

TEXTE

44/2022

Abschlussbericht

Konzeptionelle Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks

**Zur Abbildung möglicher qualitativer und quantitativer
Wasserbelastungen entlang eines Produktlebenszyklus**

von:

Jonas Bunsen, Dr. Markus Berger, Prof. Dr. Matthias Finkbeiner
Fachgebiet für Sustainable Engineering der TU Berlin

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 44/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
Forschungskennzahl 3719 31 201 0
FB000686

Abschlussbericht

Konzeptionelle Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks

Zur Abbildung möglicher qualitativer und quantitativer
Wasserbelastungen entlang eines Produktlebenszyklus

von

Jonas Bunsen, Dr. Markus Berger, Prof. Dr. Matthias
Finkbeiner
Fachgebiet für Sustainable Engineering der TU Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Fachgebiet für Sustainable Engineering
Technische Universität Berlin – Institut für Technischen Umweltschutz
Schr. Z1
Straße des 17. Juni 135
D-10623

Abschlussdatum:

November 2021

Redaktion:

Fachgebiet II 2.1 Übergreifende Angelegenheiten Wasser und Boden
Manuela Helmecke, Bernd Kirschbaum, Leana Witzke

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Konzeptionelle Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks

Der Konsum von Waren und Dienstleistungen verursacht in der Regel entlang der Wertschöpfungsketten erhebliche umweltbezogene Auswirkungen einschließlich solcher auf die Ressource Wasser. Als einer der fünf größten Konsumierenden-Märkte weltweit ist Deutschland somit mitverantwortlich für wasserbezogene Umweltwirkungen.

Eines der Hauptziele des vorliegenden Forschungsvorhabens war es daher, den durch Konsum verursachten Wasserverbrauch von Deutschland anzunähern und regional aufzuschlüsseln. Die daraus resultierende sogenannte *Wasserfußabdruck-Sachbilanz* wurde anschließend vor dem Hintergrund der Übernutzung der Wasserressourcen in den Herkunftseinzugsgebieten charakterisiert, woraus sich Deutschlands *Wasserfußabdruck* ergibt.

Der mit Abstand überwiegende Anteil an Deutschlands Wasserfußabdruck manifestiert sich in Regionen im Ausland. Deutschlands eigener Anteil am Wasserfußabdruck ist nahezu vernachlässigbar. Regionen, in denen der Wasserfußabdruck von Deutschland erheblich ist, sind bspw. Südeuropa, Nordafrika, Südasien oder Nordamerika.

Auf Grundlage der im Forschungsvorhaben gesammelten Erkenntnisse wurden Empfehlungen abgeleitet, um Deutschlands konsuminduzierten Wasserfußabdruck zu reduzieren und im Rahmen nationaler Ressourcenberichterstattung zu erfassen. Darüber hinaus wurden methodische Limitierungen zusammengefasst und erforderliche Verbesserungen zur robusten Erfassung des konsuminduzierten Wasserfußabdrucks von Deutschland identifiziert.

Abstract: Conceptual advancement of the water footprint

The consumption of goods and services is widely known to cause significant environmental impacts along all value chain stages, including impacts with regard to water resources. As one of the five largest consumer markets in the world, Germany can thus be considered partially responsible for water-related impacts in watersheds worldwide.

Therefore, one of the main aims of this research project was to approximate the consumption-induced water consumption of Germany and its regional disaggregation. The resulting *water footprint inventory* was characterized under consideration of the exceedance of local safe operating spaces of watersheds worldwide resulting in Germany's *water footprint*.

The largest share of Germany's water footprint impacts regions abroad. Germany's own contribution to its water footprint is almost negligible. Regions where Germany's water footprint potentially causes significant impacts include for instance Southern Europe, North Africa, South Asia and North America.

Based on these and other methodological findings, policy recommendations were formulated as well as a set of indicators proposed to assess and track Germany's consumption-induced water footprint. Finally, methodological limitations were summarized and necessary improvements for enabling a robust assessment of the consumption-induced water footprint of Germany were identified.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	6
Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	12
Abkürzungsverzeichnis.....	13
Begriffserklärungen.....	14
Zusammenfassung.....	16
Summary	25
1 Einleitung und Zielstellung.....	34
1.1 Aufbau.....	34
2 Hintergrund.....	35
2.1 Kurzüberblick Wasserfußabdruck.....	35
2.1.1 Wasserfußabdruck-Toolbox.....	38
2.2 Kurzüberblick Planetare Belastbarkeitsgrenzen.....	40
2.2.1 Kurzüberblick Planetare Belastbarkeitsgrenze Wasser.....	42
3 Vorgehensweise.....	47
3.1 Bewertungsmethode.....	49
3.1.1 Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten.....	49
3.1.2 Wasserdargebot und Wasserverbrauch.....	49
3.1.3 Umweltbedingte Wasserflussanforderungen.....	53
3.1.4 Hotspots.....	55
3.1.5 Charakterisierungsfaktoren.....	55
3.2 Konsuminduzierter Wasserverbrauch.....	57
3.2.1 Wasser-Satellitenkonten.....	58
3.2.2 Strukturelle Pfadanalyse.....	59
3.2.3 Zuordnung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs auf Einzugsgebiete.....	59
3.2.4 Gewichtung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland.....	59
3.2.5 Datenbankwahl.....	60
3.3 Datenübersicht.....	67
4 Ergebnisse.....	68
4.1 Charakterisierungsfaktoren.....	68
4.1.1 Belastbarkeitsgrenzen.....	68

4.1.2	Wasserknappheit-Hotspots	70
4.1.3	Charakterisierungsfaktoren	74
4.2	Konsuminduzierter Wasserverbrauch Deutschlands (Wasserfußabdruck-Sachbilanz).....	78
4.2.1	Regionale Herkunft der Beiträge zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland	80
4.2.2	Produktionsperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland	83
4.2.3	Konsumperspektive des blauen Wasserverbrauchs von Deutschland nach Sektor	88
4.2.4	Zuordnung des blauen Wasserverbrauchs von Deutschland auf Einzugs- und Flussgebiete	106
4.2.5	Online-Tool	115
4.2.6	Deutschlands Wasserverbrauch durch Konsum im Ausland	116
5	Vorschlag für Indikatoren zur Erfassung des Wasserfußabdrucks von Deutschland	119
5.1	Anwendbarkeit und Limitierungen der Indikatoren	122
5.1.1	Wasserfußabdruck in Bezug auf Wasserknappheit	122
5.1.2	Wasserfußabdruck in Bezug auf Wasserverschmutzung.....	122
5.2	Möglichkeiten der Zielableitung	123
5.2.1	Direkte Zielableitung.....	123
5.2.2	Zielableitung analog zu ProgRess.....	123
5.2.3	Zielableitung mit Fokus auf wasserknappe Regionen	124
6	Limitierungen der vorliegenden Studie.....	125
7	Diskussion und Fazit	129
7.1	Der konsuminduzierte Wasserverbrauch und Wasserfußabdruck von Deutschland.....	129
7.2	IO-Analyse zur Nationalen Ressourcenberichterstattung	130
7.3	Kommunikation eines Wasserfußabdrucks für Verbraucherinnen und Verbraucher	131
7.4	Empfehlungen für Indikatoren und Zielsetzung	133
8	Quellenverzeichnis	134
A	Herkunftsregionen	141
B	Wertschöpfungsketten-Analyse	143
C	Verifizierung der Ergebnisse.....	166
D	Zusatzmaterial	168

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Wasserfußabdruck Toolbox.....	39
Abbildung 2:	Planetare Belastbarkeitsgrenzen gemäß Steffen et al. (2015).41	
Abbildung 3:	Veröffentlichungen zur Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser	45
Abbildung 4:	Vorgehensweise	48
Abbildung 5:	Gesamtwasserverbrauch.....	52
Abbildung 6:	Umweltbedingte Wasserflussanforderungen	54
Abbildung 7:	Regionen der Exiobase-Datenbank	61
Abbildung 8:	Satellitenkonten für Wasserverbrauch in den USA gemäß Eora	62
Abbildung 9:	Satellitenkonten für Wasserverbrauch in Deutschland gemäß Eora.....	63
Abbildung 10:	Anzahl von Sektoren und spezifische Werte für blauen Wasserverbrauch in Eora	64
Abbildung 11:	Deutschlands blaue Wasserexporte gemäß Eora26.....	66
Abbildung 12:	Belastbarkeitsgrenzen	69
Abbildung 13:	Die Belastbarkeitsgrenzen abzgl. des menschlichen Wassergrundbedarfs	71
Abbildung 14:	Die Belastbarkeitsgrenzen abzgl. des menschlichen Gesamtwasserverbrauchs	72
Abbildung 15:	Jährliche Wasserdefizite.....	73
Abbildung 16:	Charakterisierungsfaktoren - Einzugsgebiete (je Monat).....	75
Abbildung 17:	Charakterisierungsfaktoren – Einzugsgebiete (Jahr).....	76
Abbildung 18:	Charakterisierungsfaktoren – Regional (Jahr)	76
Abbildung 19:	Charakterisierungsfaktoren – National (Jahr)	77
Abbildung 20:	Der konsuminduzierte Wasserverbrauch von Deutschland (Inland und Ausland)	79
Abbildung 21:	Regionale Beiträge zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland.....	81
Abbildung 22:	Regionale Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland.....	82
Abbildung 23:	Produktionsperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (aggregiert).....	84
Abbildung 24:	Produktionsperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (nach Sektor und Herkunftsregion)	86
Abbildung 25:	Verbrauch von blauem Wasser durch Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien).....	87
Abbildung 26:	Konsumperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (aggregiert).....	89

Abbildung 27:	Konsumperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (nach Sektor und Herkunftsregion)	91
Abbildung 28:	Gegenüberstellung des sektoralen Wasserverbrauchs und der Wasserintensität (aggregiert).....	93
Abbildung 29:	Gegenüberstellung des sektoralen Wasserverbrauchs und der Wasserintensität (nur deutsche Sektoren).....	94
Abbildung 30:	Gegenüberstellung Wasserverbrauch und Wasserintensität ..	95
Abbildung 31:	Gegenüberstellung Wasserverbrauch und Wasserintensität (Hotspots)	95
Abbildung 32:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Mittlerer Osten, RoW)	99
Abbildung 33:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Mittlerer Osten, RoW).....	100
Abbildung 34:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien).....	101
Abbildung 35:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien).....	102
Abbildung 36:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gesundheits- und Sozialwesen Dienstleistungen (Deutschland)	103
Abbildung 37:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Gesundheits- und Sozialwesen Dienstleistungen (Deutschland)	104
Abbildung 38:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Bauarbeiten (Deutschland).....	105
Abbildung 39:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Bauarbeiten (Deutschland).....	106
Abbildung 40:	Zuordnung des regionalen blauen Wasserverbrauchs von Deutschland auf Einzugsgebiete.....	108
Abbildung 41:	Zuordnung des regionalen blauen Wasserverbrauchs von Deutschland auf Flussgebiete.....	109
Abbildung 42:	Überschreitung der Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten	111
Abbildung 43:	Überschreitung der Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten - Hotspots	112
Abbildung 44:	Regionale Beiträge zum Wasserfußabdruck in Bezug auf die Überschreitung lokaler Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten.....	114
Abbildung 45:	Online-Tool	115
Abbildung 46:	Deutschlands Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch im Ausland.....	117

Abbildung 47:	Deutschlands Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch im Ausland nach Sektor.....	118
Abbildung 48:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Getreide unspezifisch (WA)	144
Abbildung 49:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Nutzpflanzen unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW).145	
Abbildung 50:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Deutschland).....	146
Abbildung 51:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Deutschland).....	147
Abbildung 52:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Kunststoffe (Deutschland)	148
Abbildung 53:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Kunststoffe (Deutschland)	149
Abbildung 54:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Fleischwaren unspezifisch (Deutschland).....	150
Abbildung 55:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Fleischwaren unspezifisch (Deutschland).....	151
Abbildung 56:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Asien und Pazifik, RoW).....	152
Abbildung 57:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Asien und Pazifik, RoW) ...	153
Abbildung 58:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Hotel und Gaststättengewerbe (Deutschland)	154
Abbildung 59:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Hotel und Gaststättengewerbe (Deutschland).....	155
Abbildung 60:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung (Deutschland)	156
Abbildung 61:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung (Deutschland)	157
Abbildung 62:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Chemikalien unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW)	158
Abbildung 63:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Chemikalien unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW) ..	159
Abbildung 64:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Mittlerer Osten, RoW)	160
Abbildung 65:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Mittlerer Osten, RoW)	161
Abbildung 66:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger (Deutschland)	162

Abbildung 67:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger (Deutschland)	163
Abbildung 68:	Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Niederlande)	164
Abbildung 69:	Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Niederlande)	165

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Datenübersicht	67
Tabelle 2:	Der konsuminduzierte Wasserverbrauch von Deutschland	78
Tabelle 3:	Indikatorenvorschlag	121
Tabelle 4:	Der gesamte blaue Wasserverbrauch einzelner Sektoren	126
Tabelle 5:	Regionale Beiträge zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland	141

Abkürzungsverzeichnis

BG	Belastbarkeitsgrenze
CF	Charakterisierungsfaktor
EE-IO	Umwelterweiterte Input-Output [Analyse]
EFR	Umweltbedingte Wasserflussanforderungen (<i>Environmental Flow Requirements</i>)
ISO	International Organisation für Normierung (<i>International Organization for Standardization</i>)
LCA	Ökobilanz (<i>Life Cycle Assessment</i>)
MGB	Menschlicher Wassergrundbedarf
MGV	Menschlicher Gesamtwasserverbrauch
mm	Millimeter (eine Wassersäule von 1.000 Millimeter pro Quadratmeter entspricht einer Wassermenge von 1.000 Liter oder 1 m ³)
Mio. m³ (auch Mm³)	Millionen Kubikmeter (1.000.000 × 1 m ³)
Mrd. m³	Milliarden Kubikmeter (1.000.000.000 × 1 m ³)
ProgRress	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
RoW	“Verbleibende Weltregionen” (<i>Rest of World</i>)
SPA	Strukturelle Pfadanalyse (<i>Structural Path Analysis</i>)
UN	Vereinte Nationen (<i>United Nations</i>)
USD	US-Dollar
WD	Wasserdargebot
WFN	Water Footprint Network

Begriffserklärungen

- **Belastbarkeitsgrenze für Wasser:** Die Belastbarkeitsgrenze eines (Fluss-)Einzugsgebiets entspricht der Menge an Wasser, von der angenommen wird, dass sie über einen bestimmten Zeitraum (bspw. monatlich) entnommen werden kann, ohne ökologische Schäden zu verursachen.
- **Blauer Wasserverbrauch:** Wasserverbrauch aus Oberflächenwasser und Grundwasser; d.h. zugängliches Süßwasser aus Seen, Flüssen und Grundwasserleitern. *Übersetzt aus Hoekstra et al. (2012)*
- **Charakterisierungsfaktor:** „Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird.“ (Quelle: ISO 14044)
- **Grauer Wasserverbrauch:** Der Graue Wasserfußabdruck ist ein Indikator für die Verunreinigung von Süßwasser, die mit der Herstellung eines Produkts [...] in Verbindung gebracht werden kann. Er ist definiert als die Menge an Süßwasser, die erforderlich ist, um die Verunreinigung [...] aufzunehmen [bzw.] um Verunreinigung so weit zu verdünnen, dass die Wasserqualität mit vereinbarten Wasserqualitätsnormen übereinstimmt. *Übersetzt aus Hoekstra et al. (2012)*
- **Grüner Wasserverbrauch:** Der Niederschlag über Landflächen, der nicht abfließt oder das Grundwasser anreichert, sondern welcher in der Erde gespeichert wird oder temporär auf der Erdoberfläche oder Vegetation verbleibt. Letztlich evaporiert oder transpiriert dieser Anteil des Niederschlags über Landflächen durch Pflanzen [...]. *Übersetzt aus Hoekstra et al. (2012)*
- **Inventar (konsum- und produktionsbasiert):** Im produktionsbasierten Inventar für die Endnachfrage einer bestimmten Region wird der Wasserverbrauch entlang der gesamten Wertschöpfungskette dem letzten Sektor in der Wertschöpfungskette zugeordnet. Das produktionsbasierte Inventar einer Region beinhaltet Imports, aber keine Exporte. Im konsumbasierten Inventar für die Endnachfrage einer bestimmten Region wird der Wasserverbrauch entlang der gesamten Wertschöpfungskette den Sektoren zugeordnet, in denen das Wasser tatsächlich verbraucht wurde. Das konsumbasierte Inventar einer Region beinhaltet Exporte, aber keine Importe.
- **Umweltbedingte Wasserflussanforderung:** Der Anteil am natürlichen Wasserdargebot in einem (Fluss)Einzugsgebiet, der erforderlich ist, um die lokalen aquatischen Ökosysteme in einem angemessenen ökologischen Zustand zu erhalten und daher nicht entnommen werden sollte.
- **Wasserfußabdruck:** „Kennzahl(en) zur quantitativen Bestimmung der potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser“ (Quelle: ISO 14046).
- **Wasserfußabdruck (Sachbilanz):** „Phase der *Ermittlung des Wasserfußabdrucks* [...], der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Input und Outputs im Zusammenhang mit Wasser [...] zusammenfasst.“ (Quelle: ISO 14046)
- **Wasserfußabdruck (Wirkungsabschätzung):** „Phase der *Ermittlung des Wasserfußabdrucks* [...], im Anschluss an die *Wasserfußabdruck-Sachbilanz* [...], die dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser, verursacht durch ein Produkt, einen Prozess oder eine Organisation, dient.“ (Quelle: ISO 14046)

- **Wasserverbrauch:** Oberbegriff für Wasserverbrauch (eine mögliche Unterteilung ist der blaue, graue und grüne Wasserverbrauch). *Wasserverbrauch* umfasst den Anteil der *Wassernutzung*, der nach der Nutzung nicht mehr für lokale Akteure oder Ökosysteme etc. im Herkunfts-Einzugsgebiet zur Verfügung steht, also bspw. eingearbeitet in Konsumgüter aus dem Herkunfts-Einzugsgebiet exportiert wird oder über Evaporation in andere Einzugsgebiete transportiert wird.

Zusammenfassung

Deutschland ist ein wasserreiches Land, in dem nur ein geringer Anteil der erneuerbaren Wasserressourcen genutzt wird. Neben der Nutzung von inländischen Wasserressourcen verbrauchen die Deutschen über ihren Konsum direkt und indirekt aber auch erhebliche Mengen an Wasser im Ausland. Dieser Sachverhalt ist Gegenstand des durch das Umweltbundesamt geförderte Forschungsvorhaben zur konzeptionellen Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks und motivierte die folgenden Forschungsschwerpunkte:

- ▶ Entwicklung einer Methode zur Bewertung der potenziellen Umweltwirkung durch den Wasserverbrauch unter Berücksichtigung des Konzepts der Planetaren Grenzen.
- ▶ Annäherung, Analyse und Bewertung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland auf Grundlage einer Input-Output-Analyse.
- ▶ Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Erfassung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland in der nationalen Ressourcenberichterstattung sowie zur Reduktion des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland.

Methoden und Konzepte zum Wasserfußabdruck

Einleitend wurden im vorliegenden Bericht bestehende Konzepte, Standards, Tools, Datenbanken und Wirkungsabschätzungsmethoden zum Wasserfußabdruck aufgelistet und anhand verschiedener Kriterien klassifiziert (siehe Abschnitt 2.1.1). Die Ergebnisse dieser strukturierten Zusammenfassung wurden durch ein interaktives webbasiertes Tool der Öffentlichkeit zugänglich gemacht¹. Aufgrund der unterschiedlichen Konzepte zum Wasserfußabdruck und der erheblichen wissenschaftlichen Weiterentwicklung des Konzepts eines Wasserfußabdrucks in den letzten zwei Jahrzehnten, wird in der nachfolgenden Infobox der aktuelle wissenschaftliche Kenntnisstand zum Wasserfußabdruck kurz zusammengefasst.

Übersicht zum Wasserfußabdruck

Der 2014 veröffentlichte ISO-Standard 14046 entspricht dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand zur Erfassung eines Wasserfußabdrucks. Nach ISO 14046 ist ein Wasserfußabdruck definiert als **„Kennzahl(en) zur quantitativen Bestimmung der potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser“**. Damit hebt sich der ISO-Standard inhaltlich von früheren oder anderen Konzepten ab, die eine Erfassung rein volumetrischer Kennzahlen vorsehen. Der im ISO-Standard 14046 beschriebene Ansatz zur Erfassung eines Wasserfußabdrucks ist aussagekräftiger als rein volumetrische Kennzahlen, da bspw. durch die gleiche Menge Wasserverbrauch oder Wasserverschmutzung je nach Region unterschiedliche Wirkungen in Bezug auf Ressourcenverfügbarkeit, Ökosysteme oder Menschen auftreten können.

In der Regel setzt die ISO-konforme Ermittlung eines Wasserfußabdrucks neben der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie der Auswertung der Ergebnisse zwei wesentliche Arbeitsschritte voraus:

- ▶ **Erfassung der Wasserfußabdruck-Sachbilanz:** „Phase der *Ermittlung des Wasserfußabdrucks* [...], der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Input und Outputs im Zusammenhang mit Wasser [...] zusammenfasst.“ (Quelle: ISO 14046)

¹ <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/der-wasserfussabdruck-von-deutschland/>

- **Durchführung Wirkungsabschätzung für den Wasserfußabdruck:** „Phase der *Ermittlung des Wasserfußabdrucks* [...], im Anschluss an die *Wasserfußabdruck-Sachbilanz* [...], die dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser, verursacht durch ein Produkt, einen Prozess oder eine Organisation, dient.“ (Quelle: ISO 14046)

Grundsätzlich gilt außerdem, dass ein vollumfänglicher Wasserfußabdruck mehrdimensional ist. Das bedeutet, dass neben der Menge Wasserverbrauch und den dadurch potenziell verursachten Umweltwirkungen auch die potenziellen Umweltwirkungen durch Wasserverschmutzung berücksichtigt werden sollten. Zur vollständigen Erfassung von Wasserverschmutzung wird ein Wasserqualitätsindex bestehend aus den Wirkungskategorien Gewässereutrophierung, Ökotoxizität (aquatisch und terrestrisch) und Gewässerversauerung vorgeschlagen.

