	1,8	19,8	0,976	2,16E-10	0,000602	0,0041	0,000267
Methacrylatharzprodukte (niedriggefüllt)	3,36	113	4,17	5,59E-10	0,00431	0,0142	0,000959

Tabelle 66: Vergleich der Umweltwirkungen von Reaktionsharzen

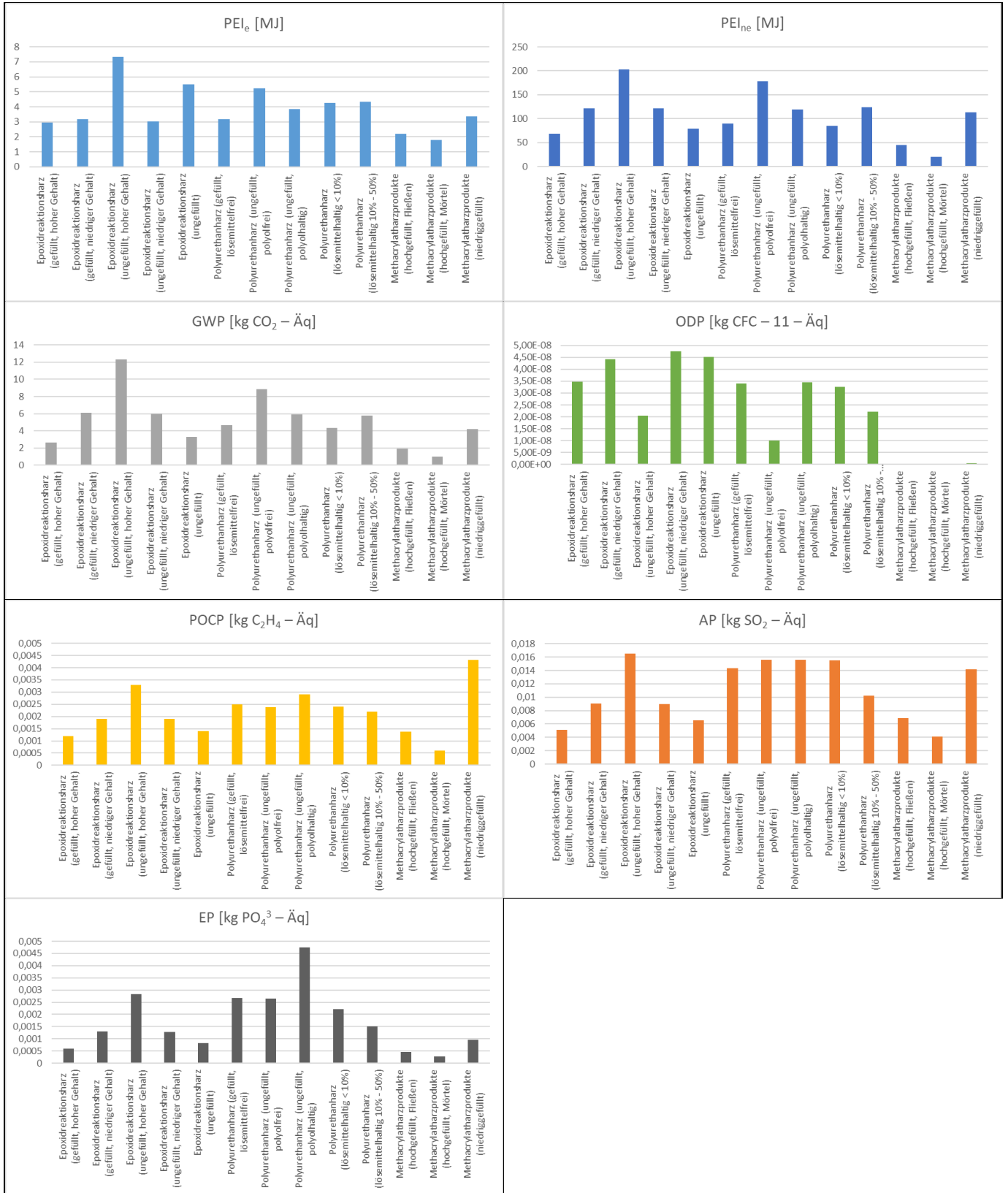


Abbildung 55: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Reaktionsharzen

## BRANDSCHUTZBESCHICHTUNG

Als Brandschutzbeschichtungen in diesem Fall sind wasserundurchlässige Kabelbeschichtungen sowohl im Innen- als auch im Außenbereich gemeint. Eine solche Beschichtung mindert im Brandfall die Hitzeeinwirkung durch Ablation (Abspaltung von Wasser in einer chemischen Reaktion), verzögert somit eine Entzündung und verhindert die Brandausbreitung entlang der Kabel. [64]

In der Kategorie Brandschutzbeschichtung werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 67, Abbildung 56). Hier sind nur Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
HENSOMASTIK 5 KS	0,6213	30,02	1,142	6,20E-08	0,000836	0,004716	0,001504
HENSOTHERM 2 KS	1,05	53,92	2,514	1,60E-07	0,001137	0,01278	0,005512

Tabelle 67: Vergleich der Umweltwirkungen von Brandschutzbeschichtungen



Abbildung 56: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Brandschutzbeschichtungen

## 7.6 Kunststoffe

### ROHRE

Regenfallleitungen sind innen- oder außenliegende senkrechte Leitungen, zum Ableiten des Wassers von Dachflächen oder Balkonen. Beim Einlaufen des Abwassers in die Falleitung kommt es zur Vermischung mit Luft, wodurch sich erst im Bereich der Verziehungen oder vorliegenden Entwässerungsleitungen ein Überdruck aufbaut. Diese Druckschwankungen sind bei einer nicht fachgerechten Installation in der Regel die Ursache von Störungen, wie beispielsweise das Leersaugen bzw. Herausdrücken des Sperrwassers. [9]

In der Kategorie Rohre werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 68, Abbildung 57). Hier sind großteils Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) und die Recyclingphase (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Trinkwasserrohr PB	5,809	111,5	4,191	3,87E-12	0,0007477	0,005031	0,0007069
Abwasserrohr ABS	7,277	113,8	4,464	4,49E-09	0,00101	0,007682	0,001327
Regenabflussrohr PVC	8,231	56,41	2,604	1,79E-10	0,0008034	0,004065	0,0007768