Wenn ein Wasserfußabdruck nicht vollumfänglich ermittelt wurde, sollten die Ergebnisse mit einer näheren Bestimmung quantifiziert werden z.B. „nicht umfassender Wasserfußabdruck in Bezug auf Wasserknappheit“ oder „nicht umfassender Wasserfußabdruck in Bezug auf Gewässereutrophierung“.

Siehe auch Abschnitt 5 im vorliegenden Bericht und ISO 14046:2014.

Bewertung der potenziellen Umweltwirkung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs

Um den Wasserfußabdruck von Deutschland in Bezug auf die Übernutzung von Wasserressourcen weltweit zu bewerten, wurde eine an das Konzept der *Planetaren Belastbarkeitsgrenzen* angelehnte Analyse- und Wirkungsabschätzungsmethode entwickelt (Abschnitt 3.1.5).

Hierfür wurden für 8.250 Einzugsgebiete weltweit lokale Belastbarkeitsgrenzen berechnet, indem vom natürlichen Wasserdargebot in den Einzugsgebieten die umweltbedingten Wasserflussanforderungen subtrahiert wurden. Der daraus folgende Differenzwert bildet die jeweils lokale Belastbarkeitsgrenze innerhalb derer theoretisch nachhaltiger Wasserverbrauch möglich ist. Um die Übernutzung der ermittelten lokalen Belastbarkeitsgrenzen abzubilden, wurden diese in jedem Einzugsgebiet dem gesamten anthropogenen Wasserverbrauch im Einzugsgebiet gegenübergestellt. Der daraus folgende Quotient beschreibt somit das Ausmaß der Übernutzung in einem Einzugsgebiet und wurde angewendet, um den regional aufgeschlüsselten konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland (*Wasserfußabdruck-Sachbilanz*) zu charakterisieren (*Wirkungsabschätzung für den Wasserfußabdruck*).

Die berechneten Charakterisierungsfaktoren verdeutlichen, dass weltweit viele Einzugsgebiete von Übernutzung der lokalen Wasserressourcen betroffen sind. Dies gilt bspw. für die US-amerikanische Westküste, Südeuropa, Nordafrika, den Norden der arabischen Halbinsel, den Mittleren Osten als auch für Süd-, Zentral- und Ost-Asien (Abschnitt 3.1.5.1). Die Übernutzung der lokalen Wasserressourcen wird zumeist nicht durch den häuslichen Wasserverbrauch der lokalen Bevölkerung verursacht, sondern durch den Wasserverbrauch in der Produktion von Industrie- und Agrargütern. Häufig werden diese Güter aber nicht für den inländischen Konsum produziert, sondern für den Export und werden damit auch in anderen Ländern als der Herkunftsregion konsumiert. Es war daher ein weiteres Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens zu ermitteln, welchen Anteil der Konsum in Deutschland an den Überschreitungen der lokalen Wasserressourcen weltweit hat.

Wie obenstehend in der Infobox „Übersicht zum Wasserfußabdruck“ bereits ausgeführt, definiert der internationale Standard DIN EN ISO 14046 zum Wasserfußabdruck ebendiesen als „Kennzahl(en) zur quantitativen Bestimmung der potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser“. Ein Wasserfußabdruck setzt sich neben der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie der Auswertung der Ergebnisse aus zwei wesentlichen Arbeitsschritten zusammen, namentlich der *Erfassung der Wasserfußabdruck-Sachbilanz* und nachfolgend der *Durchführung der Wirkungsabschätzung für den Wasserfußabdruck*.

Die Wasserfußabdruck-Sachbilanz der Konsumierenden in Deutschland wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben auf Grundlage einer *Input-Output-Analyse* und unter Verwendung der Exiobase-Datenbank v3.8.1 angenähert. Mit Input-Output-Analysen können globale Daten zum Wasserverbrauch anhand ökonomischer Beziehungen zwischen Wirtschaftssektoren und Konsumierenden den einzelnen Akteuren in der Weltwirtschaft zugeordnet werden.

Für die Wirkungsabschätzung für den Wasserfußabdruck von Deutschland wurde die Wasserfußabdruck-Sachbilanz der Konsumierenden in Deutschland auf die potenziellen Herkunftseinzugsgebiete weltweit zugeordnet. Durch die Multiplikation dieser auf Herkunftseinzugsgebiete aufgeteilten Anteile der Wasserfußabdruck-Sachbilanz mit den zuvor entwickelten Charakterisierungsfaktoren wurde den einzelnen Beiträgen entsprechend ihrer potenziellen Umweltwirkung in Bezug auf die Übernutzung der lokalen Wasserressourcen jeweils eine höhere oder geringere Bedeutung beigemessen.

Annäherung der Wasserfußabdruck-Sachbilanz

Nach der beschriebenen Vorgehensweise summiert sich die Wasserfußabdruck-Sachbilanz der Deutschen auf 219 Mrd. m³ pro Jahr. Diese Menge entspricht in etwa einem täglichen Pro-Kopf-Verbrauch von 7,2 m³. Die Herkunftsregion des verbrauchten Wassers ist zu 14% Deutschland (Wasserverbrauch im Inland) und zu 86% das Ausland (Wasserverbrauch im Ausland; Tabelle 2). Der Wasserverbrauch von Deutschland im Inland setzt sich zu 75% aus grünem Wasser, zu 21% aus grauem Wasser und zu 4% aus blauem Wasser zusammen. Der Wasserverbrauch von Deutschland im Ausland setzt sich zu 83% aus grünem Wasser, zu 6% aus grauem Wasser und zu 11% aus blauem Wasser zusammen (Abbildung 20).

Der geringe Anteil von inländischen, also aus Deutschland kommenden Beiträgen zur Wasserfußabdruck-Sachbilanz der Deutschen wirft die Frage danach auf, welche Regionen weltweit, eingebettet in Konsumgüter² Anteile zur Wasserfußabdruck-Sachbilanz der Deutschen beitragen und in welchen Regionen diese Beiträge in Bezug auf die Übernutzung der lokalen Wasserressourcen potenziell problematisch sind.

Die Regionen mit den *höchsten Gesamtbeiträgen* (blaues, graues und grünes Wasser) zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland sind in Abbildung 21 dargestellt. Der höchste Beitrag wird durch Deutschland selber (30.365 Mio. m³) bereitgestellt, gefolgt von den Regionen Afrika (29.758 Mio. m³), Asien und Pazifik (28.417 Mio. m³), USA (13.507 Mio. m³), Europa (13.286 Mio. m³), Amerika (12.535 Mio. m³), Spanien (10.184 Mio. m³), China (9.270 Mio. m³), Indien (8.001 Mio. m³) und Polen (7.424 Mio. m³).

² Das Konzept von *eingebettetem Wasser* wurde von Allan (2003, 1998, 1996) begründet und findet heute in der Regel unter dem Begriff *virtuelles Wasser* Verwendung. Es handelt sich dabei um Wasser, dass eingearbeitet in Güter zwischen Regionen importiert und exportiert wird.

Da insbesondere blaues Wasser für die Menschen von besonderer Bedeutung ist, war der Fokus der nachfolgenden Detailanalyse der Wasserfußabdruck-Sachbilanz der Deutschen stets das blaue Wasser.

Die Regionen mit den höchsten Beiträgen zum *blauen* Wasserverbrauch von Deutschland sind in Abbildung 22 dargestellt. Der höchste Beitrag wird durch die Region Asien und Pazifik (5.394 Mio. m³) bereitgestellt, gefolgt von den Regionen Mittlerer Osten (3.822 Mio. m³), China (2.189 Mio. m³), Spanien (2.097 Mio. m³), Indien (1.414 Mio. m³), USA (1.203 Mio. m³), Deutschland (1.166 Mio. m³), Afrika (1.079 Mio. m³) und der Türkei (624 Mio. m³).

Die Sektoren mit den höchsten Beiträgen blauen Wassers zur Wasserfußabdruck-Sachbilanz von Deutschland sind die Sektoren Gemüse, Früchte, Nüsse (5.960 Mio. m³), Nutzpflanzen unspezifisch (4.909 Mio. m³), Weizen (1.980 Mio. m³), Reis (1.651 Mio. m³), Getreide unspezifisch (1.270 Mio. m³), Zuckerrohr/Zuckerrüben (1.207 Mio. m³), Ölsamen (1.152 Mio. m³), Vieh (563 Mio. m³), Kunststoffe (521 Mio. m³) und Eisen, Stahl, Ferrolegierungen und Primärprodukte daraus (353 Mio. m³; siehe Abbildung 23). Ein Großteil der Sektoren stammt somit aus dem Agrarbereich.

Betrachtet man die gesamte Wertschöpfungskette, sind die Sektoren mit den höchsten Beiträgen blauen Wassers zur Wasserfußabdruck-Sachbilanz von Deutschland die Sektoren Gemüse, Früchte, Nüsse (4.503 Mio. m³); Nahrungsmittel unspezifisch (2.649 Mio. m³); Nutzpflanzen unspezifisch (2.556 Mio. m³); Gesundheits- und Sozialwesen Dienstleistungen (1.189 Mio. m³); Hotel- und Gaststättengewerbe (1.025 Mio. m³); Kunststoffe (879 Mio. m³); Chemikalien unspezifisch (646 Mio. m³); Bauarbeiten (641 Mio. m³); Fleischwaren unspezifisch (563 Mio. m³) und Textilien (508 Mio. m³; siehe Abbildung 26).

Annäherung des Wasserfußabdrucks³

Da die alleinige Betrachtung der Wasserfußabdruck-Sachbilanz nur eine beschränkte Aussagekraft in Bezug auf die potenziellen Umweltwirkungen hat, wurde zusätzlich Deutschlands Wasserfußabdruck in Bezug auf die Übernutzung der lokalen Wasserressourcen weltweit angenähert. Die einzelnen regionalen Beiträge blauen Wassers zur Wasserfußabdruck-Sachbilanz wurden also mit regionalspezifischen Charakterisierungsfaktoren multipliziert. Die Charakterisierungsfaktoren reflektieren die Übernutzung der lokalen Wasserressourcen in Einzugsgebieten weltweit. Gegenüber der in Abbildung 22 dargestellten Wasserfußabdruck-Sachbilanz von Deutschland gewinnen durch die Charakterisierung bspw. die Regionen Mittlerer Osten, Spanien, Afrika, Mexiko und Griechenland erheblich an Bedeutung. Die Region Asien und Pazifik verliert gegenüber den Regionen Mittlerer Osten und Spanien zwar an Bedeutung, ist aber insgesamt dennoch von hoher Bedeutung. Darüber hinaus zeigt sich, dass der eigene Beitrag Deutschlands zum Wasserfußabdruck in Bezug auf die Übernutzung lokaler Wasserressourcen quasi vernachlässigbar ist (Abbildung 44).

Schätzungsweise 9,7% der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland überschreiten die lokalen Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten. Hotspots sind Spanien und Südasien. In geringerem Maße aber auch die USA, Nordafrika, und der Mittlere Osten (Abschnitt 4.2.4.1; Abbildung 43).

In Bezug auf Wasserverschmutzung ist die Entwicklung von Charakterisierungsmodellen und globalen Umweltdaten noch nicht abgeschlossen. Demnach ist es im Rahmen des vorliegenden

³ Da aufgrund mangelnder Datengrundlage kein mehrdimensionaler Wasserqualitätsindex berechnet wurde, handelt es sich um einen *nicht umfassenden* Wasserfußabdruck.

Berichts nicht möglich, umfängliche Aussagen zur Wasserverschmutzung in Zusammenhang mit Deutschlands Wasserfußabdruck-Sachbilanz zu treffen.

Vorschlag für Indikatoren zur Erfassung des Wasserfußabdrucks von Deutschland

In Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 14046 zum Wasserfußabdruck und vor dem Hintergrund der priorisierten Erfassung von potenziellen Umweltwirkungen anstatt ausschließlich Verbrauchsvolumina werden zur Erfassung des Wasserfußabdrucks von Deutschland folgende Wirkungskategorien vorgeschlagen: Wasserknappheit und Wasserverschmutzung.

Für beide Wirkungskategorien werden Leitindikatoren und Hilfsindikatoren vorgeschlagen. Nur die Leitindikatoren bilden die Wirkungskategorie mit akzeptabler Robustheit wirkungsorientiert ab. In Bezug auf Wasserknappheit stehen operativ anwendbare Modelle und Daten zur Verfügung, um den vorgeschlagenen Leitindikator anzuwenden. Bei der Wasserknappheit ist der volumetrische Wasserfußabdruck ein Hilfsindikator, der aufgrund der Anwendbarkeit des Leitindikators aber eigentlich nicht mehr notwendig ist. In Bezug auf Wasserverschmutzung ist die Entwicklung von Charakterisierungsmodellen und globalen Umweltdaten noch nicht abgeschlossen (Abschnitt 5.1.2).

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde die Wasserfußabdruck-Sachbilanz (blauer Wasserverbrauch) gemäß den Überschreitungen der Belastbarkeitsgrenzen im Herkunftseinzugsgebiet charakterisiert. Denkbar ist aber auch eine Charakterisierung mit der Konsensmethode des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) und der Gesellschaft für Umwelttoxikologie und -Chemie (SETAC) AWARE (Boulay et al. 2018) oder WAVE+ (Berger et al. 2018).

Bei der Wasserverschmutzung sind zwar einige Leitindikatoren wie z.B. verschiedene Wasserqualität-Indizes, definiert worden. Sie sind aber heute methodisch und bezüglich der Datenlage noch nicht robust anwendbar. Deshalb muss hier noch auf einen Hilfsindikator wie den grauen Wasserfußabdruck zurückgegriffen werden. Aufgrund der methodischen Defizite dieses Hilfsindikators sollte er durch robustere Leitindikatoren ersetzt werden, sobald es der wissenschaftliche Fortschritt erlaubt.

Für die Operationalisierung der vorgeschlagenen Indikatoren und zur Ableitung von Zielwerten und Handlungsmöglichkeiten sind mehrere Möglichkeiten denkbar bspw. die direkte Zielwertableitung (Reduktion um X% über einen Zeitraum Y), die Ableitung analog zu ProgRess (Erhöhung der Rohstoff bzw. Wasserproduktivität) oder eine Zielwertableitung mit Fokus auf wasserknappe Regionen.

Indikatorenvorschlag

Die Tabelle zeigt die vorgeschlagenen Leit- und Hilfsindikatoren zur Erfassung des konsuminduzierten Wasserfußabdrucks von Deutschland.

Wirkungskategorie	Indikatoren	Qualität	Quantifizierung	Anmerkung
Wasserknappheit	Knappheitsgewichteter Wasserfußabdruck ⁴	<u>Leitindikator</u> Wirkungsindikator mit hoher Aussagekraft; Anwendbarkeit gegeben;	Wassermenge [Volumen _{Gewichtet}]	Im Kontext nationaler Ressourcenberichterstattung anwendbar: Charakterisierung bspw. über das im vorliegenden Forschungsvorhaben entwickelte Charakterisierungsmodell oder andere Charakterisierungsmodelle wie bspw. AWARE oder WAVE+.
Wasserknappheit	Volumetrischer Wasserfußabdruck	<u>Hilfsindikator</u> Inventargröße mit geringer Aussagekraft; Anwendbarkeit gegeben;	Wassermenge [Volumen]	Im Kontext nationaler Ressourcenberichterstattung anwendbar: Entwicklung von Umwelterweiterungen für Input-Output-Analyse über globale hydrologische Modelle (bspw. WaterGAP oder LPJmL) oder sektorspezifische Datenbanken wie bspw. FAOSTAT. Industrieller Wasserverbrauch ist jedoch nur schwer aufzuschlüsseln.
Wasserverschmutzung	Wasserverschmutzung in verschiedenen Wirkungskategorien	<u>Leitindikator(en)</u> Naturwissenschaftliche Wirkungsindikatoren mit hoher Aussagekraft; Anwendbarkeit nicht gegeben;	Wasserverschmutzungsindex • Gewässereutrophierung [kg PO ₄ eq] • Ökotoxizität (aquatisch und terrestrisch) [kg 1,4-dichlorobenzene eq.] • Gewässerversauerung [kg SO ₂ eq.]	Im Kontext nationaler Ressourcenberichterstattung nicht anwendbar: Die Verfügbarkeit globaler Datensätze zur regionalen Emission wasserverschmutzender Substanzen ist nicht gegeben.
Wasserverschmutzung	Grauer Wasserfußabdruck	<u>Hilfsindikator</u> Gewichtung über Grenzwerte; Geringe Aussagekraft; Anwendbarkeit mit Einschränkungen gegeben;	Wassermenge [Volumen]	Im Kontext nationaler Ressourcenberichterstattung eingeschränkt anwendbar: Globale Datensätze existieren, bilden aber nur einzelne Schadstoffeinträge ab (i.d.R. Phosphor oder Stickstoff).

⁴ Water Scarcity Footprint

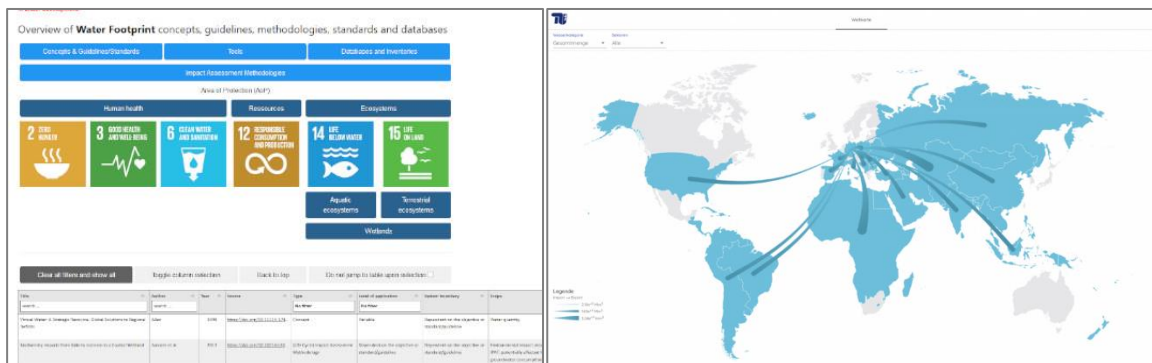
Tools

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden zwei Tools entwickelt. Beide Tools und weiterführende Informationen einschließlich des externen Anhangs sind unter folgender Webadresse frei verfügbar:

<https://wf-tools.see.tu-berlin.de/der-wasserfussabdruck-von-deutschland/>

Water Footprint Toolbox: Eine interaktive tabellarische Übersicht, die es Anwendenden ermöglicht, anhand von Kriterien durch eine Vielzahl von Ressourcen zum Thema Wasserfußabdruck zu navigieren. Die Wasserfußabdruck-Toolbox umfasst Konzepte, Richtlinien, Standards, Tools, Datenbanken und Sachbilanzen sowie Methoden zur Wirkungsabschätzung in Bezug auf den Wasserfußabdruck. Während Konzepte, Richtlinien und Standards einen generellen Rahmen zur Durchführung einer Wasserfußabdruckstudie bieten, können Datenbanken die Grundlage für eine Wasserfußabdruck-Sachbilanz bilden. Wirkungsabschätzungsmethoden dienen der Wasserfußabdruck-Sachbilanz nachfolgenden Phase der Wirkungsabschätzung. Die Wirkungsabschätzungsmethoden sind entsprechend der Schutzgüter menschliche Gesundheit, Ressourcen und Ökosysteme (aquatische Ökosysteme, terrestrische Ökosysteme und Feuchtgebiete) eingeordnet. Weiterhin werden die Methoden zur Wirkungsabschätzung entsprechend der Relevanz für Ziele für Nachhaltige Entwicklung klassifiziert.

Virtual Water Tool: Visualisierung Deutschlands virtueller Wasserimporte basierend auf der Exiobase-Datenbank v3.8.1. Das Tool ermöglicht eine differenzierte Darstellung von blauen, grauen und grünen Wasserflüssen sowie aller in der Exiobase-Datenbank hinterlegten Sektoren. Wird als Sektor „Alle“ ausgewählt, ermöglicht ein Klick auf eine der Regionen die Auflistung der Sektoren mit den höchsten Beiträgen zum gesamten virtuellen Wasserexport der ausgewählten Region. Zusätzlich werden die wichtigsten Wasserflüsse in einem Kreisring-Diagramm abgebildet.



Weitere empfehlenswerte Tools zum Thema Wasserfußabdruck sind bspw.

- Der WWF Water Risk Filter: <https://waterriskfilter.panda.org/>
- Das WELLE Tool zur Bestimmung eines Wasserfußabdrucks von Unternehmen/Organisationen: <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/wf-tools/owf/#/calculation>
- Die Visualisierung des Wasserfußabdrucks der deutschen und europäischen Agrarimporte: <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/>

Limitierungen und methodische Erkenntnisse

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde über Input-Output-Analyse die Wasserfußabdruck-Sachbilanz und der Wasserfußabdruck von Deutschland in Bezug auf die Übernutzung der lokalen Wasserressourcen angenähert. Es handelt sich bei den Ergebnissen ausdrücklich nicht um empirisch erhobene Daten und damit auch in keinem Fall um ein fehlerfreies Abbild von Deutschlands tatsächlichen konsuminduzierten Wasserverbrauch. Die Ergebnisse sind durch methodische (bspw. Proportionalitätsannahme; siehe Abschnitt 3.2.5.1) und datenbedingte Einschränkungen (bspw. Satellitenkonten sowie sektorale und regionale Auflösung; siehe Abschnitt 6 und Abschnitt 3.2.5) limitiert. Folglich sollten die dargestellten Ergebnisse stets kritisch betrachtet werden.

Gemäß der nativen Satellitenkonten für Wasser der Exiobase-Datenbank v3.8.1 stellen einige wenige Sektoren einen erheblichen Anteil am gesamten weltweiten Wasserverbrauch. 50 von insgesamt 9.800 Sektoren mit den höchsten Werten für sektoralen blauen Wasserverbrauch, gemäß Exiobase-Datenbank alleine zu 87% zum weltweiten gesamten blauen Wasserverbrauch bei. Somit dominieren einige wenige Sektoren die gesamte Analyse (Abschnitt 3.2.2).

Eine weitere Limitierung ist, dass ein großer Anteil der in Bezug auf die Umweltwirkung relevantesten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch von Deutschland aus Weltregionen stammt, die in der Exiobase-Datenbank nur aggregiert vorliegen bspw. *Mittlerer Osten, Asien und Pazifik* oder *Afrika*. Dieser Umstand ist auch der teilweise geringen Datenqualität der Handelsstatistiken einiger Nicht-OECD Länder geschuldet.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der Wasserverbrauch in der Exiobase-Datenbank über monetäre Werte abgebildet wird. Die mit monetären Werten einhergehende Konsummenge kann aber variieren. So kann z.B. ein 1 kg Weizen für nahezu einen beliebigen Wert erworben werden z.B. 1€ oder 2€. Mit 2€ Konsum wären in der Input-Output-Rechnung im Vergleich zu 1€ Konsum die doppelten Umweltwirkungen verbunden.

Empfehlungen

Im Folgenden sind einige der aus dem vorliegenden Forschungsvorhaben hervorgehenden Kernempfehlungen aufgelistet. Diese Empfehlungen umfassen einerseits praktische Empfehlungen zur Reduktion des konsuminduzierten Wasserfußabdrucks und andererseits Empfehlungen in Bezug auf nationale Ressourcenberichterstattung und methodische Limitierungen.

- Eine Reduktion der Wasserfußabdruck-Sachbilanz sollte in erster Linie für die Sektoren mit einer großen Hebelwirkung angestrebt werden. Also Sektoren, die besonders wasserintensive Konsumgüter produzieren und zwar einschließlich der Lieferkette. Darüber hinaus sollte aber auch der Wasserfußabdruck in Bezug auf die Übernutzung lokaler Wasserressourcen berücksichtigt werden. Entsprechende Reduktionsmaßnahmen sollten Regionen priorisieren, in denen lokale Belastbarkeitsgrenzen bereits überschritten werden oder Belastbarkeitsgrenzen beinahe erreicht sind.
- Der überwiegende Anteil an der Wasserfußabdruck-Sachbilanz als auch des Wasserfußabdrucks wird durch Agrarsektoren verursacht. Akteure in diesem Sektor, insbesondere in Weltregionen, in denen lokale Wasserressourcen übernutzt werden, sollten daher befähigt werden, wassereffizient zu wirtschaften. Ein Programm zur Initiierung entsprechender Maßnahmen kann bspw. *Water Stewardship* sein⁵. Das heißt, die Diskussion

⁵ <https://a4ws.org/about/>

um Reduktionsmöglichkeiten muss immer das Ziel der Verbesserung der lokalen Verhältnisse vor Ort haben und in keinem Fall die Beendigung bspw. wirtschaftlicher Verhältnisse.

- ▶ Für die nationale Ressourcenberichterstattung wird empfohlen, in Bezug auf Wasserverbrauch wirkungsorientierte Kennzahlen in Anlehnung an den ISO Standard 14046 zum Wasserfußabdruck zu erfassen. Dies würde einerseits den knappheitsgewichteten Wasserfußabdruck und andererseits den Wasserfußabdruck in Bezug auf Wasserverschmutzung umfassen.
- ▶ Für die Operationalisierung des Wasserfußabdrucks im Rahmen der nationalen Wasserstrategie sind mehrere Möglichkeiten denkbar bspw. die direkte Zielwertableitung (Reduktion um X% über einen Zeitraum Y), eine Ableitung analog zu ProgRess (Erhöhung der Rohstoff bzw. Wasserproduktivität) oder eine Zielwertableitung mit Fokus auf wasserknappe Regionen.
- ▶ Eine Erfassung des nationalen Wasserfußabdrucks von Deutschland im Rahmen der nationalen Ressourcenberichterstattung ist aber nur eingeschränkt möglich. In Bezug auf Wasserverschmutzung gibt es bspw. noch keine umfassenden Umwelterweiterungen für existierende Input-Output-Datenbanken.
- ▶ Die Fortführung und Weiterentwicklung von Input-Output Datenbanken ist abhängig von Fördergeldern. Eine Förderung der Entwicklung entsprechender Datensätze ist daher erstrebenswert. Weitere Fortentwicklungen sollten die regionale und sektorale Auflösung der Agrarsektoren in Input-Output-Datenbanken priorisieren.
- ▶ In Bezug auf die robuste und langfristige Erfassung des Wasserfußabdrucks von Deutschland im Rahmen der nationalen Ressourcenberichterstattung ist Konsistenz und langfristige Verfügbarkeit eine der wichtigsten Anforderungen an Input-Output-Datenbanken. Input-Output-Datenbanken werden kontinuierlich weiterentwickelt und müssen dabei bspw. abwärtskompatibel bleiben. Mit neuen Versionen der Datenbanken müssen auch vergangene Jahre analysiert werden können. Denn nur so können trotz Veränderungen der Datenbanken durch Fortentwicklung langfristige Trends im Ressourcenverbrauch einzelner Länder analysiert werden.
- ▶ Für die Anwendungen eines Indikators und der entsprechenden Datengrundlage sollte die strategische Zielstellung berücksichtigt werden. Als Datengrundlage braucht es nicht die Datenbank mit den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen, sondern Zuverlässigkeit und Sicherheit, dass die Daten/Ergebnisse „richtungssicher“ sind.
- ▶ In Bezug auf Bildungs- und Kommunikationsmaßnahmen zum Wasserfußabdruck muss die Bedeutung *wirkungsorientierter* Kennzahlen, also eines knappheitsgewichteten Wasserfußabdrucks und Wasserverschmutzung, in den Vordergrund rücken. Diese Maßnahme ist erforderlich, da die häufig vorherrschenden volumetrischen Kennzahlen zum Wasserfußabdruck lediglich eine geringe Aussagekraft haben.

Summary

Germany is a water-rich country in which only a small proportion of renewable water resources are subject to consumptive use. In addition to the domestic consumption of water, however, Germans also consume considerable amounts of water abroad, both directly and indirectly, through their consumption. Investigating this *consumption-induced water consumption* is the core subject of the research project on the conceptual advancement of the water footprint funded by the German Environment Agency (Umweltbundesamt) and motivated the following research topics:

- ▶ Development of a method for assessing the potential environmental impact of water consumption, taking into account the concept of *planetary boundaries*
- ▶ Approximation, analysis and assessment of the consumption-induced water consumption of Germany based on input-output analysis.
- ▶ Deriving recommendations for assessing the consumption-induced water consumption of Germany within the framework of national resource accounting as well as for reducing the consumption-induced water consumption of Germany

Water Footprint Methods and Concepts

First, this report summarises existing concepts, standards, tools, databases and impact assessment methods concerning water footprinting and classified them according to various criteria (cf. section 2.1.1). The results of this structured summary are available to the public via an interactive web-based tool⁶. Given the different concepts of a water footprint and the considerable scientific development in the field of water footprinting over the last two decades, the following box provides a succinct overview on the current scientific state of knowledge regarding a water footprint.

Water Footprint Overview

The ISO 14046 standard, published in 2014, represents the current scientific state of the art for assessing a water footprint. According to ISO 14046, a water footprint is defined as „**metric(s) that quantifies the potential environmental impacts related to water**“. This sets the ISO 14046 standard apart from other concepts on water footprinting in terms of not solely assessing volumetric quantities of water consumption. Contrary, the approach standardised in ISO14046 for assessing a water footprint is more representative than volumetric indicators because the same amount of water consumption or water pollution can have different impacts on resource availability, ecosystems or humans depending on local conditions.

In addition to the definition of the goal and the scope of the investigation as well as the evaluation of the results, an ISO-compliant assessment of a water footprint requires two essential steps.

⁶ <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/der-wasserfussabdruck-von-deutschland/>

- **Water Footprint Inventory Analysis:** „Phase of *water footprint assessment* [...], involving the compilation and quantification of inputs and outputs related to water for products, processes or organizations as stated in the goal and scope definition phase“ (source: ISO 14046)
- **Water Footprint Impact Assessment:** „Phase of a *water footprint assessment* [...], following the *water footprint inventory analysis* [...], aimed at understanding and evaluating the magnitude and significance of the potential environmental impacts related to water of a product, process or organisation“ (source: ISO 14046)

In general, a comprehensive water footprint is multidimensional. This means that in addition to the amount of water consumption and the associated potential environmental impacts, the potential environmental impacts of water pollution should be assessed as well. A holistic assessment of water pollution shall feature a water quality index consisting of the impact categories eutrophication, ecotoxicity (aquatic and terrestrial) as well as acidification.

If a water footprint is assessed incomprehensively, the results should be quantified with a detailed description e.g. “incomprehensive water footprint related to water scarcity” or “incomprehensive water footprint related to water eutrophication”.

Cf. section 5 and ISO 14046:2014

Assessment of the potential environmental impacts of consumption-induced water consumption

In order to assess the water footprint of Germany with regard to the exceedance of local safe operating spaces worldwide, an analysis and impact assessment method based on the concept of *planetary boundaries* was developed (section 3.1.5).

For this purpose, local safe operating spaces were calculated for 8,250 watersheds worldwide by subtracting the environmental water flow requirements from the natural water availability in the respective watersheds. The resulting difference represents the local safe operating space within which sustainable water consumption is potentially possible. In order to map the exceedance of the local safe operating spaces worldwide, the local safe operating spaces were compared to the total anthropogenic water consumption within the watersheds. The resulting quotient thus describes the extent of exceedance of a local safe operating space of a watershed and was used to characterize (*water footprint impact assessment*) the regionally disaggregated consumption-induced water consumption of Germany (*water footprint inventory analysis*).

The calculated characterization factors clearly indicate that many watersheds worldwide are affected by overuse of local water resources. This applies, for example, to the US West Coast, Southern Europe, North Africa, the North of the Arabian Peninsula, the Middle East as well as South, Central and East Asia (section 3.1.5.1). The overuse of local water resources is mostly not caused by the domestic water consumption of the local population, but by the consumption of water in the production of industrial and agricultural goods. Often, however, these goods are not produced for domestic consumption, but for export and are therefore also consumed in countries other than the region of origin. It was therefore a further goal to determine the share of consumption-induced water consumption of Germany in exceedance of local safe operating spaces of watersheds worldwide.

As already explained above in the information box "Water Footprint Overview", the international standard DIN EN ISO 14046 on water footprinting defines a water footprint as

„metric(s) that quantifies the potential environmental impacts related to water“. In addition to the definition of the goal and scope as well as the interpretation of the results, a water footprint consists of two essential steps, namely the *water footprint inventory analysis* and subsequently the *water footprint impact assessment*.

The water footprint inventory of Germany was approximated based on *input-output analysis* and under use of the Exiobase database v3.8.1. With input-output analysis, global data on water consumption can be allocated to the actors within the global economy based on economic relationships between sectors and consumers.

For the impact assessment of the water footprint of Germany, the water footprint inventory was allocated to potential regions of origin on a watershed level worldwide. By multiplying these watershed-level shares in the water footprint inventory with the afore-developed characterization factors, all shares of the water footprint inventory were weighted based on their potential impact with regard to the exceedance of local safe operating spaces of watersheds worldwide.

Water Footprint Inventory Analysis

Based on the described method, the water footprint inventory of Germany is 219 billion. m³ per year. This amount corresponds approximately to a daily per capita water consumption of 7.2 m³. Approximately 14% of the consumed water originates from within Germany (domestic water consumption) and 86% of the consumed water originates from abroad (water consumption abroad; cf. Tabelle 2). Germany's domestic water consumption consists of 75% green water, 21% grey water and 4% blue water. Germany's water consumption abroad consists of 83% green water, 6% grey water and 11% blue water (cf. Abbildung 20).

The relatively low proportion of domestic contributions to the water footprint inventory of Germany poses the question of which regions worldwide contribute most water to Germany's water consumption via consumer goods⁷ and in which of these regions water resources are being used beyond sustainable thresholds.

The regions with the highest total contributions (blue, green, grey) to the water footprint inventory of Germany are Germany itself (30,365 Mio. m³) followed by the regions Africa (29,758 Mio. m³), Asia and Pacific (28,417 Mio. m³), USA (13,507 Mio. m³), Europe (13,286 Mio. m³), America (12,535 Mio. m³), Spain (10,184 Mio. m³), China (9,270 Mio. m³), India (8,001 Mio. m³) and Poland (7,424 Mio. m³; cf. Abbildung 21).

Since blue water in particular is of special importance to humans, the focus of the following detailed analysis of the water footprint inventory of Germany was always blue water.

The regions with the highest contributions of blue water to Germany's water footprint are Asia and Pacific (5,394 Mio. m³), followed by Middle East (3,822 Mio. m³), China (2,189 Mio. m³), Spain (2,097 Mio. m³), India (1,414 Mio. m³), USA (1,203 Mio. m³), Germany (1,166 Mio. m³), Africa (1,079 Mio. m³) and Turkey (624 Mio. m³; cf. Abbildung 22).

The sectors with the highest contributions of blue water to Germany's water footprint inventory are vegetables, fruits nuts (5,960 Mio. m³), crops not elsewhere specified (4,909 Mio. m³), wheat (1,980 Mio. m³), rice (1,651 Mio. m³), cereal grains not elsewhere specified (1,270 Mio. m³), sugar cane and sugar beet (1,207 Mio. m³), oil seeds (1,152 Mio. m³), cattle (563 Mio. m³),

⁷The concept of embedded water was *founded* by Allan (2003, 1998, 1996) and is now usually used under the term *virtual water*. It is water that is incorporated into goods imported and exported between regions.

plastics (521 Mio. m³) and basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof (353 Mio. m³; cf. Abbildung 23). A large part of the sectors thus originates from the agricultural sector.

Considering the entire value chain, the sectors with the highest contributions of blue water to Germany's water footprint inventory are vegetables, fruits nuts, (4,503 Mio. m³); food products not elsewhere specified (2,649 Mio. m³); crops not elsewhere specified (2,556 Mio. m³); health and social work services (1,189 Mio. m³); hotel and restaurant services (1,025 Mio. m³); plastics (879 Mio. m³); chemicals not elsewhere specified (646 Mio. m³); construction work (641 Mio. m³); meat not elsewhere specified (563 Mio. m³) and textiles (508 Mio. m³; cf. Abbildung 26).

Approximation of the Water Footprint⁸

However, considering only the water footprint inventory does not allow to conclude on potential impacts and therefore has limited significance. Hence, also Germany's water footprint with regard to the exceedance of local safe operating spaces of watersheds worldwide was determined as well. For this, the regional contributions of blue water to the water footprint inventory of Germany were multiplied by region-specific characterisation factors. The characterisation factors reflect the exceedance of local safe operating spaces of watersheds worldwide. Compared to the water footprint inventory of Germany shown in Abbildung 22, the regions *Middle East, Spain, Africa, Mexico* and *Greece*, for example, gain considerably in significance as a result of the characterisation. The region *Asia and Pacific* loses in significance compared to the regions *Middle East* and *Spain*, but is still highly significant overall. Furthermore, Germany's own contribution to its water footprint is almost negligible in terms of the exceedance of local safe operating spaces of watersheds (cf. Abbildung 44).

It is estimated that 9,7% of the contributions to Germany's consumption-induced blue water consumption exceed the local carrying capacity of watersheds worldwide and are thus not sustainable. Hotspots are Spain and South Asia. To a lesser extent, however, also the USA, North Africa, and the Middle East (cf. section 4.2.4.1; cf. Abbildung 43).

With regard to water pollution, the development of characterisation models and global environmental data set has not yet reached maturity. Accordingly, it was not possible within the scope of this report to assess water pollution induced through consumption in Germany comprehensively.

Proposal for indicators to measure the water footprint of Germany

Following the DIN EN ISO 14046 standard on water footprinting and against the background of prioritised assessment of potential environmental impacts instead of only consumption volumes, the following impact categories are proposed for assessing the water footprint of Germany: water scarcity and water pollution.

Key indicators and auxiliary indicators are proposed for both impact categories. Only the key indicators map the impact category in an impact-oriented way with acceptable robustness. With regard to water scarcity, applicable models and data sets are available for applying the proposed key indicator. For water scarcity, the volumetric water footprint is an auxiliary indicator, but is actually no longer necessary due to the applicability of the key indicator. With regard to water

⁸ As a multidimensional water quality index was not calculated due to a lack of data, the presented results represent an *incomprehensive water footprint* assessment.

pollution, the development of characterisation models and global environmental data sets has not yet reached maturity (cf. section 5.1.2).

In the present research project, the water footprint inventory (blue water consumption) was characterised according to the exceedances of the local safe operating spaces in the watersheds of origin. However, a characterisation with the consensus method of the United Nations Environment Programme (UNEP) and the Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) AWARE (Boulay et al. 2018) or WAVE+ (Berger et al. 2018) is also possible.

In the case of water pollution, several key indicators, such as various water quality indices, have been proposed. However, they are not yet robustly applicable in terms of methodology and data. Therefore, an auxiliary indicator namely *grey water* was applied. Due to the methodological deficits of this auxiliary indicator, it should be replaced by the more robust key indicators as soon as scientific progress allows.

For the operationalisation of the proposed indicators and for the derivation of target values and mitigation, several options are possible, e.g. the direct derivation of target values (reduction by X% over a period of time Y), the derivation analogous to ProgRes (increase in raw material or water productivity) or a derivation of target values with a focus on water-scarce regions.

Proposed indicators

The table shows the proposed key- and auxiliary indicators for assessing the consumption-induced water footprint of Germany.

Impact category	Indicators	Qualification	Quantification	Remark
Water scarcity	Scarcity-weighted water footprint ⁹	<u>Key indicator</u> Impact indicator with high informative value; Applicable;	Water quantity [Volume _{weighted}]	Applicable in the context of national resource reporting: Characterization, e.g. via the characterization model developed in the present research project or other characterization models such as AWARE or WAVE+.
Water scarcity	Volumetric water footprint	<u>Auxiliary indicator</u> Inventory with low informative value; Applicable;	Water quantity [volume]	Applicable in the context of national resource reporting: Development of environmental extensions for input-output analysis via global hydrological models (e.g. WaterGAP or LPJmL) or sector-specific databases such as FAOSTAT. However, industrial water consumption is still difficult to account for.
Water pollution	Water pollution in different impact categories	<u>Key indicator(s)</u> Science-based impact indicator(s) of high significance; Applicable;	Water pollution index • Eutrophication [kg PO4 eq.] • Ecotoxicity (aquatic and terrestrial) [kg 1,4-dichlorobenzene eq.] • Acidification [kg SO2 eq.]	Not applicable in the context of national resource reporting: The availability of global data sets on regional emissions of water-polluting substances is not given.
Water pollution	Grey water footprint	<u>Auxiliary indicator</u> Weighting based on threshold values; Low informative value; Limited applicability	Water quantity [Volume]	Limited applicability in the context of national resource reporting: Global data sets exist, but only for selected (limited) pollutants (e.g. phosphorus or nitrogen).

⁹ Water Scarcity Footprint

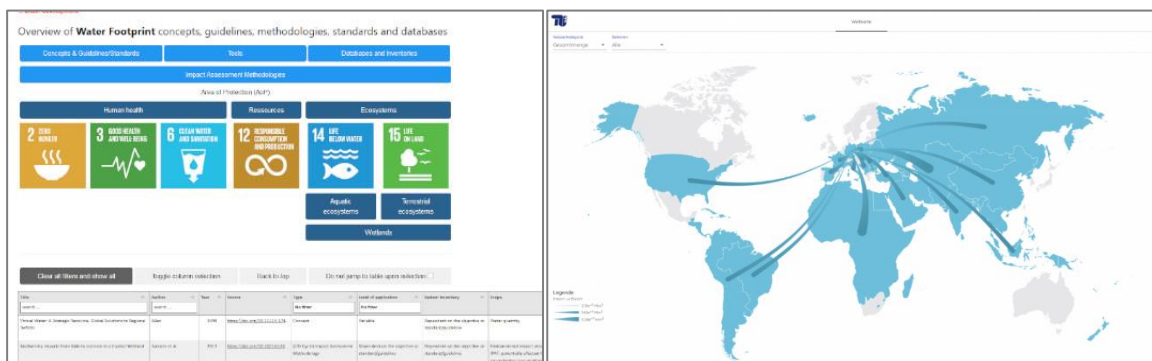
Tools

Two tools were developed within the framework of this research project. Both tools and further information including additional materials are freely available via the following web address:

<https://wf-tools.see.tu-berlin.de/der-wasserfussabdruck-von-deutschland/>

Water Footprint Toolbox: An interactive tabular overview that allows users to navigate through a variety of water footprint resources based on a set of criteria. The Water Footprint Toolbox includes concepts, guidelines, standards, tools, databases and life cycle inventories, as well as impact assessment methods related to water footprinting. While concepts, guidelines and standards provide a general framework for conducting a water footprint study, databases can form the basis for a water footprint life cycle inventory. Impact assessment methods are used in the subsequent impact assessment phase of the water footprint study. The impact assessment methods are classified according to the areas of protection *human health*, *resources* and *ecosystems* (aquatic ecosystems, terrestrial ecosystems and wetlands). Furthermore, the impact assessment methods are classified according to their relevance with regard to the Sustainable Development Goals.