Tabelle 68: Vergleich der Umweltwirkungen von Rohren

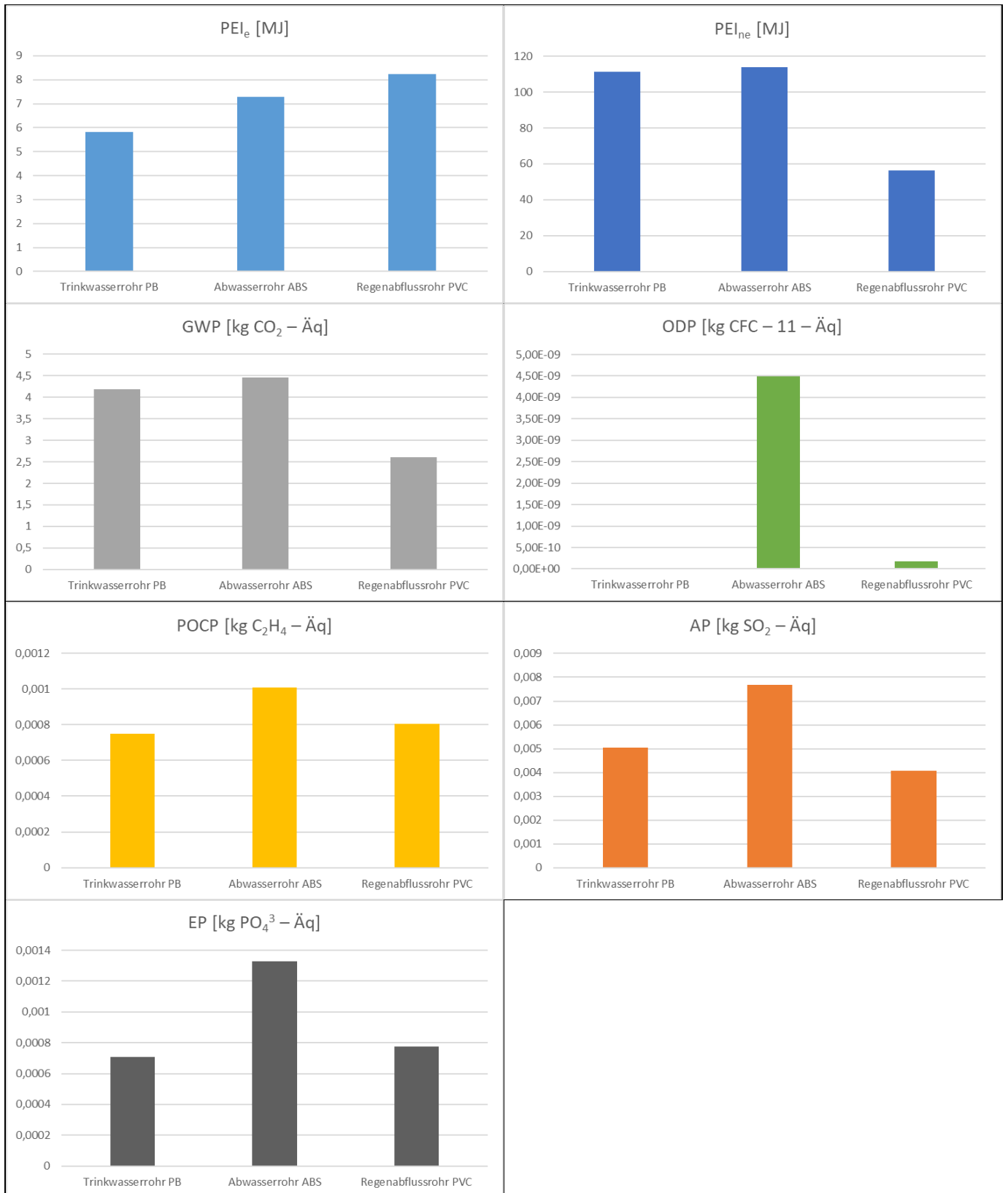


Abbildung 57: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Rohren

## BODENBELÄGE

Genau wie Kautschuk, der in natürlichen und synthetisch hergestellten Kautschuk unterschieden wird, zählt Linoleum zu den elastischen Bodenbelägen. Es ist zudem ein glatter und wasserfester Belag, der aus Leinöl, Holzmehl, Harzen und Farbstoffen hergestellt wird. Linoleum ist abriebfest, antistatisch und eignet sich für die Verlegung mit Fußbodenheizung. Dagegen können Teppichböden in unterschiedlichen Verfahren und Oberflächenkonstruktionen aus natürlichen und synthetischen Fasern sowie Mischungen daraus hergestellt werden und weisen dementsprechend verschiedene Gebrauchseigenschaften auf. [9]

In der Kategorie Bodenbeläge werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>2</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 69, Abbildung 58). Hier sind Daten für alle Phasen des Lebenszyklus und das Recyclingpotential (D) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Gummi-Bodenbelag profiliert 3,55mm	20,42	306,7	13,95	8,42E-11	0,00271	0,02881	0,003194
Linoleum	73,97	96,73	4,128	1,14E-10	0,001596	0,03277	0,01998
Getuftete Teppichfliesen LC1	9,96	243,2	10,9	1,06E-07	0,00379	0,0311	0,00449
Getuftete Teppichfliesen LC3	13,27	328,5	15,4	1,12E-07	0,0052	0,0401	0,00564
Getuftete Teppichfliesen LC5	16,6	414,4	20	1,18E-07	0,00663	0,0492	0,00681

Tabelle 69: Vergleich der Umweltwirkungen von Bodenbelägen



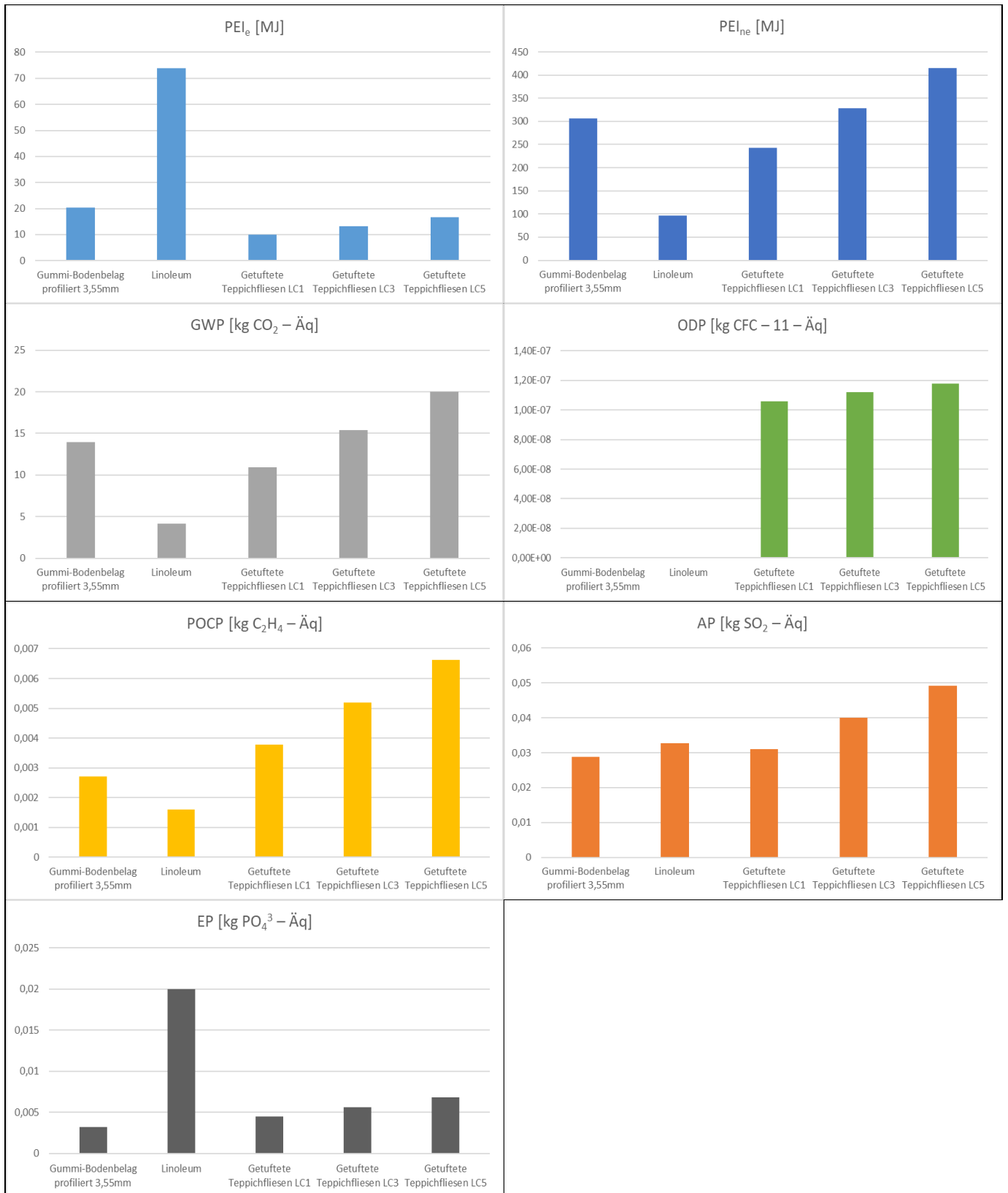


Abbildung 58: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Bodenbelägen

## DACHABDICHTUNGEN

Die Dachabdichtung ist eine flächig aufliegende, wasserundurchlässige Schicht zum Schutz eines Bauwerkes vor eindringender Feuchtigkeit. Sie überdeckt die gesamte Dachfläche einschließlich der An- und Abschlüsse. Im Gegensatz zum Flachdach wird ein geneigtes Dach zusätzlich mit einer Deckung geschützt. [9]

In der Kategorie Dachabdichtungen werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>2</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 70, Abbildung 59). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Bitumenbahnen G 200 S4	3,246	193,5	2,622	5,27E-12	0,001127	0,00933	0,0007357
Bitumenbahnen V 60	3,639	188,3	2,176	5,55E-12	0,001049	0,008287	0,0006909
PVC-Dachbahnen	14,5	132	6,28	1,66E-10	0,001949	0,01584	0,002231
Dachbahnen EPDM	8,466	249,6	8,995	7,94E-12	0,001691	0,01103	0,001375
EVA-Dachbahnen	11,87	171,8	5,477	1,00E-11	0,001604	0,00807	0,001022
Sarnafil TS 77	6,82	125,1	4,122	3,53E-08	0,002106	0,01827	0,001152
Rhepanol hfk	14,4	159	7,63	9,62E-10	0,00298	0,0257	0,00165

Tabelle 70: Vergleich der Umweltwirkungen von Dachabdichtungen

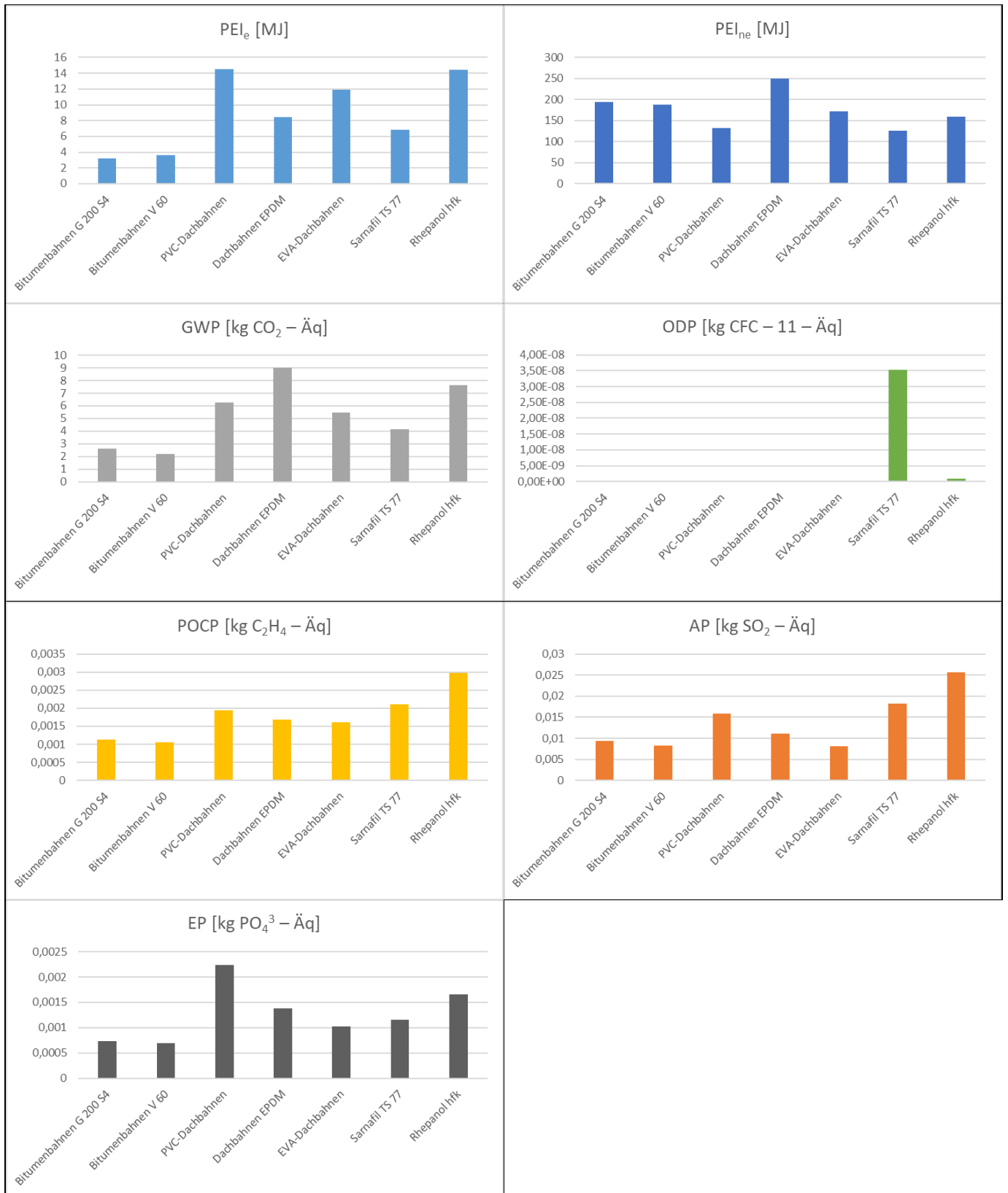


Abbildung 59: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Dachabdichtungen