Virtual Water Tool: Visualisation of Germany's virtual water imports based on the Exiobase database v3.8.1. The tool allows for a differentiated visualisation of blue, grey and green water flows as well as all sectors given in the Exiobase database. If "Alle" is selected as a sector, a click on one of the regions activates a listing of the sectors with the highest contributions to the total virtual water export of the selected region. In addition, the most important water flows are shown in a donut chart.



Other recommended tools on the subject of water footprint are e.g.

- The WWF Water Risk Filter: <https://waterriskfilter.panda.org/>
- The WELLE Tool for assessing the water footprint of companies/organisations: <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/wf-tools/owf/#/calculation>
- The visualisation of the water footprint of German and European agricultural imports: <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/>

Limitations and methodological findings

In this research project, input-output analysis was used to approximate Germany's water footprint inventory and water footprint impact with regard to the exceedance of local safe operating spaces of watersheds worldwide. The approximated results are not based on empirical data and thus do not represent a precise assessment of Germany's actual water

footprint. The results are limited by methodological (e.g. proportionality assumption; see section 3.2.5.1) and data-related restrictions (e.g. satellite accounts and sectoral and regional resolution; see section 6 and section 3.2.5). Consequently, the presented results should be regarded with caution.

According to the Exiobase's v3.8.1 native satellite accounts for water, a few sectors account for a significant share of total global water consumption. 50 out of a total of 9,800 sectors with the highest values for sectoral blue water consumption alone account for 87% of total global blue water consumption, according to the Exiobase database. Thus, a few sectors dominate the given analysis of Germany's consumption-induced water footprint (section 3.2.2).

Another limitation is that a large proportion of the most relevant contributions to Germany's blue water consumption in terms of environmental impact originate from world regions that are only available in aggregated form in the Exiobase database, e.g. the *Middle East, Asia and the Pacific* or *Africa*. This circumstance is also due to the partially low data quality of the trade statistics of some non-OECD countries.

Furthermore, it must be taken into account that water consumption in the Exiobase database is represented by monetary values. However, the amount of consumption associated with monetary values can vary. For example, 1 kg of wheat can be purchased for almost any value, e.g. 1€ or 2€. In the input-output calculation, €2 consumption would have twice the environmental impact of €1 consumption.

Recommendations

In the following, core recommendations that emerged from the research project are listed. On the one hand, these recommendations include practical recommendations for reducing the consumption-induced water footprint and recommendations regarding national resource reporting and methodological limitations on the other.

- ▶ A reduction of the water footprint should primarily be aimed at sectors with a high leverage effect. In other words, sectors that produce particularly water-intensive consumer goods, including the supply chain. In addition, however, the water footprint should also be considered in relation to the overuse of local water resources. Corresponding reduction measures should prioritise regions where local carrying capacity limits have already been exceeded or where carrying capacity limits have almost been reached.
- ▶ The vast majority of both the water footprint inventory and the water footprint impacts are caused by agricultural sectors. Stakeholders in this sector, especially in regions of the world where local water resources are overexploited, should therefore be empowered to manage water efficiently. One programme to initiate such measures could be *Water Stewardship*¹⁰. It is recommended that discussions about mitigating water stress must always aim at improving local conditions on the ground, and in no case mean the termination of e.g. livelihoods.
- ▶ For national resource reporting, it is recommended to record impact-oriented indicators in relation to water consumption based on the ISO standard 14046 on water footprinting. This would include the scarcity-weighted water footprint on the one hand and the water footprint in relation to water pollution on the other.

¹⁰ <https://a4ws.org/about/>

- ▶ Several options are available for operationalising the water footprint within the framework of a national water strategy, e.g. direct target value derivation (reduction by X% over a period of time Y), derivation analogous to ProgRes (increase in raw material or water productivity) or target value derivation with a focus on water-scarce regions.
- ▶ However, assessing or quantifying Germany's national water footprint within the framework of national resource reporting is only possible to a limited extent. With regard to water pollution, for example, there are still no comprehensive environmental extensions for existing input-output databases available. The continuation and further development of input-output databases is dependent on funding of respective research. Hence, funding of the development of corresponding data sets is recommended. Further developments should prioritise the regional and sectoral disaggregation of agricultural sectors in input-output databases.
- ▶ With regard to a robust long-term assessment of Germany's water footprint in the context of national resource reporting, consistency and long-term availability of databases is one of the most important requirements. Input-output databases are continuously developed further and should remain downward compatible e.g. new database versions should feature past years. As of now, this is the only option to analyse long-term trends in the resource consumption of individual countries despite changes in the databases due to further development.
- ▶ When choosing the data source of a national water footprint assessment, the strategic objective of the study should be considered carefully. The data does not necessarily need to include the latest scientific findings. There are cases in which reliability and certainty that the data/results are "directionally safe" (*richtungssicher*) are more important.
- ▶ With regard to education and communication on water footprinting, the importance of *impact-oriented* metrics, i.e. a scarcity-weighted water footprint and water pollution, must be prioritised. This measure is necessary because the often-prevailing volumetric water consumption values only have a low informative value with regard to the actual impact on ecosystems, humans and resources.

1 Einleitung und Zielstellung

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse aus dem durch das Umweltbundesamt geförderte Forschungsvorhaben „Konzeptionelle Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks zur Abbildung möglicher qualitativer und quantitativer Wasserbelastungen entlang eines Produktlebenszyklus“ dar¹¹. Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens war es, den konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland zu bilanzieren und unter Berücksichtigung der Wasserverfügbarkeit in den Herkunftsregionen zu bewerten.

► Bilanzierung und Analyse

- Bilanzierung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland einschließlich Bestimmung der Herkunft des verbrauchten Wassers.
- Analyse der Hotspots des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland.

► Bewertung

- Recherche und informative Aufbereitung von bestehenden Methoden zur Bewertung der Wassernutzung.
- Entwicklung einer Methode zur Bewertung des quantitativen Wasserverbrauchs in Deutschland sowie im Ausland unter Berücksichtigung lokaler Belastbarkeitsgrenzen in der Herkunftsregion (angelehnt an das Konzept der planetaren Grenzen). Bestimmung von entsprechenden Charakterisierungsfaktoren auf verschiedenen räumlichen Ebenen (Einzugsgebiete, Regionen und Länder).
- Bewertung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland anhand der neu entwickelten Bewertungsmethode.

1.1 Aufbau

Abschnitt 2 (S.35) bietet einen Überblick über Wasserfußabdruck-Konzepte (Abschnitt 2.1, S.35) und eine Einführung in das Konzept der Planetaren Belastbarkeitsgrenzen mit dem Schwerpunkt der Planetaren Belastbarkeitsgrenze *Wasser* (Abschnitt 2.2, S.40). Abschnitt 3 (S.47) beschreibt in zwei Unterkapiteln die Vorgehensweise zu der Bewertungsmethode (Abschnitt 3.1, S.49) und der Analyse des konsuminduzierten Wasserverbrauch Deutschlands (Abschnitt 3.2, S.57). Abschnitt 4 (S.68) stellt die Ergebnisse dar und ist unterteilt in Unterabschnitte zu den Charakterisierungsfaktoren (Bewertungsmethode; Abschnitt 4.1, S.68) und dem konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland (Abschnitt 4.2, S.78). Es folgt ein Vorschlag für Indikatoren zur Erfassung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland (Abschnitt 5, S.119) und schlussendlich eine Diskussion einschließlich Fazit (Abschnitt 6, S.125).

¹¹ Forschungskennzeichen: 3719 31 201 0; Aktenzeichen: 25100/23;

2 Hintergrund

Ziel dieses Abschnitts ist es, bestehende Konzepte, Methoden, Tools und Datenbanken zum Wasserfußabdruck zusammenzufassen und anhand verschiedener Kriterien einzuordnen. Als zentrales Arbeitsergebnis wurde ein deutschsprachiges Microsoft Excel-Tool und ein englischsprachiges Webtool entwickelt. Beide Tools bieten eine interaktive Übersicht über die erarbeiteten Inhalte. Für mehr Informationen zur *Wasserfußabdruck Toolbox* siehe Abschnitt 2.1.1.

2.1 Kurzüberblick Wasserfußabdruck

Ausgehend vom Konzept des „virtuellen Wassers“ (Allan, 1998, 1996) und dem „Wasserfußabdruck“ (Hoekstra et al. 2012), hat sich in den letzten Jahren eine Vielzahl von Methoden und Konzepten zur Analyse des Wasserverbrauchs von Produkten und Dienstleistungen, Unternehmen oder auch Volkswirtschaften entwickelt, die oft unter dem Sammelbegriff *Wasserfußabdruck* zusammengefasst werden. Hierbei handelt es sich einerseits um Tools zur Bestimmung von Wasserrisiken für Unternehmen an ihren Produktionsstandorten. Andererseits handelt es sich um Ökobilanz-basierte Ansätze, um die aus der Wassernutzung resultierenden lokalen Auswirkungen zu bewerten.

Im vorliegenden Bericht wird der Begriff Wasserfußabdruck übergeordnet für Konzepte verwendet, deren Ziel es ist, elementare wasserbezogene Stoffströme¹² zu bilanzieren oder diese zu bilanzieren und die Wirkung abzuschätzen.

Zu den bekanntesten Wasserfußabdruck-Konzepten zählt der Wasserfußabdruck des *Water Footprint Networks* (WFN; Hoekstra et al. 2012) und der Wasserfußabdruck gemäß der *Internationalen Organisation für Normung* (ISO) DIN EN ISO 14046 (ISO, 2014). Der Wasserfußabdruck wird jeweils wie folgt definiert:

- **WFN (Hoekstra et al. 2012):** „Der Wasserfußabdruck eines Produkts ist das Süßwasservolumen, welches für die Produktion eines Produkts, gemessen über die gesamte Wertschöpfungskette, gebraucht wird¹³“. Analog dazu errechnet sich ein nationaler Wasserfußabdruck wie folgt: „Eine vollständige nationale Wasserfußabdruck-Rechnung erhält man durch die Kombination der Berechnung des Wasserfußabdrucks des nationalen Verbrauchs und der Berechnung des Wasserfußabdrucks innerhalb des Landes¹⁴“.
- **DIN EN ISO 14046 (ISO, 2014):** „Kennzahl(en) zur quantitativen Bestimmung der potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser“ (ISO, 2014).

Während das WFN-Handbuch als weitestgehend eigenständiger Leitfaden zu sehen ist, definiert die ISO 14046 „Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien im Zusammenhang mit der Ermittlung des Wasserfußabdrucks [...] auf der Grundlage einer Ökobilanz“. Hintergrund dieser Entwicklung ist die begrenzte Aussagekraft von rein volumetrischen Methoden, da der Verbrauch von z.B. 1 m³ Regenwasser in Deutschland andere Konsequenzen für die lokalen

¹² „[Wasser welches] dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde, oder [...] [Wasser welches] das untersuchte System verlässt und ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird“ (ISO, 2014)

¹³ „The water footprint of a product is the volume of freshwater used to produce the product, measured over the full supply chain.“

¹⁴ „Full national water footprint accounts are obtained by combining the accounts on the water footprint of national consumption' and the accounts on the 'water footprint within a nation' [...].“

Ökosysteme und die lokale Bevölkerung hat, als der Verbrauch von z.B. 1 m³ Grundwasser in wasserarmen Regionen (Ridoutt and Huang, 2012).

Wasserfußabdruck – Wissenschaftliche Fortentwicklung

Der 2014 veröffentlichte ISO-Standard mit der Nummer 14046 entspricht dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand zur Erfassung eines Wasserfußabdrucks. Demnach ist ein Wasserfußabdruck definiert als „**Kennzahl(en) zur quantitativen Bestimmung der potenziellen Umweltwirkungen in Zusammenhang mit Wasser**“. Damit hebt sich der ISO-Standard inhaltlich von früheren Initiativen wie bspw. Hoekstra et al. (2012) ab, die eine Erfassung rein volumetrischer Kennzahlen vorsehen.

Der im ISO-Standard 14046 beschriebene Ansatz zur Erfassung eines Wasserfußabdrucks ist aussagekräftiger als rein volumetrische Kennzahlen, da bspw. durch die gleiche Menge Wasserverbrauch oder Wasserverschmutzung je nach Region unterschiedliche Wirkungen in Bezug auf Ressourcenverfügbarkeit, Ökosysteme oder Menschen auftreten können.

In der Regel setzt die ISO-konforme Ermittlung eines Wasserfußabdrucks neben der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie der Auswertung der Ergebnisse zwei wesentliche Arbeitsschritte voraus:

- ▶ **Wasserfußabdruck-Sachbilanz:** „Phase der *Ermittlung des Wasserfußabdrucks* [...], der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Input und Outputs im Zusammenhang mit Wasser [...] zusammenfasst.“ (Quelle: ISO 14046)
- ▶ **Wirkungsabschätzung für den Wasserfußabdruck:** „Phase der *Ermittlung des Wasserfußabdrucks* [...], im Anschluss an die *Wasserfußabdruck-Sachbilanz* [...], die dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser, verursacht durch ein Produkt, einen Prozess oder eine Organisation, dient.“ (Quelle: ISO 14046)

Grundsätzlich gilt außerdem, dass ein vollumfänglicher Wasserfußabdruck mehrdimensional ist. Das bedeutet, dass neben der Menge Wasserverbrauch auch Wasserverschmutzung berücksichtigt werden sollte. Zur vollständigen Erfassung von Wasserverschmutzung wird ein Wasserqualitätsindex bestehend aus den Wirkungskategorien Gewässereutrophierung, Ökotoxizität (aquatisch und terrestrisch) und Gewässerversauerung vorgeschlagen.

Wenn ein Wasserfußabdruck nicht vollumfänglich ermittelt wurde, sollten die Ergebnisse mit einer näheren Bestimmung quantifiziert werden z.B. „Fußabdruck bei Wasserknappheit“, Fußabdruck bei Gewässereutrophierung“, „nicht umfassender Wasserfußabdruck“.

Siehe auch Abschnitt 5 des vorliegenden Berichts und ISO (14046:2014).

Neben diesen beiden bekannten Wasserfußabdruck-Konzepten gibt es aber auch eine Vielzahl von Methoden der Wirkungsabschätzung, die in der Regel ISO 14046-konform sind, sowie eigenständige Methoden, Konzepte und Tools wie bspw. der organisationsbezogene Wasserfußabdruck (Forin et al., 2019). Letzterer bildet auf Grundlage der organisationsbezogenen Ökobilanz und des ISO-Standards zum Wasserfußabdruck einen standardisierten Rahmen für die Erhebung des gesamten Wasserfußabdrucks einer/s Organisation/Unternehmens unter Berücksichtigung aller Wertschöpfungskettenschritte.

So genannte Wirkungsabschätzungsmodelle bilden ökologische oder sozioökonomische Ursache-Wirkungsketten ab. Sie dienen also der auf die Sachbilanz folgenden Phase der Wirkungsabschätzung und können vereinfacht in vier Kategorien eingeteilt werden:

- ▶ Auswirkungen von Wasserverbrauch generisch und basierend auf der lokalen Wasserknappheit: Berger and Finkbeiner (2010)
- ▶ Auswirkungen von Wasserverbrauch auf terrestrische Ökosysteme (Pfister et al., 2009), aquatische Ökosysteme (Hanafiah et al., 2011), Küstenökosysteme (Amores et al., 2013) oder Feuchtgebiete (Verones et al., 2013a, 2013b)
- ▶ Übernutzung lokaler Süßwasserressourcen: (Berger et al., 2018; Boulay et al., 2018; Canals et al., 2009; Pfister et al., 2009; Pradinaud et al., 2019)
- ▶ Auswirkungen von Wasserverbrauch auf die menschliche Gesundheit, z.B. infolge von Unterernährung (Boulay et al., 2011; Motoshita et al., 2018; Pfister et al., 2009) oder der Verbreitung von Infektionskrankheiten (Boulay et al., 2011).

Neben Tools und Wirkungsabschätzungsmodellen wurden in den letzten Jahren auch mehrere Datenbanken zur Bestimmung des Wasserfußabdrucks entwickelt. Hierzu zählen Datenbanken auf der Ebene von Materialien und Prozessen (Kupfer et al., 2018; Vionnet et al., 2012; Wernet et al., 2016), Datenbanken für landwirtschaftliche Erzeugnisse (FAO, o.D.; Mekonnen and Hoekstra, 2011; Pfister and Bayer, 2014), als auch Datenbanken für Sektoren und Länder (Aguiar et al., 2016; Lenzen et al., 2012; Stadler et al., 2018; Timmer, 2012) oder (WaterStat, 2021). Prinzipiell kann in Bezug auf Datenbanken vereinfacht zwischen prozess-basierten und Input-Output-Datenbanken unterschieden werden. Tendenziell eignen sich prozess-basierte Datenbanken wie bspw. *Ecoinvent*, *GaBi* oder die *Environmental Footprint database* besser für kleinmaßstäbige lokalspezifische Analysen wie bspw. die Berechnung der potenziellen Umweltwirkungen von Produkten, Dienstleistungen oder auch Unternehmen. Input-Output-Datenbanken wie bspw. WIOD, Exiobase oder Eora eignen sich tendenziell dazu, gegebene Externalitäten wie bspw. den Wasserverbrauch verschiedener Sektoren anhand von wirtschaftlichen Verflechtungen zwischen Sektoren verschiedenen Akteuren zuzuordnen. Input-Output-Datenbanken beruhen in der Regel auf sektoralen oder nationalen Handelsdaten. Daher eignen sie sich auch am besten für makroökonomische Analysen.

Außerdem gibt es eine Reihe von Tools, welche, wenn teilweise auch im entfernten Sinne, Anwendern die Erhebung eines Wasserfußabdrucks. Die Tools betrachten also nicht allein isoliert den Wasserverbrauch, sondern nehmen Bezug auf die lokalen Auswirkungen des Wasserverbrauchs auf Menschen oder Ökosysteme. Dazu gehören bspw. das Local Water Tool¹⁵, das OWF-Tool¹⁶, der Water Impact Index¹⁷, das WF Assessment Tool¹⁸, Aqueduct Tools¹⁹ oder auch der Water Risk Filter²⁰.

Eine Auflistung von Methoden zu wasserfußabdruckbezogener Wirkungsabschätzung bietet die Wasserfußabdruck-Toolbox (siehe nächster Abschnitt).

¹⁵ <http://gemi.org/localwatertool/> (besucht am 14.05.2020)

¹⁶ <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/wf-tools/owf/> (besucht am 14.05.2020)

¹⁷ <https://veolia.com/en/water-impact-index-wiix> (besucht am 14.05.2020)}

¹⁸ <https://waterfootprintassessmenttool.org/assessment/> (besucht am 14.05.2020)}

¹⁹ <https://wri.org/aqueduct> (besucht am 14.05.2020)

²⁰ <https://waterriskfilter.panda.org> (besucht am 14.05.2020)

2.1.1 Wasserfußabdruck-Toolbox

Die Wasserfußabdruck-Toolbox umfasst Konzepte, Richtlinien, Standards, Tools, Datenbanken und Sachbilanzen sowie Methoden zur Wirkungsabschätzung. Die Einträge fokussieren also auf verschiedene Ebenen einer Wasserfußabdruckstudie. Während Konzepte, Richtlinien und Standards einen generellen Rahmen zur Durchführung einer Wasserfußabdruckstudie dienen, können Datenbanken die Grundlage für eine Wasserfußabdruck-Sachbilanz bilden.

Wirkungsabschätzungsmethoden dienen der Wasserfußabdruck-Sachbilanz nachfolgenden Phase der Wirkungsabschätzung. Die Wirkungsabschätzungsmethoden sind entsprechend der Schutzgüter menschliche Gesundheit, Ressourcen und Ökosysteme (aquatische Ökosysteme, terrestrische Ökosysteme und Feuchtgebiete) eingeordnet. Weiterhin werden die Methoden zur Wirkungsabschätzung entsprechend der Relevanz für Ziele für Nachhaltige Entwicklung (Agenda 2030 der UN) ausgewiesen: Kein Hunger (SDG2), Gesundheit und Wohlergehen (SDG3), sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen (SDG6), nachhaltiger Konsum und Produktion (SDG12), Leben unter Wasser (SDG14) und Leben and Land (SDG15).

Die angewendeten Untersuchungskriterien sind: Typ, Anwendungsebene, Systemgrenze, Betrachtungsgegenstand, Gewässer-/Wassertyp, "Wasserfarbe" (blaues/ grünes/ graues Wasser), Nutzungsort, Wassernutzung, Wirkungsebene in der Ursache-Wirkungskette, Schutzziel(e), räumliche(r) Auflösung/Bezug, zeitliche Auflösung, Dokumentation, Qualitätssicherung und Verfügbarkeit. Einige Einträge sind mit zusätzlichen Anmerkungen versehen.

Abbildung 1: Wasserfußabdruck Toolbox

Die *Wasserfußabdruck-Toolbox* (einschließlich der Excel-basierten Version) ist unter folgender Webadresse frei zugänglich: <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/wf-tools/waterfootprint-toolbox> (abgerufen am 26.05.2020).