## KUNSTSTOFFPROFILE

Kunststoffprofile sind grundsätzlich gegen Korrosion, einen Großteil der Säuren, Laugen sowie Abgase und Reinigungsmittel beständig. Außerdem sind sie licht- und farbbeständig und ohne Anstrich haltbar. [9]

In der Kategorie Kunststoffprofile werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 71, Abbildung 60). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Kabelkanal PVC hart	5,019	51,54	2,058	1,06E-10	0,0008065	0,003333	0,0006666
Kunststoffprofil CR	21,43	134,9	6,817	2,13E-11	0,001635	0,02152	0,001492
Kunststoffprofil Silikon	50,83	115,6	7,802	6,63E-11	0,001941	0,01781	0,002184

Tabelle 71: Vergleich der Umweltwirkungen von Kunststoffprofilen



Abbildung 60: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Kunststoffprofilen

## ELASTISCHE KUNSTSTOFFPLATTEN

Unter Einwirkung von Druck und Wärme werden die elastische Kunststoffplatten industriell gefertigt, wobei Cellulose und Phenol- und Melaminharz als Ausgangsstoffe dienen. Speziell bei HPL-Platten befindet sich unter der eigentlichen Oberfläche dekorative Schichten, die digital gestaltet, bedruckt oder nach Farbtonkarte mit flächig eingefärbten Farbtönen belegt werden können. HPL-Platten verfügen außerdem über eine harte, bruch- und schlagfeste Oberfläche, eine hohe Biegesteifigkeit, eine gute Witterungsbeständigkeit und Langlebigkeit. [9]

In der Kategorie elastische Kunststoffplatten werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>3</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 72, Abbildung 61). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
HPL-Platte	33158	30153	-1495	1,83E-09	0,03201	2,086	0,4694
Transparente Platten PC	16656	136185	6572	1,34E-08	1,215	9,481	1,535
Transparente Platten PVC	12859	89941	4257	2,80E-07	1,202	6,338	0,9987

Tabelle 72: Vergleich der Umweltwirkungen von elastischen Kunststoffplatten



Abbildung 61: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von elastischen Kunststoffplatten

## FOLIEN UND VLIESE

Eine Dampfbremse ist eine Folie oder Pappe, die das Diffundieren von Wasserdampf in die Wärmedämmung eines Gebäudes einschränkt. Im Gegensatz zur Dampfsperre, die meistens als Folie ausgeführt und komplett dampfdiffusionsdicht ist, ist eine Dampfbremse lediglich dampfdiffusionshemmend. Dampfbremsen und -sperren stellen die Luftdichtheit des Hauses her und werden raumseitig angebracht. Ob eine Dampfbremse oder -sperre verwendet werden muss, ist von der Konstruktion abhängig. [9]

In der Kategorie Folien und Vliese werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1m<sup>2</sup> des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 73, Abbildung 62). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Folie für Gründach	6,876	89,79	3,65	1,12E-10	0,001343	0,006111	0,001143
Unterspannbahn PE	0,7925	11,1	0,4444	7,01E-13	0,0002481	0,003646	0,0001273
Unterspannbahn PUR auf PET-Vlies	2,389	21,54	1,103	2,19E-12	0,0002243	0,001478	0,0002721
Dampfbremse PE	0,852	13,68	0,4184	6,59E-13	0,0003197	0,005367	0,0001329
Dampfbremse PET gitterverstärkt	1,606	15,81	0,7756	1,42E-12	0,0001826	0,0009442	0,0001338
PE-HD mit PP-Vlies zur Abdichtung	4,941	114,9	3,376	4,28E-12	0,001004	0,005204	0,0005733
PE-Noppenfolie zur Abdichtung	4,846	118,2	4,005	6,42E-12	0,001123	0,006604	0,0007081
Glasvlies	0,8818	4,9	0,3115	5,23E-13	0,000118	0,001733	0,0001203
PE/PP Vlies	2,292	44,94	1,335	1,94E-12	0,000343	0,001989	0,000233
Kraftpapier	3,93	0,6382	-0,08573	2,03E-12	0,00002558	0,0001922	0,0000539
Sonnenschutz Tuch	15,92	105,3	5,815	1,17E-11	0,001181	0,007319	0,001589