Water footprint tools About Imprint

Water Footprint Toolbox

[Overview & Standards](#)
[Tools](#)
[Database and Inventory](#)

Water Assessment Methodology

Area of Protection (AoP)

Human health













Food, fibre and other use Categories









Methods, assumptions, standards

Title	Author	Year	Source	Type	Level of application	System boundary	Scope	Water body	Water color	Location
Search	Search			No filter	No filter	No filter	No filter	No filter	No filter	No filter
Virtual Water: A Strategic Resource, Market Solutions for Regional Deficits	Allen	1986	https://doi.org/10.1016/0304-3789(86)90011-1	Concept	Variable	Dependent on the objective or standard (spatial)	Water quantity	Production (green)	Blue water, green water, grey water	Off-site
Sustainability impacts from deforestation in a coastal wetland	Amores et al.	2012	https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.03.002	3/A Global Impact Assessment Methodology	Dependent on the objective or standard (spatial)	Dependent on the objective or standard (spatial)	Environmental impact associated with deforestation (PM, potential affected fraction of species) as a result of groundwater consumption	Groundwater	Blue water	Off-site
Operational characterization method and factors for a new midpoint impact category: Freshwater Depletion for Human Use	Bayart et al.	2009	Not available	3/A Global Impact Assessment Methodology	Dependent on the objective or standard (spatial)	Dependent on the objective or standard (spatial)	Water depletion for human use	Production (blue water only)	Blue water	Off-site
The Water Impact Index: A simplified single indicator approach for multi-impacts	Bayart et al.	2014	https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.03.002	3/A Global Impact Assessment Methodology	Dependent on the objective or standard (spatial)	Dependent on the objective or standard (spatial)	Water depletion (reduction of available water) for the assessment of water scarcity and absolute shortage of water	Production (green)	Blue water	On-site
Ordering the Water Accounting and Vulnerability Evaluation: Water TOUC	Bergier et al.	2010	https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.03.002	3/A Global Impact Assessment Methodology	Dependent on the objective or standard (spatial)	Dependent on the objective or standard (spatial)	Water depletion (reduction of available water) for the assessment of water scarcity and absolute shortage of water	Production (green)	Blue water	Off-site
Analysis of environmental impacts (3A) evaluation for the assessment of water scarcity	Bergier et al.	2011	https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.03.002	3/A Global Impact Assessment Methodology	Dependent on the objective or standard (spatial)	Dependent on the objective or standard (spatial)	Water scarcity (reduction of available water) for the assessment of water scarcity and absolute shortage of water	Production (green)	Blue water, green water	On-site
Assessment of environmental impacts (3A) evaluation for the assessment of water scarcity	Bergier et al.	2011	https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.03.002	3/A Global Impact Assessment Methodology	Dependent on the objective or standard (spatial)	Dependent on the objective or standard (spatial)	Water scarcity (reduction of available water) for the assessment of water scarcity and absolute shortage of water	Production (green)	Blue water	On-site
The 3A Global Impact Assessment Methodology for the assessment of water scarcity	Bergier et al.	2011	https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.03.002	3/A Global Impact Assessment Methodology	Dependent on the objective or standard (spatial)	Dependent on the objective or standard (spatial)	Water scarcity (reduction of available water) for the assessment of water scarcity and absolute shortage of water	Production (green)	Blue water	On-site

An offline Excel-based version of the Water Footprint Toolbox is available [here](#) (German only).

About

The Chair of Sustainable Engineering (SEE) develops scientific sustainability assessment approaches for products and technologies. While environmental protection and sustainable development are accepted principles for political decision making and corporate strategies, organizations face challenges when dealing with the practical and substantial implementation of the sustainability concept. How can the environmental and sustainability performance be measured in a scientifically robust way, especially with regard to products and manufacturing processes? The SEE group tackles such questions by developing and applying methods and tools with a system perspective on environmental impacts and sustainability performance.

Contact

E-Mail: johannes.buermann@tu-berlin.de

Imprint

Technische Universität Berlin
 Fachgebiet Sustainable Engineering
 Prof. Dr. Matthias Finkbeiner
 Straße des 17. Juni 135
 D-10623 Berlin
 Phone: +49 (0)30 314 24341
 E-Mail: matthias.finkbeiner@tu-berlin.de
 Web: www.soe.tu-berlin.de

Supported by the German Environment Agency (Umwelt Bundesamt)

Umwelt Bundesamt

Copyright © The Chair of Sustainable Engineering at TU Berlin. All rights reserved. Built with Tabulator and W3.CSS.

This site uses Matomo for anonymous web analysis. For more information and opt-out options refer to our [Data Privacy Statement](#).

Siehe auch Zusatzmaterial *Methodenübersicht/Methodenübersicht_20191212.xlsm*

Quelle: <https://wf-tools.see.tu-berlin.de>

2.2 Kurzüberblick Planetare Belastbarkeitsgrenzen

Wenn große Mengen Wasserverbrauch bilanziert werden, bspw. der Wasserverbrauch eines ganzen Landes, liegt es nahe, nicht nur die Frage nach der verbrauchten Wassermenge zu beantworten, sondern die Menge an verbrauchtem Wasser auch mit der verfügbaren Menge an Wasser in ein Verhältnis zu setzen. Ein bekanntes wissenschaftliches Konzept zur Beurteilung der Verhältnismäßigkeit von großmaßstäbiger Umweltbeanspruchung ist das Konzept der Planetaren Belastbarkeitsgrenzen (Rockström et al., 2009b, 2009a). Das Konzept der Planetaren Belastbarkeitsgrenzen fand Einzug in den wissenschaftlichen und politischen Diskurs, nachdem es 2009 von einer Autorengruppe unter Erstautorenschaft von Johan Rockström vorgeschlagen wurde. Es erinnert an existierende Ansätze wie bspw. *Grenzen des Wachstums* (Meadows et al., 2004, 1972), Tragfähigkeit und kritische Lasten (Hui, 2006), tolerierbare Fenster (Petschel-Held et al., 1999) oder auch den *Leitplankenansatz* (Kleinen et al., 2004).

Als Anlass für das Konzept der Planetaren Belastbarkeitsgrenzen sahen Rockström et al. (2009a, 2009b) den in Fachzeitschriften postulierten Übergang vom Erdzeitalter Holozän in das Erdzeitalter Anthropozän. Also vom Nacheiszeitalter, in dem sich die gegenwärtigen Gesellschaften entwickelten, hin zu einem neuen Erdzeitalter, in dem Menschen der dominierende Faktor für Veränderungen des Erdsystems sind (Crutzen, 2002; Rockström et al., 2009b; Steffen et al., 2007). Rockström et al. (2009b) entwickelten daher ein Konzept zur Beantwortung der Frage: *Was sind die nicht verhandelbaren planetarischen Voraussetzungen, die die Menschheit respektieren muss, um das Risiko schädlicher oder sogar katastrophaler Umweltveränderungen auf kontinentaler bis globaler Ebene zu vermeiden?*²¹

Die von Rockström et al. (2009a, 2009b) vorgeschlagenen und von Steffen et al. (2015) fortentwickelten Planetaren Belastbarkeitsgrenzen (Abbildung 2), umfassen Klimawandel, Versauerung der Meere, Ozonverlust in der Stratosphäre, Aerosolgehalt in der Atmosphäre, Biogeochemische Flüsse (Phosphor und Stickstoff), Süßwasserverbrauch, Landnutzungswandel, Intaktheit der Biosphäre (funktionelle und genetische Vielfalt) und Chemische Verschmutzung (neue Substanzen und modifizierte Lebensformen). Rockström et al. (2009a, 2009b) argumentieren, dass es durch Überlastung einer oder mehrerer Planetarer Belastungsgrenzen zu kritischen, auf einem für die Menschheit gesehen relevanten Zeitraum, zu irreversiblen Umweltveränderungen kommen kann. Diese Umweltveränderungen könnten das Wohlergehen der Menschheit auf der Erde beeinträchtigen oder sogar unmöglich machen.

Zur Operationalisierung des Konzepts der Planetaren Belastbarkeitsgrenzen definieren Rockström et al. (2009b) für jede Planetare Belastbarkeitsgrenze eine *Kontrollvariable* und einen *Schwellenwert* (Belastbarkeitsgrenze). Die Kontrollvariable beschreibt die Inanspruchnahme der Planetaren Belastbarkeitsgrenze durch den Menschen. Bspw. ist die Kontrollvariable für die Planetare Belastbarkeitsgrenze Klimawandel die atmosphärische Kohlenstoffdioxidkonzentration. Der Schwellenwert bzw. die Belastbarkeitsgrenze entspricht dem sicheren Handlungsspielraum, innerhalb dessen eine Beanspruchung der entsprechenden Planetaren Belastbarkeitsgrenze nachhaltig ist. Für die Planetare Belastbarkeitsgrenze Klimawandel bspw. 350 bis 550 ppm atmosphärische Kohlenstoffdioxid-Konzentration. Zusätzlich beschreiben *abhängige Variablen* die aufgrund von einer Veränderung der Kontrollvariable verursachten Umweltveränderungen, im Vergleich zum erhaltenswerten Holozän-Zustand. Für die Planetare Belastbarkeitsgrenze Klimawandel sind dies bspw. der Zustand der polaren Eiskappen, regionale Klimaausprägungen oder die Verfügbarkeit von glazialen Schmelzwasser zur Süßwasserversorgung. Rockström et al. (2009a, 2009b)

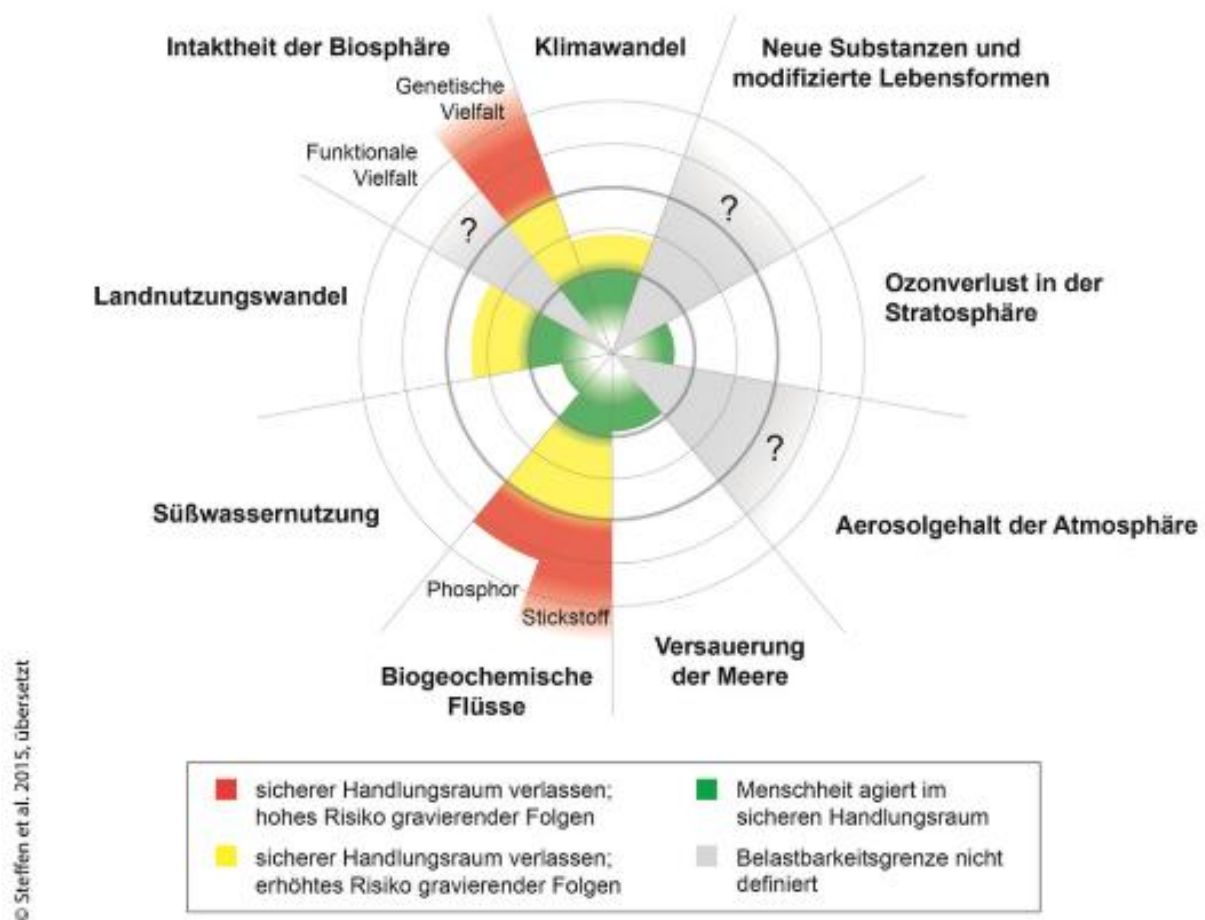
²¹ „What are the non-negotiable planetary preconditions that humanity needs to respect in order to avoid the risk of deleterious or even catastrophic environmental change at continental to global scales?”

unterscheiden zwischen Planetaren Belastbarkeitsgrenzen mit globalem Wirkungsbereich (bspw. Klimawandel oder Versauerung der Meere) und Planetaren Belastbarkeitsgrenzen mit regionalem bis überregionalen Wirkungsbereich (bspw. chemische Verschmutzung, Biodiversitätsverlust, Landnutzungswandel und Süßwassernutzung).

Gemäß der Fortentwicklung der Planetaren Belastbarkeitsgrenzen von Steffen et al. (2015), übersteigt die anthropogene Beanspruchung von vier der neun Planetaren Belastbarkeitsgrenzen deren sicheren Handlungsspielraum²². Ein hierdurch bedingtes hohes Risiko von gravierenden Umweltfolgen ergibt sich für die Planetaren Belastbarkeitsgrenzen Intaktheit der Biosphäre (genetische Vielfalt), Klimawandel, Biogeochemische Flüsse (Phosphor und Stickstoff) und Landnutzungswandel. Je nachdem wie stark eine Planetare Belastbarkeitsgrenze überlastet ist, desto dringender ist gemäß Rockström et al. (2009a, 2009b) der Handlungsbedarf, die ursächlichen Umweltbelastungen zu verringern.

Abbildung 2: Planetare Belastbarkeitsgrenzen gemäß Steffen et al. (2015)

Die gegenüber der ursprünglichen Planetaren Belastbarkeitsgrenzen von Rockström et al. (2009a, 2009b) fortentwickelten Planetaren Belastbarkeitsgrenzen (Steffen et al., 2015). Der innere Ring stellt den sicheren Handlungsspielraum dar. Die farblich hervorgehobenen Bereiche stellen den Ist-Zustand dar. Die Inanspruchnahme der Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser (Süßwassernutzung) befindet sich gemäß Steffen et al. (2015) im sicheren Handlungsspielraum.



Quelle: BMU (2021)

²² Berechnungsgrundlage ist das LPJmL-Modell für den Zeitraum 1981 bis 2000.

2.2.1 Kurzüberblick Planetare Belastbarkeitsgrenze Wasser

Menschen greifen durch Bewässerung, Energieerzeugung, Entwaldung und andere Aktivitäten massiv in ökohydrologische Prozesse wie bspw. Oberflächenabfluss, Evapotranspiration oder Habitatbereitstellung ein (Gordon et al., 2005; Meybeck, 2003). Diese anthropogenen Eingriffe in ökohydrologische Prozesse haben ein so hohes Ausmaß erreicht, dass Menschen in vielen Regionen der Haupteinflussfaktor für lokale, regionale und überregionale Veränderungen dieser ökohydrologischen Prozesse sind (Shiklomanov and Rodda, 2003). Gemäß Rockström et al. (2009a, 2009b) kann daher argumentiert werden, dass sich die Erde im Hinblick auf Wasser im Erdzeitalter des Anthropozän befindet (Falkenmark et al., 2019; Meybeck, 2003; Rockström et al., 2014) und sich daher die Frage nach einer planetaren Belastbarkeitsgrenze für nachhaltigen Wasserverbrauch stellt.

In Bezug auf die Planetare Belastbarkeitsgrenze Wasser ist als abhängige Variable, also als Umweltveränderung in Folge einer Veränderung des Wasserverbrauchs z.B. durch landwirtschaftliche Bewässerung, bspw. eine Abnahme des Abflusses in einem Flusssystem denkbar. Eine entsprechende Abflussveränderung kann für Menschen, die flussabwärts von Fischfang leben oder ebenso auch Bewässerungswasser angewiesen sind, ein Risiko für die Existenzgrundlage darstellen. Der Grund hierfür ist, dass diese Menschen ihr Leben an eine bestimmte Abflussmenge (Holozän-Zustand) und z.B. die damit verbundene aquatische Biodiversität angepasst haben. In einem limitierten Rahmen (sicherer Handlungsspielraum), haben Veränderungen der Abflussmenge keinen Einfluss auf das Leben der Menschen. Die Veränderungen im Rahmen des sicheren Handlungsspielraums sind entweder vernachlässigbar oder aber die betroffenen Menschen, können sich an die Veränderungen anpassen bspw. durch technische oder institutionelle Anpassungen. Ist die Veränderung der abhängigen Variable im Vergleich zum Holozän-Zustand aber sehr groß, kann dies die Kapazität der Menschen zur Anpassung aber auch überschreiten.

Rockström et al. (2009b) quantifizieren die globalen zugänglichen²³ Blauwasserressourcen²⁴ gemäß Fraiture et al. (2001) und Postel (1998) auf maximal 12.500 bis 15.000 Mrd. m³·Jahr⁻¹. Jedoch könne, so Rockström et al. (2009b), eine Inanspruchnahme dieser Blauwasserressourcen von ca. 4.000 Mrd. m³·Jahr⁻¹ (±4.000 bis 6.000 Mrd. m³·Jahr⁻¹) bereits zu einem regionalen bis kontinentalen Zusammenbruch terrestrischer und aquatischer Ökosystemen führen. Laut Oki und Kanae (2006) lag die globale anthropogene Wassernutzung bereits 2006 bei ca. 4.000 Mrd. m³·Jahr⁻¹. Der Wasserverbrauch²⁵ wurde hingegen global *nur* mit rund 2.600 Mrd. m³·Jahr⁻¹ angegeben und läge damit (noch) innerhalb des sicheren Handlungsspielraums womit die Planetare Grenze Wasser also nicht überschritten sei (Rockström et al., 2009b).

Seit seiner Veröffentlichung wurde das Konzept der Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser von Rockström et al. (2009a, 2009b) im Rahmen mehrerer wissenschaftlicher Veröffentlichungen weiterentwickelt (Gerten et al., 2013; Gleeson et al., 2020a, 2020b; Steffen et al., 2015). So wurde die vorgeschlagene Belastbarkeitsgrenze auf subglobale Bezugsgrößen wie

²³ Also der Anteil am Wasser, der durch Menschen auch genutzt oder verbraucht werden kann. Dazu zählt bspw. nicht gefrorenes Wasser in Permafrostböden.

²⁴ Unter *Blauwasser* wird oberflächiges- und unterirdisches Wasser verstanden. Also bspw. Wasser in Seen, Flüssen und Grundwasserleitern (Hoekstra et al., 2012).

²⁵ "[Wasser] das einem Einzugsgebiet entnommen, jedoch nicht in dasselbe Einzugsgebiet zurückgeführt wird. Der Wasserverbrauch kann durch Verdunstung, Transpiration, Einbindung in ein Produkt oder Abgabe in ein anderes Einzugsgebiet oder ins Meer bedingt sein. Die durch Landnutzungsänderung bedingte Änderung der Verdunstung wird als Wasserverbrauch angesehen (z. B. Bau eines Stausees)." (ISO 14046, 2014)

bspw. Länder oder Pro-Kopf-Bewilligungen skaliert (Cole et al., 2014; Fang et al., 2015; Hoff et al., 2014; Nykvist et al., 2013; Teah et al., 2016; Zipper et al., 2020), die Anwendbarkeit der Planetaren Belastbarkeitsgrenze im Rahmen von Ökobilanzstudien (Bjørn et al., 2020, n.d.; Doka, 2016; Ryberg et al., 2018b, 2018a; Sandin et al., 2015; Tuomisto et al., 2012; Uusitalo et al., 2019) und umwelterweiterten Input-Output-Analysen diskutiert oder angewendet (Fanning and O'Neill, 2016) oder durchaus kritisch kommentiert (Bogardi et al., 2013; Destouni et al., 2013; Gerten et al., 2015; Heistermann, 2017, 2017; Jaramillo and Destouni, 2015; Molden, 2009). Die wichtigsten wissenschaftlichen Arbeiten hierzu werden im Folgenden kurz zusammengefasst (siehe auch Abbildung 3).

Molden (2009) argumentiert, dass Wasser eine weitestgehend lokale Ressource sei und eine globale Bewertung von Wasserverbrauch daher nicht zielführend sei. Global gesehen möge die Verfügbarkeit von Blauwasser zwar höher sein als der Blauwasserverbrauch, letzterer variere jedoch in Raum (bspw. klimatisch bedingt aber auch beeinflusst durch sozioökonomische Faktoren wie Bevölkerung oder Wertschöpfung) und Zeit (Saisonalität). Von einer Einhaltung der Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser zu sprechen, sei daher irreführend. Die Sichtweise von Molden (2009) wird bspw. auch durch den Weltwasserentwicklungsbericht von UNESCO und UN-Water (2020) bekräftigt, nach dem bis zu vier Milliarden Menschen mindestens einen Monat pro Jahr von Wasserknappheit betroffen sind. Viele staatliche- und Nichtregierungsorganisationen empfehlen daher, Wasserverbrauch nicht global, sondern lokal bspw. auf Ebene von Einzugsgebieten zu bewerten (AWS, 2019; EC, 2000)

Gerten et al. (2013) greifen diese Problematik auf und berechnen unter Berücksichtigung umweltbedingter Wasserflussanforderungen räumlich ($0,5^\circ \cdot 0,5^\circ$) und zeitlich (monatlich) differenzierte Belastbarkeitsgrenzen in Bezug auf den Wasserverbrauch. Diese lokalen Belastbarkeitsgrenzen werden anschließend zu einer revidierten Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser von 1.100 bis 4.500 Mrd. $\text{m}^3 \cdot \text{Jahr}^{-1}$ aggregiert. Der Durchschnitt von 2.800 Mrd. $\text{m}^3 \cdot \text{Jahr}^{-1}$ liegt damit deutlich unter der von Rockström et al. (2009b) vorgeschlagenen Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser von 4.000 Mrd. $\text{m}^3 \cdot \text{Jahr}^{-1}$. Den globalen blauen Wasserverbrauch quantifizieren Gerten et al. (2013) auf 1.700 Mrd. $\text{m}^3 \cdot \text{Jahr}^{-1}$ und kommen damit zum Schluss, dass die planetare Grenze Wasser noch nicht überschritten sei.