Tabelle 73: Vergleich der Umweltwirkungen von Folien und Vliesen



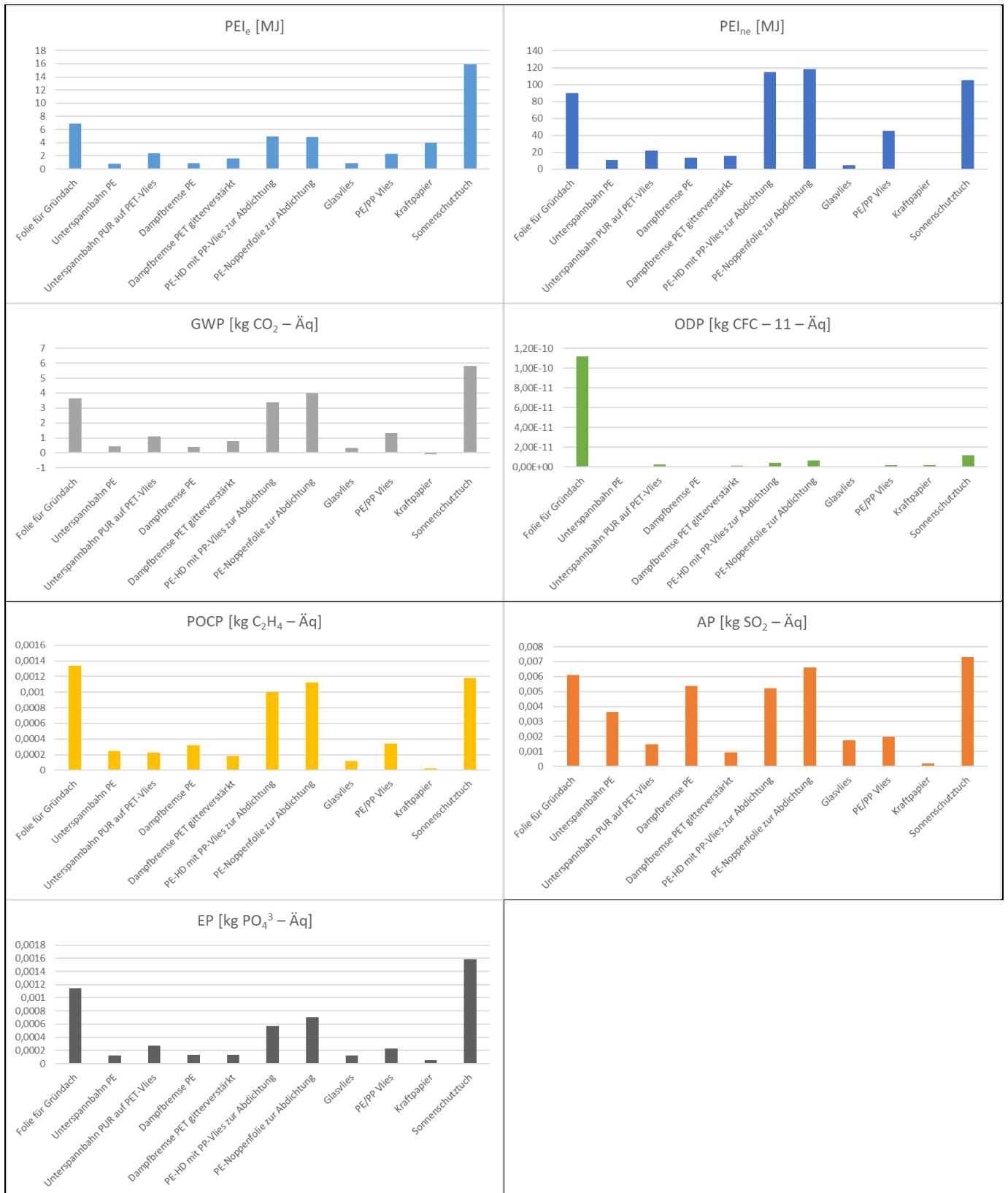


Abbildung 62: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Folien und Vliesen

## DICHTMASSEN

Als Dichtmasse oder Fugenmasse bezeichnet man ein dauerelastisches Material wie z.B. Silikon, Kitt oder synthetischer Kautschuk, das im Unterschied zum Fugenmörtel hauptsächlich für technische Fugen verwendet wird. [9]

In der Kategorie Dichtmassen werden die einzelnen Baustoffe auf die Einheit 1kg des Baustoffes gerechnet (siehe Tabelle 74, Abbildung 63). Hier sind Daten für die Herstellungsphase (A1-A3) vorhanden.

	PEI <sub>e</sub>	PEI <sub>ne</sub>	GWP	ODP	POCP	AP	EP
Kautschuk-Dichtmasse	3,092	111,2	4,041	3,66E-12	0,001018	0,005118	0,0006881
Silikon-Dichtmasse	54,23	123,9	7,891	7,97E-11	0,002343	0,02032	0,002329
PUR-Dichtmasse	20,47	111,2	5,814	3,17E-11	0,002026	0,02736	0,00153
Bitumen Emulsion	1,495	25,29	0,3888	8,54E-13	0,0001359	0,001036	0,000105
PVC Plastisol	4,141	56,82	2,493	1,30E-10	0,0007113	0,003599	0,000533
Acrylat Dichtmasse	5,097	80,9	3,216	6,18E-12	0,0009076	0,01325	0,0006482
Baudichtstoffe auf Polysulfidbasis	5,124	77,4	3,545	1,75E-09	0,001554	0,01623	0,0009059

Tabelle 74: Vergleich der Umweltwirkungen von Dichtmassen



Abbildung 63: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>, PEI<sub>ne</sub>, GWP, ODP, POCP, AP, EP) von Dichtmassen



## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dimensionen der Nachhaltigkeit [65] .....	12
Abbildung 2: Beispiele für Themengebiete auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und Gliederung in die drei Ansätze Konsistenz, Suffizienz und Effizienz [1] .....	19
Abbildung 3: Schutzziele der Baubiologie und Bauökologie [1] .....	20
Abbildung 4: Beispielhafte Erklärung von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung anhand der Klimaveränderung, nach [1] .....	36
Abbildung 5: Lebenszyklusphasen von Gebäuden, nach [52] .....	46
Abbildung 6: Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Beton in m <sup>3</sup> .....	49
Abbildung 7: Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Stahl in m <sup>3</sup> .....	51
Abbildung 8: Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Ziegel in m <sup>3</sup> .....	53
Abbildung 9: Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Holz in m <sup>3</sup> .....	55
Abbildung 10: Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Glas in m <sup>3</sup> .....	57
Abbildung 11: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Geschosdecken im Rohbau ...	59
Abbildung 12: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Außenwänden im Rohbau .....	61
Abbildung 13: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Innenwänden im Rohbau .....	63
Abbildung 14: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Geschosdecken im Rohbau mit Wärmedämmung.....	65
Abbildung 15: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Außenwänden im Rohbau mit Wärmedämmung.....	67
Abbildung 16: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Flachdachaufbauten im Rohbau mit Wärmedämmung .....	69
Abbildung 17: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Geschosdecken .....	71
Abbildung 18: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Außenwänden .....	73
Abbildung 19: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Flachdachaufbauten .....	75
Abbildung 20: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Innenwänden.....	77
Abbildung 21: Holztafelwand mit Zellulose (links), Holztafelwand mit Mineralwolle (rechts) .....	80
Abbildung 22: Holztafelwand mit Mineralwolle (links), Hochlochziegelwand mit Mineralwolle (rechts) .....	81
Abbildung 23: Hochlochziegelwand mit Mineralwolle (links), Hochlochziegelwand mit Mineralwolle und Hinterlüftung (rechts) .....	81
Abbildung 24: Holztafelwand mit Zellulose, Holztafelwand mit Mineralwolle, Hochlochziegelwand mit Mineralwolle, Hochlochziegelwand mit Mineralwolle und Hinterlüftung (von links nach rechts) .....	82
Abbildung 25: Optimierungspotenzial in der Materialwahl am Beispiel von Außenwänden (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) .....	83

Abbildung 26: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Bindemitteln .....	105
Abbildung 27: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Zuschlägen .....	107
Abbildung 28: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Mauersteinen (kg).....	109
Abbildung 29: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Mauersteinen (m <sup>3</sup> ) .....	111
Abbildung 30: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Bauteilelementen.....	113
Abbildung 31: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Mörtel und Putzen .....	115
Abbildung 32: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Beton und Mörtel.....	117
Abbildung 33: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Asphalt .....	119
Abbildung 34: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Mineralwolle .....	121
Abbildung 35: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Expandiertem Polystyrol .....	123
Abbildung 36: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Polyurethan Hartschaum .....	125
Abbildung 37: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Schaumglas .....	127
Abbildung 38: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Bläherlit.....	129
Abbildung 39: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Holzfasern .....	131
Abbildung 40: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Zellulosefasern .....	133
Abbildung 41: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Baumwolle .....	135
Abbildung 42: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Kalziumsilikaten .....	137
Abbildung 43: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Vollholz.....	139
Abbildung 44: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Holzwerkstoffen .....	141
Abbildung 45: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Holzböden .....	143
Abbildung 46: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Stahl und Eisen.....	145
Abbildung 47: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Edeltählen.....	147
Abbildung 48: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Aluminium.....	149
Abbildung 49: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Kupfer.....	151
Abbildung 50: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Zink.....	153
Abbildung 51: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Oberflächenbehandlungen ..	155
Abbildung 52: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Grundierungen.....	157
Abbildung 53: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Fassadenfarben .....	159
Abbildung 54: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Lacken und Lasuren.....	161
Abbildung 55: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Reaktionsharzen.....	163
Abbildung 56: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Brandschutzbeschichtungen	165
Abbildung 57: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI <sub>e</sub> ,PEI <sub>ne</sub> ,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Rohren.....	167

Abbildung 58: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Bodenbelägen.....169

Abbildung 59: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Dachabdichtungen .....171

Abbildung 60: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Kunststoffprofilen.....173

Abbildung 61: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von elastischen Kunststoffplatten  
 .....175

Abbildung 62: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Folien und Vliesen .....177

Abbildung 63: Vergleich der Umweltwirkungen (PEI<sub>e</sub>,PEI<sub>ne</sub>,GWP,ODP,POCP,AP,EP) von Dichtmassen .....179

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Gütesiegel und Label im deutschsprachigen Raum, nach [1] .....	24
Tabelle 2: Vergleich der üblichen Zertifizierungssysteme, nach [1] .....	28
Tabelle 3: Kriterienvergleich der üblichen Zertifizierungssysteme, nach [1].....	32
Tabelle 4: Vor- und Nachteile von Mauerziegeln, nach [53] .....	39
Tabelle 5: Vor- und Nachteile von Kalksandsteinen, nach [53] .....	39
Tabelle 6: Vor- und Nachteile von Porenbetonsteinen, nach [53] .....	40
Tabelle 7: Vor- und Nachteile von Beton, nach [53].....	40
Tabelle 8: Vor- und Nachteile von Holzbaustoffen, nach [53] .....	41
Tabelle 9: Vergleich der mechanischen Kenndaten von mineralischen Baustoffen, nach [53].....	43
Tabelle 10: Vergleich der mechanischen Kenndaten von Holzwerkstoffen, nach [53] .....	44
Tabelle 11: Vergleich der mechanischen Kenndaten von Dämmungen, nach [53] .....	44
Tabelle 12: Gegenüberstellung verschiedener Kriterien von Baumaterialien, nach [53] .....	45
Tabelle 13: Umweltwirkungen von Beton in m <sup>3</sup> .....	48
Tabelle 14: Umweltwirkungen von Beton in kg.....	48
Tabelle 15: Umweltwirkungen von Stahl in m <sup>3</sup> .....	50
Tabelle 16: Umweltwirkungen von Stahl in kg .....	50
Tabelle 17: Umweltwirkungen von Ziegel in m <sup>3</sup> .....	52
Tabelle 18: Umweltwirkungen von Ziegel in kg.....	52
Tabelle 19: Umweltwirkungen von Holz in m <sup>3</sup> .....	54
Tabelle 20: Umweltwirkungen von Holz in kg .....	54
Tabelle 21: Umweltwirkungen von Glas in m <sup>3</sup> .....	56
Tabelle 22: Umweltwirkungen von Glas in kg.....	56
Tabelle 23: Vergleich der Umweltwirkungen von Geschossdecken im Rohbau.....	58
Tabelle 24: Vergleich der Umweltwirkungen von Außenwänden im Rohbau .....	60
Tabelle 25: Vergleich der Umweltwirkungen von Innenwänden im Rohbau .....	62
Tabelle 26: Vergleich der Umweltwirkungen von Geschossdecken im Rohbau mit Wärmedämmung .....	64
Tabelle 27: Vergleich der Umweltwirkungen von Außenwänden im Rohbau mit Wärmedämmung .....	66
Tabelle 28: Vergleich der Umweltwirkungen von Flachdachaufbauten im Rohbau mit Wärmedämmung .....	68
Tabelle 29: Vergleich der Umweltwirkungen von Geschossdecken .....	70
Tabelle 30: Vergleich der Umweltwirkungen von Außenwänden .....	72
Tabelle 31: Vergleich der Umweltwirkungen von Flachdachaufbauten.....	74



Tabelle 32: Vergleich der Umweltwirkungen von Innenwänden .....	76
Tabelle 33: Optimierungspotenzial einer Außenwand beim Austausch der Dämmung .....	80
Tabelle 34: Optimierungspotenzial einer Außenwand beim Austausch des Tragsystems .....	81
Tabelle 35: Optimierungspotenzial einer Außenwand beim Austausch des sekundären Wandaufbaus .....	82
Tabelle 36: Optimierungspotenzial in der Materialwahl am Beispiel von Außenwänden .....	82
Tabelle 37: Vergleich der Umweltwirkungen von Bindemitteln .....	104
Tabelle 38: Vergleich der Umweltwirkungen von Zuschlägen .....	106
Tabelle 39: Vergleich der Umweltwirkungen von Mauersteinen (kg) .....	108
Tabelle 40: Vergleich der Umweltwirkungen von Mauersteinen (m <sup>3</sup> ) .....	110
Tabelle 41: Vergleich der Umweltwirkungen von Bauteilelementen .....	112
Tabelle 42: Vergleich der Umweltwirkungen von Mörtel und Putzen .....	114
Tabelle 43: Vergleich der Umweltwirkungen von Beton und Mörtel .....	116
Tabelle 44: Vergleich der Umweltwirkungen von Asphalt .....	118
Tabelle 45: Vergleich der Umweltwirkungen von Mineralwolle .....	120
Tabelle 46: Vergleich der Umweltwirkungen von Expandiertem Polystyrol .....	122
Tabelle 47: Vergleich der Umweltwirkungen von Polyurethan Hartschaum .....	124
Tabelle 48: Vergleich der Umweltwirkungen von Schaumglas .....	126
Tabelle 49: Vergleich der Umweltwirkungen von Blähperlit .....	128
Tabelle 50: Vergleich der Umweltwirkungen von Holzfasern .....	130
Tabelle 51: Vergleich der Umweltwirkungen von Zellulosefasern .....	132
Tabelle 52: Vergleich der Umweltwirkungen von Baumwolle .....	134
Tabelle 53: Vergleich der Umweltwirkungen von Kalziumsilikaten .....	136
Tabelle 54: Vergleich der Umweltwirkungen von Vollholz .....	138
Tabelle 55: Vergleich der Umweltwirkungen von Holzwerkstoffen .....	140
Tabelle 56: Vergleich der Umweltwirkungen von Holzböden .....	142
Tabelle 57: Vergleich der Umweltwirkungen von Stahl und Eisen .....	144
Tabelle 58: Vergleich der Umweltwirkungen von Edelstählen .....	146
Tabelle 59: Vergleich der Umweltwirkungen von Aluminium .....	148
Tabelle 60: Vergleich der Umweltwirkungen von Kupfer .....	150
Tabelle 61: Vergleich der Umweltwirkungen von Zink .....	152
Tabelle 62: Vergleich der Umweltwirkungen von Oberflächenbehandlungen .....	154
Tabelle 63: Vergleich der Umweltwirkungen von Grundierungen .....	156