Steffen et al. (2015) veröffentlichten eine Überarbeitung aller von Rockström et al. (2009a, 2009b) vorgeschlagenen Planetaren Belastbarkeitsgrenzen einschließlich der Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser. Die globale Planetare Belastbarkeitsgrenze Wasser von Rockström et al. (2009a, 2009b) wird beibehalten und durch räumlich (Einzugsgebiete) und zeitlich (Monate) aufgelöste lokale Belastbarkeitsgrenzen für Wasserverbrauch ergänzt. Auch Steffen et al. (2015) berücksichtigen umweltbedingte Wasserflussanforderungen. Zur Beurteilung des Status der Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser, ermitteln Steffen et al., (2015) die Anzahl der Monate pro Jahr, in denen in einer Region die lokalen Belastbarkeitsgrenzen für den Wasserverbrauch überschritten werden. Steffen et al. (2015) kommen zu dem Ergebnis, dass viele Regionen ganzjährig vom Risiko zu hohen Wasserverbrauchs betroffen sind und ebenfalls ein erheblicher Anteil weltweiter Regionen zumindest teilweise betroffen ist²⁶.

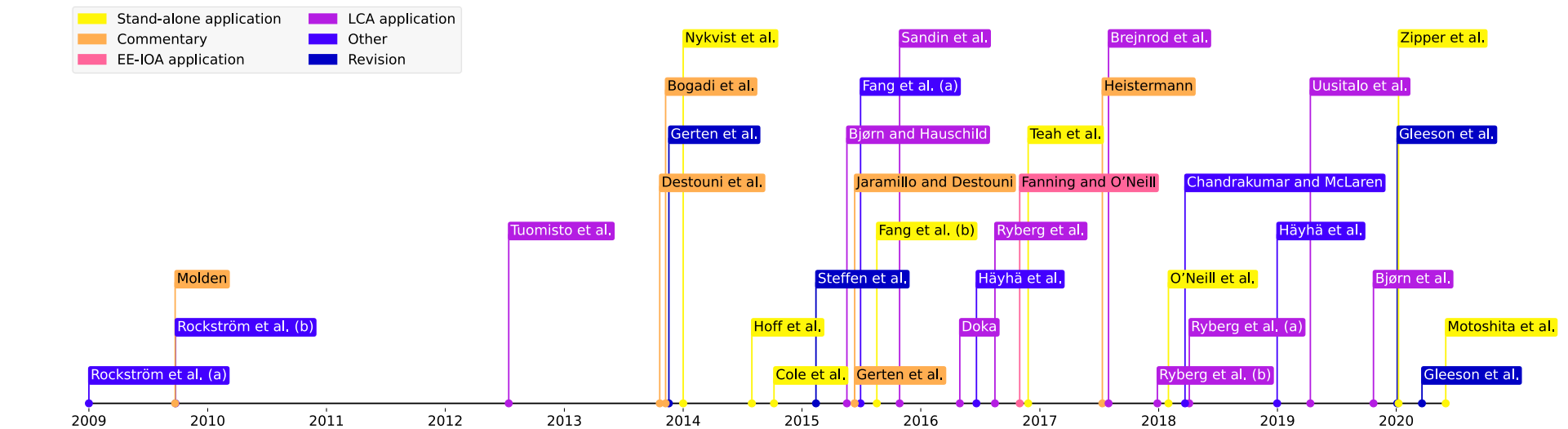
Destouni et al. (2013) erörtern, dass die durch menschliche Aktivitäten wie Landwirtschaft, Entwaldung und Wasserkraft induzierte Veränderung in Evapotranspiration 4.485 Mrd. $\text{m}^3 \cdot \text{Jahr}^{-1}$ betrage und damit die von Rockström et al. (2009a, 2009b) vorgeschlagene Planetare Belastbarkeitsgrenze Wasser übersteigt. Jaramillo und Destouni (2015) bemängeln, dass diese Erkenntnis von Steffen et al. (2015) nicht berücksichtigt wurde. Die Missachtung der

²⁶ Für Details siehe Steffen et al. (2015) *Supplementary Material* Abbildung 7 und 8.

Erkenntnisse von Destouni et al. (2013) durch Steffen et al., (2015) kann dadurch erklärt werden, dass Steffen et al., (2015) Blauwasserverbrauch als Kontrollvariable definieren. Destouni et al. (2013) aber berücksichtigen unter anderem auch Evapotranspiration was i.d.R. als Grünwasser verstanden wird. Aus dieser Diskussion wird deutlich, dass Blauwasserverbrauch alleine nur eine eingeschränkte Aussagekraft über anthropogene Eingriffe in lokale und globale hydrologische Prozesse ermöglicht.

Abbildung 3: Veröffentlichungen zur Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser

Kategorisierung und Veröffentlichungsdatum aller wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit Bezug zum Thema Planetare Belastbarkeitsgrenze Wasser (*EE-IOA* = *Umwelterweiterte Input-Output-Analyse*, *LCA* = *Ökobilanz*). Stand Anfang 2020.



Quelle: Bunsen et al. (2021)

Heistermann (2017) argumentiert, dass die biophysischen Auswirkungen von exzessivem Wasserverbrauch i.d.R. auf ein Einzugsgebiet beschränkt sind und nicht global aggregiert auch zu globalem Systemversagen führen können²⁷. Selbst Großereignisse wie bspw. das Schrumpfen des Aral Sees (Micklin 2007, 1988), hätten keinen Einfluss auf global hydrologische Prozesse gehabt. Die Hypothese von Rockström et al. (2009a, 2009b), dass kontinentale oder globale Belastbarkeitsgrenzen für Wasserverbrauch aufgrund aggregierter Umweltwirkungen durch Wasserverbrauch auf lokaler oder regionaler Ebene überschritten werden können, sei daher nicht bewiesen.

Um die Aussagekraft und Repräsentativität der Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser zu verbessern, schlagen Gleeson et al. (2020a, 2020b) vor, die Planetare Belastbarkeitsgrenze Wasser ausdifferenzieren. Die ausdifferenzierten Belastbarkeitsgrenzen orientieren sich an den hydrologischen Funktionen von Wasser (hydroklimatische Regulation, hydroökologische Regulation, Lagerung und Transport) und Wasserspeichern (Oberflächenwasser, atmosphärisches Wasser, Bodenfeuchtigkeit, Grundwasser und gefrorenes Wasser). Gleeson et al. (2020a, 2020b) machen für jede der ausdifferenzierten Belastbarkeitsgrenzen (qualitative) Vorschläge für mögliche Kontroll- und abhängige Variablen.

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass das Konzept der Planetaren Belastbarkeitsgrenzen von Rockström et al. (2009a, 2009b) potenziell richtungsweisend ist und zu politischen Entscheidungen beitragen kann. Für die Planetare Belastbarkeitsgrenze Wasser im Einzelnen, bestehen aber nach wie vor konzeptionelle Herausforderungen. Die Fortentwicklungen von Gerten et al. (2013) und Steffen et al. (2015) sowie Gleeson et al. (2020a, 2020b) ermöglichen eine räumlich bzw. funktionell differenzierte Betrachtung der Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser. Nach wie vor gibt es aber mangelnde Hinweise auf einen Zusammenhang der Überschreitung lokaler Belastbarkeitsgrenzen und globaler (*planetarer*) Veränderungen ökohydrologischer Prozesse. Da dieser Zusammenhang nicht zweifelsfrei festgestellt wurde, werden im vorliegenden Bericht lokale Belastbarkeitsgrenzen, mit einem jeweils spezifischen räumlichen Bezug (bspw. Einzugsgebiet, Land, Region), berechnet.

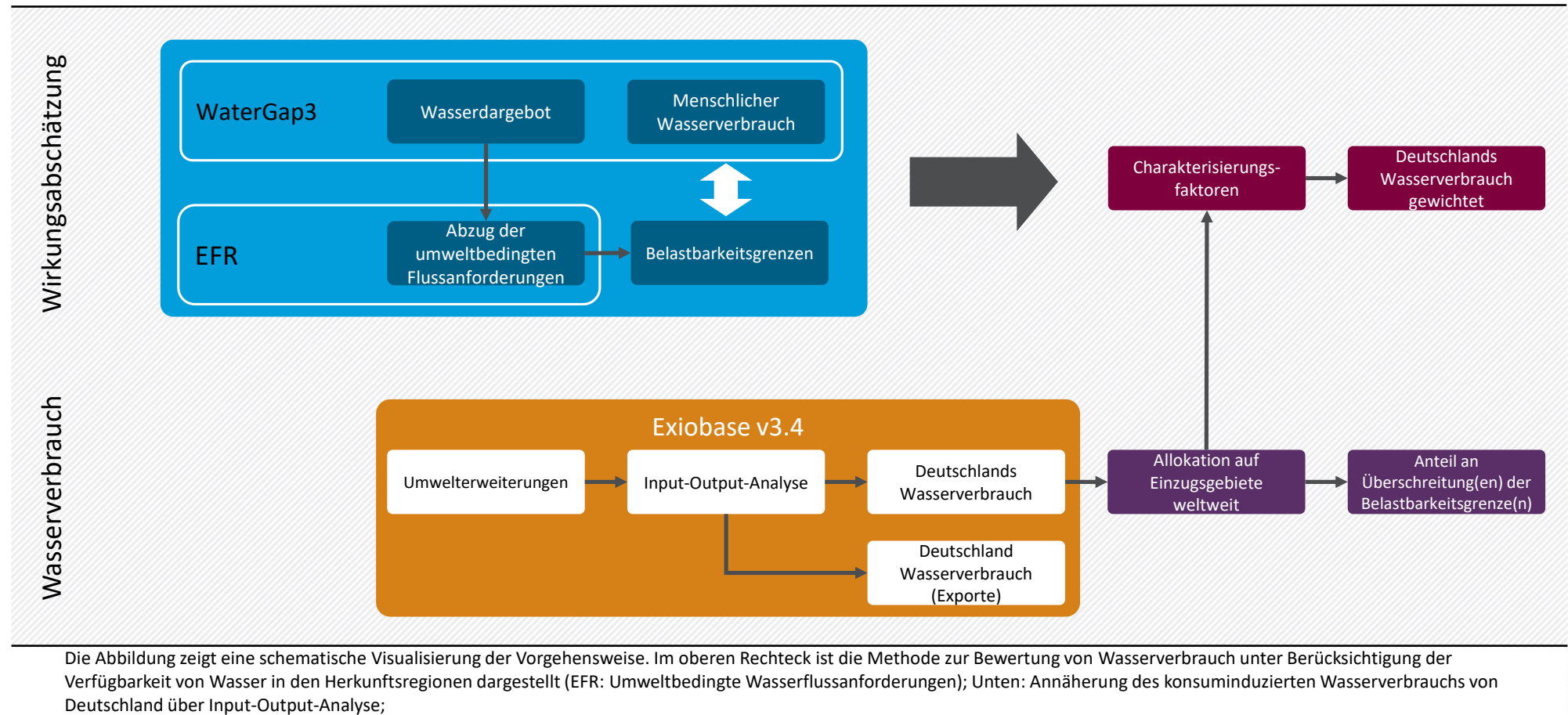
²⁷ Rockström et al. (2009a) merken an, dass für die Planetare Grenze Wasserverbrauch kein globaler Schwellenwert bekannt ist.

3 Vorgehensweise

Das Kapitel zur Vorgehensweise ist in zwei Unterkapitel gegliedert. Das erste Unterkapitel 3.1 erklärt die Bewertungsmethode und Berechnung der Charakterisierungsfaktoren. Die Charakterisierungsfaktoren repräsentieren in Anlehnung an das Konzept der Planetaren Grenzen die Überschreitung der lokalen Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten weltweit. Das zweite Unterkapitel 3.2 erklärt die EE-IO Analyse zur Bestimmung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland.

Der ermittelte blaue Wasserverbrauch Deutschlands wird schlussendlich auf 8.250 Flusseinzugsgebiete allokiert und dann mit den Charakterisierungsfaktoren der Bewertungsmethode multipliziert. Das Ergebnis ist ein nach dem Ausmaß der Überschreitung lokaler Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten weltweit gewichteter Wasserverbrauch. Eine Übersicht über das Vorgehen bietet auch die nachfolgende schematische Darstellung der Vorgehensweise (Abbildung 4).

Abbildung 4: Vorgehensweise



Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

3.1 Bewertungsmethode

In Anlehnung an das Konzept der Planetaren Belastbarkeitsgrenze Wasser wird im Folgenden eine Methode beschrieben, um Wasserverbrauch unter Berücksichtigung lokaler Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten und Übernutzung zu bewerten. Hierfür werden zuerst die Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten weltweit ermittelt (Abschnitt 3.1.1). Diese ergeben sich aus dem Wasserdargebot (Abschnitt 3.1.2.) abzüglich *umweltbedingter Wasserflussanforderungen* (EFR) (Abschnitt 3.1.3). Danach werden die ermittelten Belastbarkeitsgrenzen dem anthropogenen Wasserverbrauch gegenübergestellt. Aus der Gegenüberstellung des anthropogenen Wasserverbrauchs (Wassergrundbedarf und gesamter Wasserverbrauch) lassen sich *Hotspots* ableiten (Abschnitt 3.1.4). Aus dem Quotienten aus Belastbarkeitsgrenze und anthropogenem Wasserverbrauch ergeben sich die Charakterisierungsfaktoren (Abschnitt 3.1.5).

3.1.1 Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten

Zur Berechnung der Belastbarkeitsgrenze (BG) im Einzugsgebiet i zum Zeitpunkt t wurden vom natürlichen Wasserdargebot (WD) im Einzugsgebiet umweltbedingte Wasserflussanforderungen (EFR) subtrahiert²⁸. Letztere bezeichnen den erforderlichen Anteil am natürlichen Wasserdargebot, um die lokalen aquatischen Ökosysteme in einem angemessenen ökologischen Zustand zu erhalten (Pastor et al., 2014). Es wird angenommen, dass der verbleibende Anteil am natürlichen Wasserdargebot vom Menschen verbraucht werden kann, ohne die aquatischen Ökosysteme im Einzugsgebiet langfristig zu schädigen. Daher wird der verbleibende Anteil am natürlichen Wasserdargebot auch als *ökologische Belastbarkeitsgrenze* verstanden.

$$BG_{i,t} = WD_{i,t} - (WD_{i,t} \cdot EFR_{i,t})$$

3.1.2 Wasserdargebot und Wasserverbrauch

Die Daten zum Wasserdargebot und zum gesamten anthropogenen Wasserverbrauch entstammen dem globalen hydrologischen Modell WaterGAP3 (Alcamo et al., 2003; Döll et al., 2003; Eisner, 2016). Eines der Ziele von WaterGAP ist es, Ungleichgewichte zwischen dem menschlichen Wasserbedarf und natürlichem Wasserdargebot zu identifizieren und zu analysieren.

3.1.2.1 Wasserdargebot

Das natürliche Wasserdargebot entspricht der Summe von Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung²⁹. Die höchsten Ausprägungen des Wasserdargebots werden entlang des Äquators erreicht ($>2.500 \text{ mm} \cdot \text{Monat}^{-1}$). Ein eher geringes Wasserdargebot gibt es bspw. in Regionen nördlich des Äquators entlang der Sahara und in Zentralasien, südlich des Äquators auf dem australischen Kontinent oder auch im südlichen Teil Afrikas. Im Mittel beträgt das Wasserdargebot weltweit ca. 27 bis 36 $\text{mm} \cdot \text{Monat}^{-1}$. Das 75%-Quantil beträgt weltweit ca. 30 bis 42 $\text{mm} \cdot \text{Monat}^{-1}$.

²⁸ Die Werte für die umweltbedingten Wasserflussanforderungen liegen zwischen 30 und 60% des durchschnittlichen Wasserdargebots.

²⁹ Das natürliche Wasserdargebot ist im externen Anhang *Karte-CF-Wasserdargebot.pdf* abgebildet.

Erläuterung zur Normalisierung des Wasserdargebots und des Wasserverbrauchs

Einzugsgebiete mit einer großen Fläche wie bspw. das Amazonasbecken verfügen tendenziell über ein hohes absolutes Wasserdargebot. Analog dazu verfügen Einzugsgebiete mit einer kleinen Fläche wie bspw. die deutsche Ostseeinsel Fehmarn tendenziell über ein geringes absolutes Wasserdargebot. Grund hierfür ist, dass kleine Einzugsgebiete bei gleicher Niederschlagsmenge weniger Wasser erhalten als große Einzugsgebiete. Absolute Mengenangaben eignen sich folglich nur bedingt für einen Vergleich der Wasserverfügbarkeit oder des Wasserverbrauchs in Einzugsgebieten.

Um das Wasserdargebot und auch den Wasserverbrauch in den Einzugsgebieten trotzdem vergleichen zu können, wurde das Wasserdargebot aller Einzugsgebiete anhand der Fläche der Einzugsgebiete normalisiert. Das Ergebnis der Normalisierung ist das Wasserdargebot in Menge·Fläche⁻¹. Im vorliegenden Fall wurden die Werte weiter in die Einheit *Millimeter* umgewandelt. Ein Millimeter entspricht einem Liter pro Quadratmeter Fläche.

3.1.2.2 Wassergrundbedarf

Der anthropogene Wassergrundbedarf (MGB) wurde über den von der Weltgesundheitsorganisation vorgeschlagenen pro-Kopf-Bedarf für ein optimales Versorgungsniveau (Howard und Bartram, 2003) berechnet³⁰. Die Weltgesundheitsorganisation empfiehlt 50 Liter pro Person pro Tag für ein mittleres gesundheitliches Versorgungsniveau und 100 Liter pro Person pro Tag für ein optimales Versorgungsniveau. Die Wassergrundversorgung umfasst den häuslichen Wasserbedarf für Trinken, Kochen, Waschen und Hygiene³¹. Für die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren wurde von einem optimalen Versorgungsniveau ausgegangen. Grundsätzlich ist der Anteil des Wassergrundbedarfs am gesamten Wasserverbrauch aber tendenziell gering.

$$MGB_{i,t} = \text{Bevölkerung}_{i,t} \cdot 50 \text{ Liter} \cdot \frac{365}{12}$$

Bzw.

$$MGB_{i,t} = \text{Bevölkerung}_{i,t} \cdot 100 \text{ Liter} \cdot \frac{365}{12}$$

3.1.2.2.1 Bevölkerung

Um den menschlichen Wassergrundbedarf zu bestimmen, wurden Bevölkerungsdaten mit einer Auflösung von 0,5°·0,5°³² für das Referenzjahr 2020 des *Socioeconomic Data and Applications*

³⁰ Da es sich bei der vorliegenden Studie um eine quantitative Analyse der Wasserressourcen handelt, wurden qualitative Kriterien zum Versorgungsniveau wie bspw. die Entfernung zur Wasserquelle nicht berücksichtigt.

³¹ Es wurde nicht berücksichtigt, dass der Wassergrundbedarf der Menschen in einigen Einzugsgebieten durch Wasser aus anderen Einzugsgebieten befriedigt wird. Bspw. importiert der Stadtstaat Singapur Wasser über eine Rohrleitung aus Malaysia (Luan, 2010).

³² Also 720 Zellen entlang der geodätischen Länge und 360 Zellen entlang der geodätischen Breite. Die Gesamtgröße des Rasters beträgt somit 259.200 Rasterzellen. Am Äquator beträgt die Länge von einem

Center der *National Aeronautics and Space Administration* verwendet (CIESIN, 2018) auf Einzugsgebiete aggregiert (siehe Zusatzmaterial *Karte-Bevölkerung.pdf*). Die Weltbevölkerung im NASA-Datensatz beläuft sich auf 7,9 Milliarden Menschen. Davon konnten 7.969.341.518 Menschen den WaterGAP3 Einzugsgebieten zugeordnet werden. Die resultierende Differenz von 103.041 Menschen (0,000013%) wurde als nicht signifikant erachtet.

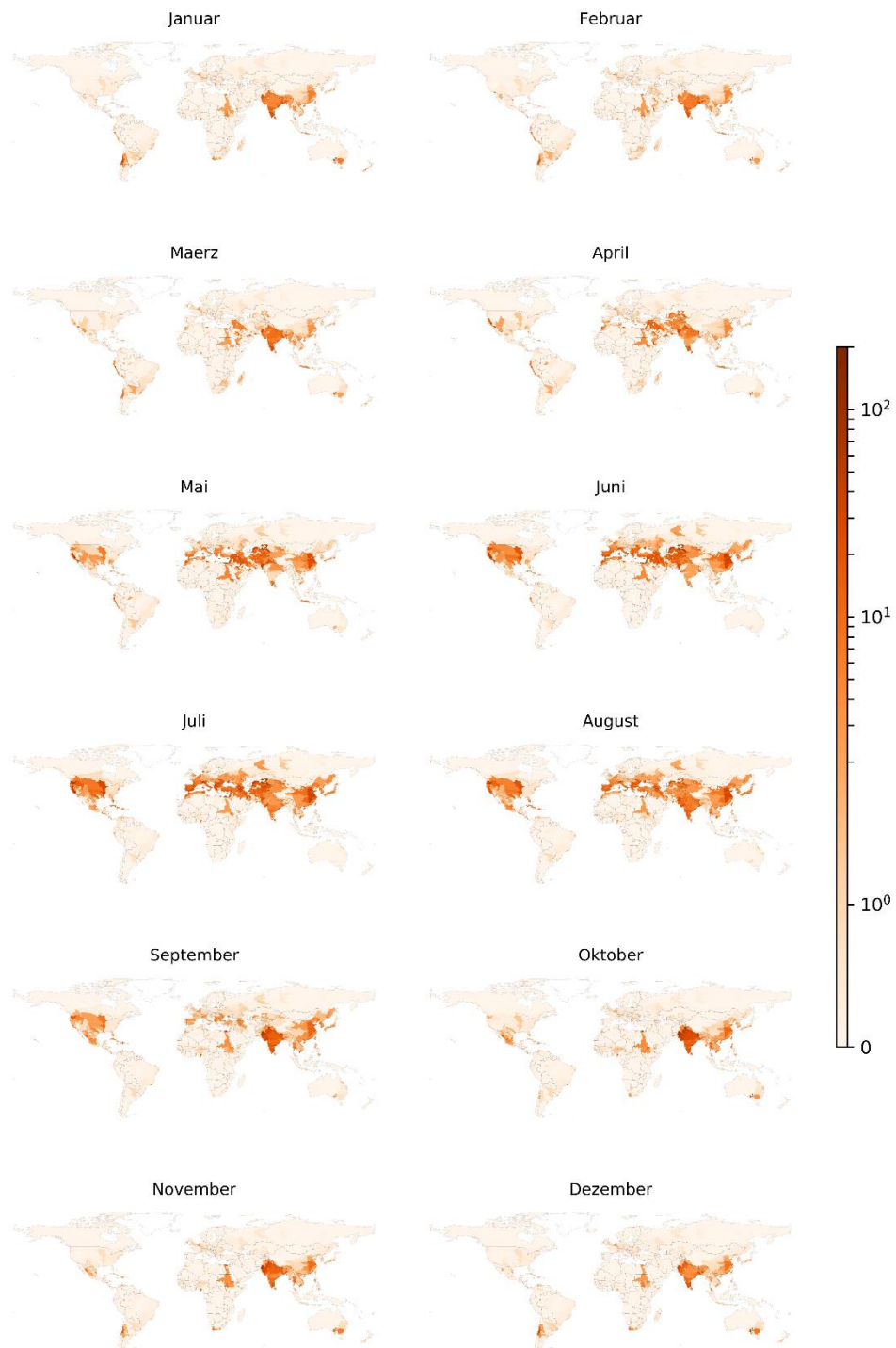
3.1.2.3 Gesamter anthropogener Wasserverbrauch

Der gesamte anthropogene Wasserverbrauch in WaterGAP3 basiert gemäß Eisner (2016) auf Modellen von Flörke et al. (2013) und aus der Beek et al. (2010). Er umfasst häusliche Wasserverbrauch (Haushalte und Kleinbetriebe), Industrie, Kühlwasser, Bewässerung in der Landwirtschaft und Viehzucht.

Der gesamte anthropogene Wasserverbrauch unterliegt hohen saisonalen Schwankungen (Abbildung 5). In der nördlichen Hemisphäre ist der gesamte anthropogene Wasserverbrauch tendenziell von März bis Oktober am höchsten. In der südlichen Hemisphäre ist der gesamte anthropogene Wasserverbrauch tendenziell von Oktober bis März am höchsten. Die Maximalausprägungen des gesamten anthropogenen Wasserverbrauchs betragen ca. 50 bis 170 mm·Monat⁻¹. Im Mittel beträgt der gesamte anthropogene Wasserverbrauch weltweit ca. 0,4 bis 1,4 mm·Monat⁻¹. Das 75 %-Quantil beträgt weltweit ca. 0,12 bis 0,26 mm·Monat⁻¹.

Abbildung 5: Gesamtwasserverbrauch

Die Abbildung zeigt den anthropogenen Gesamtwasserverbrauch gemäß WaterGAP3.



Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Gesamtwasserverbrauch.pdf*

Quelle: WaterGAP

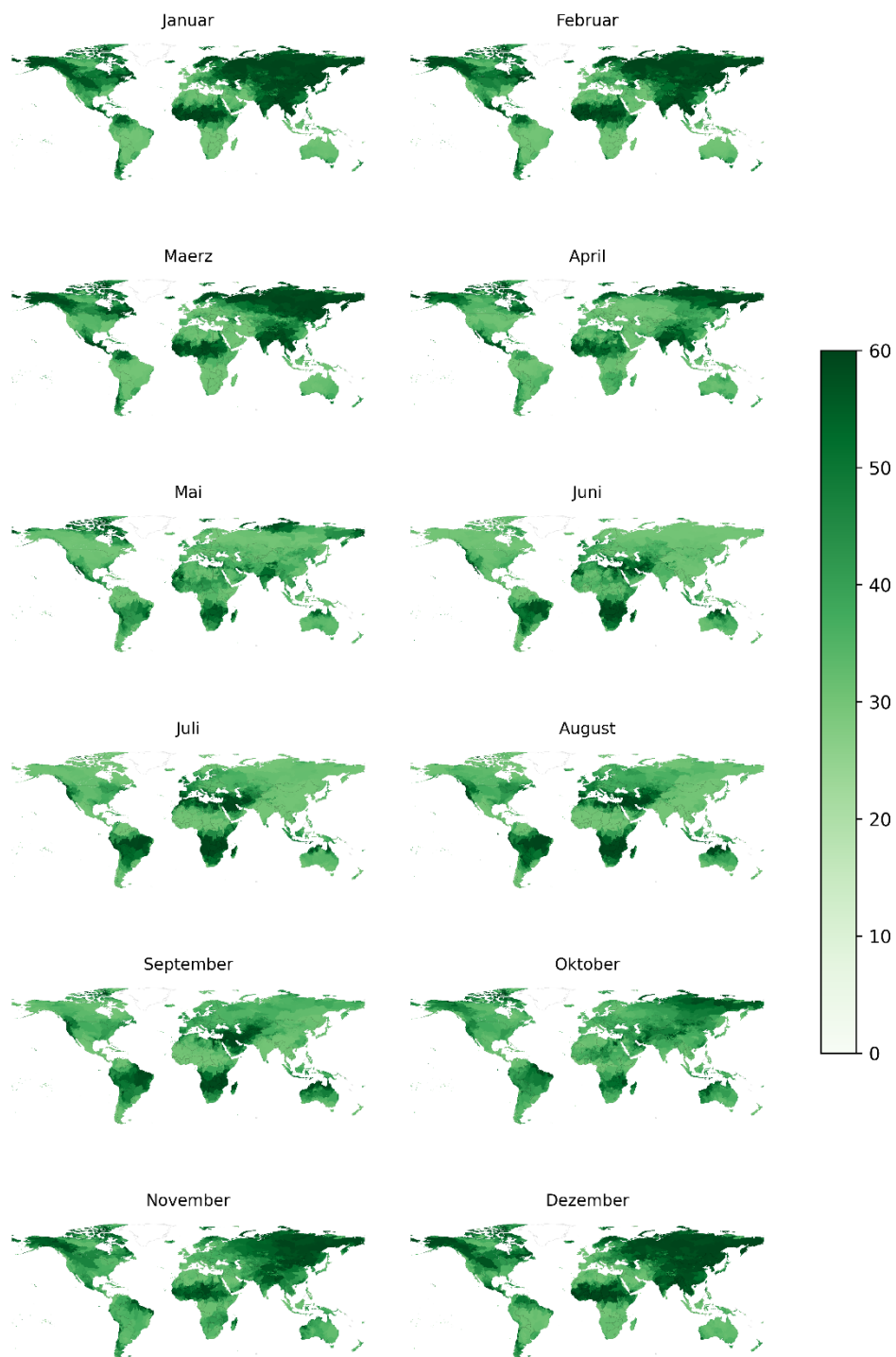
3.1.3 Umweltbedingte Wasserflussanforderungen

Die umweltbedingten Wasserflussanforderungen wurden von Pastor et al. (2014) berechnet und für das vorliegende Vorhaben in einer Auflösung von $0,5^\circ \cdot 0,5^\circ$ zur Verfügung gestellt (Abbildung 6)³³. Zur Anwendung auf Ebene von Einzugsgebieten wurden die Raster-Daten auf Einzugsgebiete aggregiert. Aufgrund teilweiser Nicht-Überlagerung der umweltbedingten Wasserflussanforderungen und den Einzugsgebieten aus WaterGAP3, konnte für einige wenige Einzugsgebiete keine umweltbedingten Wasserflussanforderungen bestimmt werden (siehe Zusatzmaterial *Karte-EFR-0.png*).

³³ Basierend auf einer 40-jährigen Zeitreihe von 1961 bis 2000.

Abbildung 6: Umweltbedingte Wasserflussanforderungen

Die Abbildung zeigt die Umweltbedingten Wasserflussanforderungen (EFR) in Prozent (Pastor et al., 2014).
Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-EFR.pdf*



Quelle: Pastor et al. (2014)

3.1.4 Hotspots

Zur Bestimmung von Hotspots wurden die Belastbarkeitsgrenzen mit dem menschlichen Wassergrundbedarf (MGB) und dem gesamten menschlichen Wasserverbrauch (MGV) verglichen. Dort, wo die Differenz zwischen Belastbarkeitsgrenze und anthropogenem Wassergrundbedarf oder dem gesamten anthropogenen Wasserverbrauch negativ ist, wird die lokale Belastbarkeitsgrenze überschritten. Folglich handelt es sich um einen Hotspot. Ein Wasserknappheit-Hotspot im Einzugsgebiet i zum Zeitpunkt t ist demnach definiert als:

$$BG_{i,t} - MGB_{i,t} < 0$$

oder

$$BG_{i,t} - MGV_{i,t} < 0$$

Es wurde also gleichermaßen analysiert, ob Hotspots bereits durch den anthropogenen Wassergrundbedarf oder erst durch den gesamten anthropogenen Wasserverbrauch verursacht werden.

3.1.5 Charakterisierungsfaktoren

Die Charakterisierungsfaktoren ergeben sich aus dem Quotienten der Belastbarkeitsgrenze in einem Einzugsgebiet und dem menschlichen Gesamtwasserverbrauch in dem Einzugsgebiet. Die zeitliche Auflösung der Charakterisierungsfaktoren ist *pro Monat*. Die Berechnung für ein Gebiet i im Monat t lautet:

$$CF_{i,t} = \frac{MGV_{i,t}}{BG_{i,t}} = \frac{MGV_{i,t}}{WD_{i,t} - (WD_{i,t} \cdot EFR_{i,t})}$$

Das Ziel der Charakterisierungsfaktoren ist es, die Überschreitung der lokalen Belastbarkeitsgrenzen der Einzugsgebiete abzubilden. Ein Charakterisierungsfaktor zeigt an, ob die Wasserressourcen im Gebiet i , innerhalb der berechneten Belastbarkeitsgrenzen genutzt werden ($CF < 1$) oder bereits um einen Faktor X übernutzt werden ($CF > 1$).

Sie können im Rahmen von ISO14046-konformen Wasserfußabdruckstudien dazu verwendet werden, um Sachbilanzergebnisse zu charakterisieren (Wasserknappheits-Fußabdruck).

$$\text{Wasserknappheits-Fußabdruck} = \sum_i \text{Wasserverbrauch}_i \cdot CF_i$$

Es wurden Charakterisierungsfaktoren für Länder, Regionen (bspw. ein Bundesstaat oder eine Provinz) und Einzugsgebiete berechnet.

3.1.5.1 Jährliche Charakterisierungsfaktoren

Zusätzlich zu den monatlichen Charakterisierungsfaktoren wurden konsumgewichtete Charakterisierungsfaktoren für das Jahresmittel berechnet.

$$CF_{i,Jahr} = \frac{\sum_{t=1}^{12} MGV_{i,t}}{\sum_{t=1}^{12} MGV_{i,t}}$$

3.1.5.2 Abschneidekriterien

Zur Nichtberücksichtigung von Ausreißern bei den Charakterisierungsfaktoren wurden nur Charakterisierungsfaktoren innerhalb des 99%-Quantils berücksichtigt. Darüber hinaus umfassen die Einzugsgebiete in WaterGAP3 Einzugsgebiete ohne verfügbares Wasser oder ohne Wasserverbrauch.

Keine Wasserverfügbarkeit:

Wenn $MGV_i > 0$ und $BG_i = 0$ dann ist $CF = \frac{MGV}{BG} = \infty$. In diesen Fällen wurde der Charakterisierungsfaktor mit dem menschlichen Gesamtwasserverbrauch gleichgesetzt. Dieser Fall tritt in erster Linie bei flächenmäßig kleinen Einzugsgebieten auf und ist auf Schwierigkeiten bei einer großmaßstäbigen und gleichzeitig hochauflösenden Datenerfassung zurückzuführen (siehe Zusatzmaterial *Karte-Wasserverfügbarkeit-0.pdf*).

Kein Wasserverbrauch:

Die Daten zum Wasserverbrauch/Wasserdargebot und zu den umweltbedingten Wasserflussanforderungen haben verschiedene Ursprünge (Tabelle 1). Es kann daher vorkommen, dass für Einzugsgebiete zwar Daten zum Wasserverbrauch vorlagen, aber keine Daten zu für die umweltbedingten Wasserflussanforderungen. In diesen Fällen konnte kein Charakterisierungsfaktor berechnet werden. Auch hier sind in erster Linie kleine Einzugsgebiete betroffen (siehe Zusatzmaterial *Karte-Wasserverbrauch-0.pdf*).

3.2 Konsuminduzierter Wasserverbrauch

Um den konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland zu bestimmen, wurde eine Input-Output-Analyse durchgeführt. Die Datengrundlage der durchgeführten Input-Output-Analyse bildet das multiregionale Input-Output Tabellenmodell *Exiobase* in der Version 3.8.1 für das Jahr 2021 (Stadler et al., 2018).

Input-Output-Tabellen enthalten regional aufgeschlüsselte Informationen zu Transaktionen zwischen Wirtschaftssektoren oder Wirtschaftssektoren und Konsumierenden³⁴. Auf Grundlage dieser wirtschaftlichen Verflechtungen können Externalitäten, also bspw. ökologische oder soziale Wirkungen, die durch die Akteure im abgebildeten Wirtschaftssystem verursacht wurden, den Verursachenden zugeordnet werden. Externalitäten sind typischerweise in *Satellitenkonten* hinterlegt.

Die zugrunde liegenden Rechenschritte für Input-Output-Analyse wurden maßgeblich durch den Ökonomen Wassily Leontief begründet (Leontief 1970, 1936) und sind in der Fachliteratur ausführlich beschrieben; in Kürze bspw. durch Kitzes (2013) und in Gänze bspw. durch Miller und Blair (2009). Auf eine weitere Ausführung der Rechenschritte soll daher im vorliegenden Bericht verzichtet werden. Eine Möglichkeit zur Verifizierung der Ergebnisse mit dem Python-Paket *pyMRIO* (Stadler, 2021) ist in Abschnitt B auf S.143 beschrieben. Die Rechenschritte sind auch in der Dokumentation von *pyMRIO* hinterlegt³⁵.

Das konsumbasierte und produktionsbasierte Inventar in Input-Output-Analyse

Bei den Ergebnissen der Input-Output-Analyse wird zwischen dem **produktionsbasierten** Inventar und dem **konsumbasierten** Inventar unterschieden.

Im produktionsbasierten Inventar für die Endnachfrage einer bestimmten Region wird der Wasserverbrauch entlang der gesamten Wertschöpfungskette dem letzten Sektor in der Wertschöpfungskette zugeordnet. Das produktionsbasierte Inventar einer Region beinhaltet Imports, aber keine Exporte.

Im konsumbasierten Inventar für die Endnachfrage einer bestimmten Region wird der Wasserverbrauch entlang der gesamten Wertschöpfungskette den Sektoren zugeordnet, in denen das Wasser tatsächlich verbraucht wurde. Das konsumbasierte Inventar einer Region beinhaltet Exporte, aber keine Importe.

Eine hypothetische Wertschöpfungskette besteht aus zwei Sektoren, die verschiedenen Regionen zugehörig sind.

- Sektor 1 in Region A produziert unter hohem Wasserverbrauch Baumwolle und transferiert diese an Sektor 2 in Region B
- Sektor 2 in Region B hat selber keinen hohen Wasserverbrauch aber verarbeitet die wasserintensive Baumwolle weiter zu einem Kleidungsstück, welches in Region C von Endkonsumierenden konsumiert wird.

Im konsumbasierten Inventar würde der gesamte Wasserverbrauch entlang aller Wertschöpfungskettenabschnitte, also auch der Wasserverbrauch in Sektor 1 in Region A dem

³⁴ Bspw. Haushalte, aber auch staatliche oder nicht-staatliche Akteure

³⁵ <https://pymrio.readthedocs.io/en/latest/math.html> (abgerufen am 27.05.2021)

Sektor 2 in Region B zugeordnet werden. Im produktionsbasierten Inventar würde der gesamte Wasserverbrauch jeweils den Sektoren und Regionen zugeordnet werden, in denen der Wasserverbrauch tatsächlich stattgefunden hat.

- **Produktionsperspektive (Abschnitt 4.2.2):** Der Wasserverbrauch wird dem Sektor und seiner Region zugeordnet, in dem das Wasser direkt verbraucht wird.
- **Konsumperspektive (Abschnitt 4.2.3):** Der Wasserverbrauch wird dem Sektor und seiner Region zugeordnet, welcher den letzten Wertschöpfungskettenabschnitt vor dem finalen Konsum darstellt.

3.2.1 Wasser-Satellitenkonten

Exiobase verfügt über native Satellitenkonten für blaues und grünes Wasser. Satellitenkonten umfassen absolute Zahlen zu den Externalitäten die durch die in der Datenbank hinterlegten Sektoren verursacht werden. Also bspw. der gesamte Wasserverbrauch des Sektors Stahlindustrie oder Landwirtschaft einer Region. Die Terminologie *blaues*, *grünes* und auch *graues* Wasser wurde durch das WFN begründet (siehe Infobox Abschnitt 3.2.1). Die Erstellung der blauen und grünen Wasser-Satellitenkonten für die Exiobase ist in Anhang 4 von Stadler et al. (2018) erklärt. Für den Agrarsektor basieren die Wasser-Satellitenkonten auf Pfister und Bayer (2014), Pfister et al. (2011) und Mekonnen und Hoekstra (2011). Für den industriellen blauen Wasserverbrauch basieren die Wasser-Satellitenkonten auf Flörke et al. (2013).

Da die Exiobase über keine Satellitenkonten für graues Wasser verfügt, wurden diese zumindest für den Agrarsektor eigens für das vorliegende Forschungsvorhaben entwickelt. Hierfür wurden die nationalen Produktionsmengen einzelner Nutzpflanzen (FAO, o.D.) mit entsprechenden Daten zum grauen Wasserverbrauch (Mekonnen und Hoekstra 2011) multipliziert³⁶. Einige Quellen benennen Landwirtschaft als den weltweit größten Verursacher von Wasserverschmutzung (bspw. Mateo-Sagasta et al., 2018). Zumindest regional betrachtet sollte aber davon ausgegangen werden, dass diese Annahme nicht immer der Realität entspricht. Alternativ zu dem hier gewählten Vorgehen könnten aus den in der Exiobase hinterlegten nativen Satellitenkonten für Phosphor- und Stickstoffemissionen Indikatoren für graues Wasser entwickelt werden. Dieses Vorgehen würde eine sektoral umfangreichere Betrachtung der Wasserverschmutzung bieten. Allerdings wäre das Vorgehen inkonsistent mit den existierenden Satellitenkonten für Wasserverbrauch. Außerdem müssten regionalspezifische Ursache-Wirkungsketten von gleichzeitigem Stickstoff- und Phosphoreintrag in Gewässer und Emissionen auf Land berücksichtigt werden.

Indikatoren zum Wasserverbrauch

- **Blauer Wasserverbrauch:** Wasserverbrauch aus Oberflächenwasser und Grundwasser; d.h. zugängliches Süßwasser aus Seen, Flüssen und Grundwasserleitern.
- **Grüner Wasserverbrauch:** Der Niederschlag über Landflächen, der nicht abfließt oder das Grundwasser anreichert, sondern welcher in der Erde gespeichert wird oder temporär auf der

³⁶ Basierend auf Nitratreintrag und einem zulässigen Grenzwert von 10 mg Nitrat-Stickstoff (NO₃-N) pro Liter.

Erdoberfläche oder Vegetation verbleibt. Letztlich evaporiert oder transpiriert dieser Anteil des Niederschlags über Landflächen durch Pflanzen [...].

- **Grauer Wasserverbrauch:** Der Graue Wasserfußabdruck ist ein Indikator für die Verunreinigung von Süßwasser, die mit der Herstellung eines Produkts [...] in Verbindung gebracht werden kann. Er ist definiert als die Menge an Süßwasser, die erforderlich ist, um die Verunreinigung [...] aufzunehmen [bzw.] um Verunreinigung so weit zu verdünnen, dass die Wasserqualität mit vereinbarten Wasserqualitätsnormen übereinstimmt.

Quelle: Übersetzt von Hoekstra et al. (2012)

3.2.2 Strukturelle Pfadanalyse

In Bezug auf Input-Output-Analyse bezeichnet Strukturelle Pfadanalyse (*Structural Path Analysis; SPA*) eine Methode zur Bestimmung und Nachverfolgung der höchsten Umweltwirkungen einzelner Sektoren auf verschiedenen Produktionsebenen ähnlich einer Wertschöpfungskettenanalyse. Die SPA wurde unter Verwendung des Python-Pakets *pySPA* durchgeführt (Stephan und Bontinck, 2019). Die resultierenden Abbildungen in Abschnitt 3.2.2 (S.59) zeigen jeweils nur die mengenmäßig bedeutendsten virtuellen Flüsse blauen Wassers. Sie zeigen ausdrücklich nicht monetäre oder gar physische Warenströme. Das heißt, dass sektorale Outputs, die ohne Verwendung von blauem Wasser erzeugt wurden, in den Abbildungen auch nicht sichtbar sind. Da der Fokus des vorliegenden Berichts auf den blauen Wasserverbrauch gerichtet ist, wurde grünes und graues Wasser in der SPA nicht berücksichtigt.