Tabelle 64: Vergleich der Umweltwirkungen von Fassadenfarben .....	158
Tabelle 65: Vergleich der Umweltwirkungen von Lacken und Lasuren .....	160
Tabelle 66: Vergleich der Umweltwirkungen von Reaktionsharzen .....	162
Tabelle 67: Vergleich der Umweltwirkungen von Brandschutzbeschichtungen .....	164
Tabelle 68: Vergleich der Umweltwirkungen von Rohren .....	166
Tabelle 69: Vergleich der Umweltwirkungen von Bodenbelägen .....	168
Tabelle 70: Vergleich der Umweltwirkungen von Dachabdichtungen .....	170
Tabelle 71: Vergleich der Umweltwirkungen von Kunststoffprofilen .....	172
Tabelle 72: Vergleich der Umweltwirkungen von elastischen Kunststoffplatten .....	174
Tabelle 73: Vergleich der Umweltwirkungen von Folien und Vliesen .....	176
Tabelle 74: Vergleich der Umweltwirkungen von Dichtmassen .....	178

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] S. El khoul, V. John und M. Zeumer, Nachhaltig konstruieren - Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialwahl: Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren, München, Deutschland: DETAIL - Green Books, 2014.
- [2] J. Ruskin und W. Kemp, Die sieben Leuchter der Architektur, Dortmund: Eugen Diederichs, 1994.
- [3] R. Buckminster Fuller, Operating Manual for Spaceship Earth, Carbondale/ Edwardsville: Simon & Schuster, 1969.
- [4] H. Palm, Das gesunde Haus - das kranke Haus und seine Heilung. Unser nächster Umweltschutz - Die biologische Bauordnungslehre in der Architectura perennis, Kreuzlingen: Ordo-Verlag, 1979.
- [5] O. Aicher, Die Welt als Entwurf, Berlin: Ernst & Sohn, 1991.
- [6] World Comission on Environment and Development, Our Common Future, Oxford: Oxford University Press, 1987.
- [7] International Council for Research and Innovation in Building and Construction, „Agenda 21 on sustainable construction,“ CIB, Rotterdam, 1999.
- [8] United Nations Human Settlements Programme, „Istanbul Declaration on Human Settlements,“ 14 Juni 1996. [Online]. Available: <http://www.un-documents.net/ist-dec.htm>. [Zugriff am 22. Januar 2018].
- [9] S. Merbecks, N. Allé, D. Gintars, T. Gramlich, S. Hoepner-Fillies, E. Holtz, Y. Kavermann, A. Pfisterer, C. Renner, G. Schmid, U. Schmidt, D. Schwarz, W. Sobek und M. Wangelin, „Baunetz Wissen,“ BauNetz Media GmbH, [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/>. [Zugriff am 29. März 2018].
- [10] F. Schmidt-Beleek und W. Bierter, Das MIPS Konzept. Weniger Naturverbrauch, mehr Lebensqualität durch Faktor 10, München: Droemer Knaur, 2000.
- [11] ee Concept GmbH, „Entwicklung und Erprobung eines Bewertungssystems "BNB für Forschungs- und Laborgebäude (Neubau)",“ ee concept gmbh, Darmstadt, 2014.
- [12] Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen, „Leitfaden Nachhaltiges Bauen,“ Berlin, 2001.
- [13] AGÖF Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V., „AGÖF-Orientierungswerte für flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft,“ Springe-Eldagsen, 2013.

- [14] BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „WECOBIS - Ökologisches Baustoffinformationssystem,“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2014. [Online]. Available: <http://www.wecobis.de/>. [Zugriff am 22. Januar 2018].
- [15] European Chemicals Agency, „ECHA,“ European Chemicals Agency, 2007. [Online]. Available: <https://echa.europa.eu/de/>. [Zugriff am 22. Januar 2018].
- [16] BG BAU - GISBAU Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, „GISCODE Produktgruppen,“ Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, [Online]. Available: [www.bgbau.de/gisbau/giscodes](http://www.bgbau.de/gisbau/giscodes). [Zugriff am 22. Januar 2018].
- [17] Europäische Kommission, „Europäische Kommission - Gemeinsame Forschungsstelle,“ Europäische Kommission, [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/info/departments/joint-research-centre\\_de](https://ec.europa.eu/info/departments/joint-research-centre_de). [Zugriff am 22. Januar 2018].
- [18] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. DIN EN ISO 14040, Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [19] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Umweltmanagement - Ökobilanz Anforderungen und Anleitungen. DIN EN ISO 14044, Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode. DIN EN 15978, Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [21] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. DIN EN 15804, Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [22] BMVBS Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, „Leitfaden Nachhaltiges Bauen,“ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2013.
- [23] BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Informationsportal Nachhaltiges Bauen,“ BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, [Online]. Available: [www.nachhaltiges-bauen.de](http://www.nachhaltiges-bauen.de). [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [24] BG BAU - Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, „WINGIS Online Gefahrstoff-Informationssystem,“ BG BAU - Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, [Online]. Available: <http://wingisonline.de/>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [25] Landesverband Steiermark und Kärnten, Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile, Graz, 2006.
- [26] IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie, OI3-Indikator Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen von Gebäuden, Wien, 2011.

- [27] IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie, „baubook eco2soft - ökobilanz für gebäude,“ baubook GmbH, [Online]. Available: <https://www.baubook.info/eco2soft/>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [28] SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Empfehlung SIA 112/1 - Nachhaltiges Bauen (Hochbau), Zürich, 2004.
- [29] SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Graue Energie von Gebäuden. SIA 2032, Zürich, 2010.
- [30] Holliger Consult, „Elektronischer Bauteilkatalog,“ Holliger Consult, [Online]. Available: <http://www.bauteilkatalog.ch/ch/de/Bauteilkatalog.asp>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [31] SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, SIA D 0200 SNARC Systematik zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Architekturprojekten für den Bereich Umwelt, Zürich, 2004.
- [32] E4tech, „Lesosai: Zertifizierung, Energie- und Ökobilanzen von Gebäuden,“ E4tech, 2008. [Online]. Available: <http://www.lesosai.ch/de/index.cfm>. [Zugriff am 24. Januar 2018].
- [33] SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Mobilität - Energiebedarf in Abhängigkeit vom Gebäudestandort SIA 2039, Zürich, 2011.
- [34] Geschäftsstelle eco-bau, Eco-BKP 2013 Merkblätter ökologisches Bauen nach Baukostenplan BKP, Zürich, 2013.
- [35] BRE Buidlung Research Establishment, „BREEAM,“ BRE Buidlung Research Establishment, 2018. [Online]. Available: <https://www.breeam.com/>. [Zugriff am 26. Januar 2018].
- [36] U.S. Green Building Council, „LEED,“ U.S. Green Building Council, 2018. [Online]. Available: <https://new.usgbc.org/leed>. [Zugriff am 26. Januar 2018].
- [37] H. Wallbaum und R. Hardziewski, „Minergie und die anderen - Vergleich von vier Labels,“ *TEC21*, Bd. 137, Nr. 47, pp. 31-39, 2011.
- [38] T. Ebert, N. Essig und G. Hauser, Zertifizierungssysteme für Gebäude, München: Detail Green Books, 2010.
- [39] MINERGIE Schweiz, „MINERGIE,“ MINERGIE Schweiz, 2018. [Online]. Available: <https://www.minergie.ch/>. [Zugriff am 26. Januar 2018].
- [40] NNBS Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz, „SNBS Standard für Nachhaltiges Bauen der Schweiz,“ NNBS Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz, [Online]. Available: <https://www.nnbs.ch/standard-snbs>. [Zugriff am 26. Januar 2018].

- [41] DGNB Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., „DGNB,“ DGNB Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., 2018. [Online]. Available: <http://www.dgnb.de/de/>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [42] ÖGNB Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, „TQB,“ ÖGNB Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, [Online]. Available: <https://www.oegnb.net/tqb.htm>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [43] Bau- und Umweltchemie AG, „GI Gutes Innenraumklima,“ Bau- und Umweltchemie AG, 2018. [Online]. Available: <https://gutes-innenraumklima.ch/>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [44] Sentinel Haus Institut GmbH, „Sentinel Haus Institut,“ Sentinel Haus Institut GmbH, [Online]. Available: <https://www.sentinel-haus.eu/de/>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [45] SCERT Schweizer Zertifizierungstelle für Produkte und Personen im Bauwesen, „S-Cert,“ SCERT Schweizer Zertifizierungstelle für Produkte und Personen im Bauwesen, 2018. [Online]. Available: <http://www.s-cert.ch/>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [46] Product Ecology Consultants, „SimaPro LCA Software,“ Product Ecology Consultants, 2018. [Online]. Available: <https://simapro.com/>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [47] Thinkstep AG, „thinkstep GaBi,“ Thinkstep AG, [Online]. Available: <http://www.gabi-software.com/deutsch/index/>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [48] Green Delta, „OpenLCA,“ Green Delta, 2018. [Online]. Available: <http://www.openlca.org/>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [49] LEGEP Software GmbH, „LEGEP Software,“ LEGEP Software GmbH, [Online]. Available: <https://lekep.de/>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [50] Thinkstep AG, „SBS Building Sustainability,“ Thinkstep AG, [Online]. Available: <https://www.sbs-onlinetool.com/>. [Zugriff am 27. Januar 2018].
- [51] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, „Ökobaudat - Informationsportal Nachhaltiges Bauen,“ Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2018. [Online]. Available: <http://www.oekobaudat.de>. [Zugriff am 29. März 2018].
- [52] P. J. Sölkner, A. Oberhuber, S. Spaun, R. Preininger, F. Dolezal, H. Mötzl, A. Passer und G. Fischer, „Innovative Gebäudekonzepte im ökologischen und ökonomischen Vergleich über den Lebenszyklus,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2014.
- [53] P. Schneider, S. Pfoh und F. Grimm, „Projektplattform Energie - Leitfaden 01 Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile,“ Technische Universität Wien, München, 2016.

- [54] S. Weber, H. Schäffler, E. Bruy und G. Schelling, Baustoffkunde, Würzburg: Vogel Buchverlag, 2012.
- [55] D. Glücklich, „Ecobine - Informationsnetz im Ökologischen Bauen,“ Kohlhaas & Kohlhaas, [Online]. Available: <http://www.ecobine.de/>. [Zugriff am 29. März 2018].
- [56] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte DIN 4108-4, Berlin: Beuth Verlag, 2017.
- [57] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Baustoffe und -produkte - Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte DIN EN ISO 10456, Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [58] BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Strategie Ressourceneffizienz - Impulse für den ökologischen und ökonomischen Umbau der Industriegesellschaft,“ Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin, 2008.
- [59] H. König, „Bauen für die Zukunft - Bauen mit Holz. Nachwachsende Rohstoffe und ihre Rolle in der Zertifizierung,“ München, 2012.
- [60] S. Gärtner, „Holzkaskadennutzung vs. Holzenergie: Was nützt der Umwelt mehr?,“ ifeu –Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Augsburg, 2012.
- [61] J. Knippers, J. Cremers, M. Gabler und J. Lienhard, „Atlas Kunststoffe und Membrane,“ DETAIL. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, 2010.
- [62] M. Hegger, M. Fuchs, T. Stark und M. Zeumer, Energie Atlas: Nachhaltige Architektur, München: Detail, 2007.
- [63] W. Schäfer, „Indolin Systeme,“ Indolin - Fußbodensysteme Wilfried Schäfer, [Online]. Available: <http://www.indolin.com>. [Zugriff am 31. März 2018].
- [64] Rudolf Hensel GmbH - Lack und Farbenfabrik, „Hensel,“ Rudolf Hensel GmbH - Lack und Farbenfabrik, [Online]. Available: <https://www.rudolf-hensel.de/>. [Zugriff am 31. März 2018].
- [65] BMUB Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Leitfaden Nachhaltiges Bauen,“ BMUB; Referat B I 5 – Bauingenieurwesen, Nachhaltiges Bauen, Bauforschung, Berlin, 2014.