3.2.3 Zuordnung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs auf Einzugsgebiete

Um die lokalen Auswirkungen des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland zu ermitteln, wurde der blaue Anteil des Wasserverbrauchs *konsumgewichtet* auf die Einzugsgebiete in den jeweiligen Herkunftsregionen zugeordnet. Jedem Einzugsgebiet in einer Region wurde also der Anteil am Wasserverbrauch zugeordnet, den das Einzugsgebiet am gesamten Wasserverbrauch in der Region hat. Wenn bspw. gemäß des WaterGap3-Modells 70% des Wasserverbrauchs in einem Land in einem einzigen Flusseinzugsgebiet stattfinden, dann wurde diesem Flusseinzugsgebiet auch 70% des über die Exiobase-Datenbank ermittelten Wasserverbrauchs zugewiesen.

3.2.4 Gewichtung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland

Die im vorherigen Schritt auf Einzugsgebiete zugeordneten regionalen Teil-Beiträge zum Wasserverbrauch von Deutschland wurden mit den Charakterisierungsfaktoren zu Bewertung des Wasserverbrauchs unter Berücksichtigung der Belastbarkeitsgrenzen der Einzugsgebiete multipliziert. Anschließend wurden diese charakterisierten Wasserverbrauchsmengen nach Regionen aggregiert und so der wasserknappheitsgewichtete Wasserverbrauch der Regionen bestimmt.

3.2.5 Datenbankwahl

Ein Vergleich etablierter EE-IO Datenbanken von Pfister und Kulionis (2020)³⁷ hat gezeigt, dass die Eora Datenbank (Lenzen et al., 2013, 2012) die EE-IO-Datenbank mit Satellitenkonten für Wasser ist, welche über die höchste regionale und sektorale Auflösung verfügt³⁸. Da der räumliche Bezug der vorliegenden Analyse des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland global ist (bzw. *planetar*), wurden die sektorale und die regionale Abdeckung der Datenbanken als Auswahlkriterien ursprünglich priorisiert. Bei näherer Betrachtung erwiesen sich die nativen Satellitenkonten der Eora-Datenbank für Wasser jedoch als fehlerbehaftet und als nicht ausreichend belastbar. Der Grund für diese Einschätzung wird im nachfolgenden Abschnitt 3.2.5.1 näher erläutert. Die Entwicklung von neuen Satellitenkonten für Wasser für die 14.838 heterogenen Sektoren der Eora-Datenbank war aufgrund des hohen Arbeitsaufwands im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht machbar. Eine Entwicklung von hochaufgelösten Satellitenkonten für Wasser für die Agrarsektoren der Eora26-Datenbank wurde durchgeführt. Allerdings erwiesen sich diese neu entwickelten Satellitenkonten aufgrund der Proportionalitätsannahme³⁹ in EE-IO schnell als wenig zielführend (siehe ebenfalls Abschnitt 3.2.5.1).

Aus diesen Gründen wurde trotz geringerer regionaler und teilweise geringerer sektoraler Auflösung im Forschungsvorhaben mit Exiobase-Datenbank gearbeitet (Stadler et al., 2018). Nominal hat Exiobase-Datenbank eine geringere regionale und sektorale Auflösung als die Eora-Datenbank. Allerdings bildet die Exiobase-Datenbank alle EU-Länder und die größten Volkswirtschaften der Welt und damit auch die größten Handelspartner Deutschlands ab (insgesamt 48 Regionen; siehe Abbildung 61). Die übrigen Regionen sind in sogenannten *Rest-of-World* (RoW) Regionen zusammengefasst.

Entgegen der Eora-Datenbank verfügt die Exiobase-Datenbank nicht über explizite Satellitenkonten für graues Wasser. Diese wurden im vorliegenden Forschungsvorhaben für die Landwirtschaftssektoren erarbeitet (siehe Abschnitt 3.2.1). Zeitlich bildet die Exiobase die Jahre 1995 bis einschließlich 2022 ab (die Eora-Datenbank 1990 bis einschließlich 2015). Die Exiobase-Datenbank v3.3 wurde bereits in früheren Arbeiten zum Wasserverbrauch von Deutschland verwendet (Lutter et al., 2018). Die öffentlich verfügbare Dokumentation der Exiobase-Datenbank erscheint umfangreicher als die öffentlich verfügbare Dokumentation der Eora-Datenbank. Dies betrifft auch die Transparenz in Bezug auf die Satellitenkonten für Wasser. Die Exiobase-Datenbank gibt es auch als *Input-Output* Tabelle mit physischen Warenströmen anstatt monetärer Transaktionswerte. Diese verfügt über weniger differenzierte Satellitenkonten für Wasser als die *Standard*-Exiobase-Datenbank.

Weitere interessante Initiativen zur Erfassung nationaler Ressourcenverbräuche umfasst das *Food and Agriculture Biomass Input-Output Model* (Bruckner et al., 2019) und eine hochaufgelöste EE-IO-Datenbank durch die Zusammenführung von der Eora26- und Exiobase-Datenbank von Cabernard und Pfister (2021). Beide Datenbanken waren zu Beginn des vorliegenden Forschungsvorhabens nicht öffentlich verfügbar. Es ist außerdem anzumerken, dass Bruckner et al. (2019) nur Agrarprodukte abbilden.

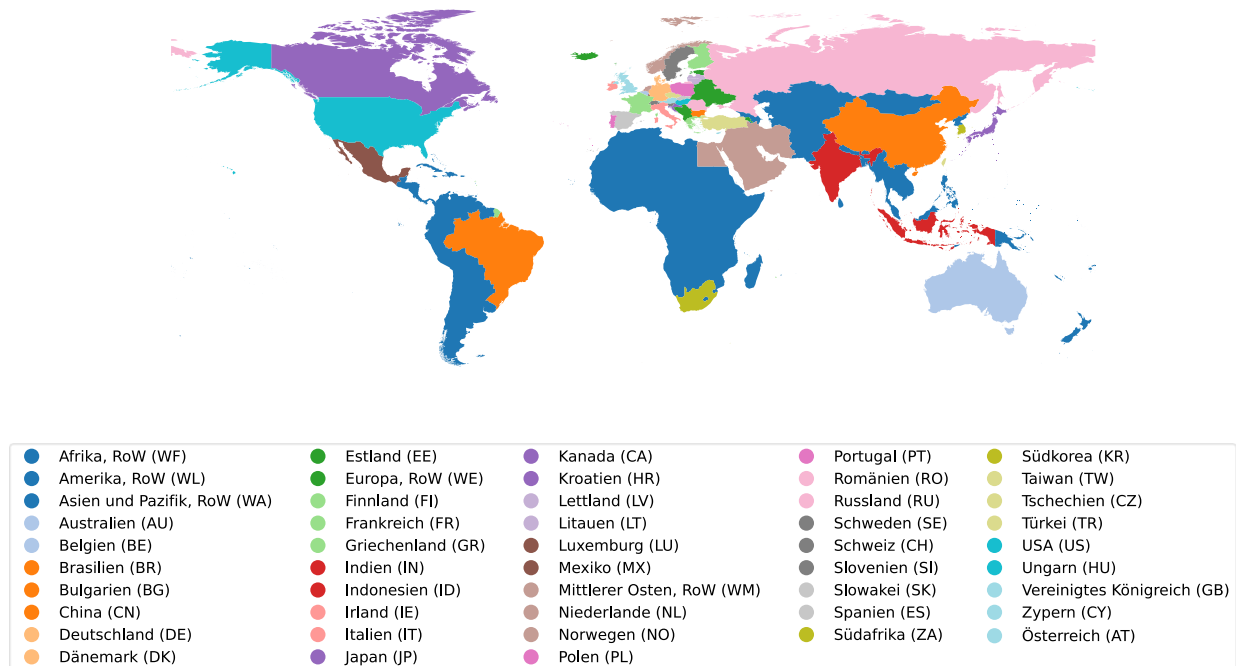
³⁷ Siehe Zusatzmaterial *Supplementary/Übersicht_IO_Datenbanken_Pfister_Kulionis.pdf*

³⁸ 14.838 Sektoren in 190 Regionen (Ländern); Siehe Tabelle 1 in Pfister und Kulionis (2020)

³⁹ *Proportionalitätsannahme* bedeutet, dass jeder Sektor oder jede Endnachfrage zu gleichen Proportionen Gütern aus einem Sektor konsumiert (siehe auch Abschnitt 3.2.5.1).

Abbildung 7: Regionen der Exiobase-Datenbank

Die Abbildung zeigt die in der Exiobase-Datenbank abgebildeten Regionen.



Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-Exiobase-Regionen.pdf*

Quelle: Exiobase-Datenbank

3.2.5.1 Wasser-Satellitenkonten der Eora-Datenbank

In diesem Abschnitt soll erläutert werden, warum die nativen Satellitenkonten für Wasser der Eora-Datenbank als fehlerbehaftet und als nicht ausreichend belastbar beurteilt wurden. Darüber hinaus soll erläutert werden, warum aufgrund der Proportionalitätsannahme in EE-IO auch von einer Anwendung der Eora26-Datenbank abgesehen wurde. Bezugspunkt ist jeweils die Version 199.82 der Datenbank.

Eora-Datenbank

Trotz der hohen sektoralen Auflösung von teilweise mehreren hundert Sektoren pro Region verfügt die Eora-Datenbank pro Region lediglich über zwei eindeutige Werte für den blauen Wasserverbrauch (Abbildung 9). Bspw. ist nur einem Sektor der Region USA (Ölsaaten) blauer landwirtschaftlicher Wasserverbrauch zugewiesen (95905 Mio. m³). Die USA verfügen in der Eora-Datenbank aber über neun Nutzpflanzen-Sektoren. Es ist unwahrscheinlich, dass ausschließlich in einem dieser Sektoren blaues Wasser verbraucht wird. Darüber hinaus ist allen Sektoren in der Datenbank der gleiche Wert für industriellen blauen Wasserverbrauch zugewiesen (12,8 Mio. m³). Dieser Umstand könnte als Vereinfachung betrachtet werden, wenn es sich um den Wasserverbrauch pro Einheit Output handeln würde. Es handelt sich aber um den gesamten Wasserverbrauch eines Sektors. Da der gesamte Wasserverbrauch eines Sektors aber in der Input-Output-Rechnung anhand des monetären Outputs eines Sektors normalisiert wird, kommt es zu einer extremen Verzerrung. Schlussendlich ist der monetäre Output eines Sektors dann bestimmender Faktor für den Wasserverbrauch eines Sektors pro Einheit Output. Sektoren, die einen hohen monetären Output haben, bekommen geringe Werte für blauen Wasserverbrauch pro Einheit Output zugewiesen.

Dieser Misstand ist auch für die Region Deutschland in der Eora-Datenbank nachweisbar (Abbildung 9). Es ist nicht nachvollziehbar, dass Wirtschaftssektoren, die sowohl in ihrer Produktionsstruktur als auch in ihrer volkswirtschaftlichen Größe so voneinander abweichen wie *Schienentransport, Sport und Vergnügen, Schifffahrt, Elektrizität und Fernwärme* oder auch *Uranium- und Thorium-Erze* alle den exakt gleichen industriellen blauen Wasserverbrauch aufweisen.

Abbildung 8: Satellitenkonten für Wasserverbrauch in den USA gemäß Eora

Dargestellt sind die Satellitenkonten für Wasserverbrauch in den USA in der Eora Datenbank (Version 199.82 für das Referenzjahr 2015). Bis auf dem Sektor *Ölsaaten-Anbau*, sind allen Sektoren die gleichen Werte für blauen Wasserverbrauch zugewiesen. Anderen Nutzpflanzen-bezogenen Sektoren wie bspw. *Grain farmin, all other crop farming* wurde kein landwirtschaftlicher Wasserverbrauch zugewiesen.

Index	Country	CountryA	Entity	Sector	WFN: Water footprint of crop production* (Mm3/yr) - Green	WFN: Water footprint of crop production* (Mm3/yr) - Blue	WFN: Water footprint of crop production* (Mm3/yr) - Grey	WFN: Water footprint of grazing** (Mm3/yr) - Green	WFN: Water footprint of grazing** (Mm3/yr) - Blue	WFN: Water footprint of grazing** (Mm3/yr) - Grey	WFN: Water footprint of animal water supply** (Mm3/yr) - Green	WFN: Water footprint of animal water supply** (Mm3/yr) - Blue	WFN: Water footprint of animal water supply** (Mm3/yr) - Grey	WFN: Water footprint of industrial production (Mm3/yr) - Green	WFN: Water footprint of industrial production (Mm3/yr) - Blue	WFN: Water footprint of industrial production (Mm3/yr) - Grey	WFN: Water footprint of domestic water supply (Mm3/yr) - Green	WFN: Water footprint of domestic water supply (Mm3/yr) - Blue	WFN: Water footprint of domestic water supply (Mm3/yr) - Grey	WFN: Total water footprint (Mm3/yr) - Green	WFN: Total water footprint (Mm3/yr) - Blue	WFN: Total water footprint (Mm3/yr) - Grey
13209USA	USA	Industries	Oilseed farming		611971	95905	118160	120996	0	0	0	3361	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	732967	99278.77	118229
13210USA	USA	Industries	Grain farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13211USA	USA	Industries	Vegetable and melon farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13212USA	USA	Industries	Fruit farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13213USA	USA	Industries	Tree nut farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13215USA	USA	Industries	Tobacco farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13216USA	USA	Industries	Cotton farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13217USA	USA	Industries	Sugarcane and sugar beet farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13218USA	USA	Industries	All other crop farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13219USA	USA	Industries	Cattle ranching and farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13638USA	USA	Commodities	Oilseed farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13639USA	USA	Commodities	Grain farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13640USA	USA	Commodities	Vegetable and melon farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13641USA	USA	Commodities	Fruit farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13642USA	USA	Commodities	Tree nut farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13644USA	USA	Commodities	Tobacco farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13645USA	USA	Commodities	Coffee farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13646USA	USA	Commodities	Sugarcane and sugar beet farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13647USA	USA	Commodities	All other crop farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	
13648USA	USA	Commodities	Cattle ranching and farming		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.7662	69.37153	0	0	0	12.7662	69.37153	

Quelle: Eora-Datenbank

[illegible]

63

Abbildung 10: Anzahl von Sektoren und spezifische Werte für blauen Wasserverbrauch in Eora

Die Abbildung zeigt die Anzahl von Sektoren und die Anzahl spezifischer (*einmaliger*) Werte für blauen Wasserverbrauch in der *Eora*- (rechts) und *Eora26-Datenbank* (links) für ausgewählte Regionen und für die Version 199.82 für das Referenzjahr 2015. Trotz der hohen sektoralen Auflösung der *Eora*-Datenbank, gibt es für keine Region mehr als zwei spezifische Werte für blauen Wasserverbrauch.

No Sectors	Country	Unique sectors
122	New Zealand	26
86	Japan	25
88	Kazakhstan	25
176	Ukraine	25
182	Uzbekistan	25
6	Argentina	24
9	Australia	24
80	Iran	24
167	Thailand	24
180	USA	24
178	UK	23
22	Bolivia	22
25	Brazil	22
33	Canada	22
38	Chile	22
39	China	22
65	Georgia	22
78	India	22
141	Russia	22
155	South Africa	22
157	Spain	22
89	Kenya	21
109	Mauritius	21
110	Mexico	21
132	Paraguay	21
151	Singapore	21

No Sectors	Country	Unique sectors
178	UK	2
180	USA	2
9	Australia	2
86	Japan	2
122	New Zealand	2
165	Taiwan	1
83	Israel	2
6	Argentina	2
151	Singapore	2
80	Iran	2
182	Uzbekistan	1
184	Venezuela	2
78	India	2
157	Spain	2
155	South Africa	2
181	Uruguay	2
167	Thailand	2
91	Kyrgyzstan	2
25	Brazil	2
110	Mexico	2
75	Hong Kong	1
38	Chile	2
50	Denmark	2
109	Mauritius	2
39	China	2
10	Austria	2

Quelle: Eora-Datenbank

Eora26

In der Eora26-Datenbank sind trotz geringerer Anzahl von Sektoren mehr einmalige Werte für blauen Wasserverbrauch hinterlegt als in der Eora-Datenbank (Abbildung 10). Aber auch hier kommt es zu Auffälligkeiten, die zumindest dem Stand der Literatur widersprechen. So ist bspw. der landwirtschaftliche blaue Wasserverbrauch deutlich höher als der blaue Wasserverbrauch im Bergbau oder durch die Elektrizitätserzeugung. Das ist überraschend, da die Bewässerungsmengen in der Landwirtschaft in Deutschland tendenziell gering sind und Bergbau und Elektrizitätserzeugung als wasserintensive Wirtschaftszweige gelten. Darüber hinaus beträgt der blaue Wasserverbrauch von bspw. *Transport* ca. drei Viertel des blauen Wasserverbrauchs von Bergbau (Abbildung 11). Auch dieser Wert erscheint zweifelhaft.

Ein möglicher Lösungsansatz war es, neue hochaufgelöste Satellitenkonten für den landwirtschaftlichen Wasserverbrauch für die Eora26-Datenbank zu erstellen. Hierfür wurde für alle Regionen in der Eora26-Datenbank die Produktionsmenge von über 150 spezifischen Agrargütern aus der FAOSTAT-Datenbank mit dem Wasserverbrauch der jeweiligen Agrargüter aus Mekonnen und Hoekstra (2011) multipliziert. Die hohe Auflösung der so entwickelten Satellitenkonten für Wasser zeigte jedoch, dass aufgrund der Proportionalitätsannahme in EE-IO mit einer Datenbank mit bspw. nur einem Sektor für Agrarprodukte (wie die Eora26-Datenbank) keine tiefgreifende Analyse von nationalem Wasserverbrauch zielführend durchgeführt werden kann.

Der Grund hierfür ist, dass in EE-IO jeder Sektor ein homogenes Produkt produziert. Das bedeutet auch, dass jeder Sektor, der aus einem anderen Sektor konsumiert, auch dieses homogene Produkt aus dem produzierenden Sektor konsumiert. Wenn z.B. in einem fiktiven Sektor Viehzucht die Produkte Fleisch und Leder produziert werden, dann werden diese beiden Produkte bzw. deren Wert und die mit der Produktion dieser beiden Produkte verbundenen Externalitäten proportional zur Produktionsmenge der beiden Produkte an der Gesamtproduktionsmenge im Sektor an weitere Sektoren, die aus dem Sektor Viehzucht konsumieren, weitergegeben. In der Realität ist der beschriebene Zustand aber nicht der Fall. So würden z.B. die ebenfalls fiktiven Sektoren *Kraftfahrzeuge* und *Fleischwaren* die Produkte Leder oder Fleisch aus dem Sektor Viehzucht beziehen, nicht aber beide Produkte. Die einzige Möglichkeit, dieses Problem der Proportionalitätsannahme zu umgehen bzw. abzumildern, besteht in der Erhöhung der Auflösung der Sektoren, nicht aber in der Erhöhung der Auflösung der Satellitenkonten.

Die Verzerrung durch Proportionalitätsannahme und Auswirkungen auf die Externalitäten die einer Region zugewiesen werden, sollen an einem weiteren quantitativen Beispiel kurz verdeutlicht werden. Gemäß der FAOSTAT-Datenbank (FAO, o.D.) wurden im Jahr 2015 in Äthiopien 457.014 Tonnen Kaffeebohnen und 8.211.424 Tonnen Mais produziert. Also mengenmäßig ca. 18-mal mehr Mais als Kaffeebohnen. Mekonnen und Hoekstra (2011) quantifizieren den durchschnittlichen blauen Wasserverbrauch in Äthiopien für eine Tonne Kaffeebohnen auf $66 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ und den durchschnittlichen blauen Wasserverbrauch in Äthiopien für eine Tonne Mais auf $33 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Angenommen, Mais und Kaffee sind die einzigen beiden Produkte, die im Sektor Landwirtschaft in Äthiopien produziert werden, ergibt sich der gesamte blaue Wasserverbrauch des Sektors aus der Summe des blauen Wasserverbrauchs der Kaffeebohnenproduktion ($30.162.924 \text{ m}^3$) und des blauen Wasserverbrauchs der Maisproduktion ($270.976.992 \text{ m}^3$). Mengenmäßig ist also der Anteil des blauen Wasserverbrauchs für die Maisproduktion am gesamten blauen Wasserverbrauch ca. 9-mal höher als der Anteil des blauen Wasserverbrauchs für die Kaffeebohnenproduktion. Würde jetzt

ein anderer Sektor bspw. für 1.000 Euro aus dem Sektor Landwirtschaft in Äthiopien konsumieren, würde dieser Konsum gemäß der Proportionalitätsannahme zu 18-mal mehr aus Mais bestehen als aus Kaffeebohnen und damit auch zu 9-mal mehr blauen Wasserverbrauch durch Maisproduktion als blauer Wasserverbrauch durch Kaffeebohnenproduktion.

In der Realität werden aber die Produkte eines Sektors jedoch nicht zu gleichen Anteilen exportiert wie produziert. Äthiopien hat 2015 bspw. 234.218 Tonnen Kaffeebohnen mit einem Gesamtwert von 1.018.149.000 USD exportiert und 434 Tonnen Mais mit einem Gesamtwert von 154.000 USD exportiert. Äthiopien exportiert also trotz deutlich geringerer Produktionsmenge einen erheblich höhere Menge Kaffeebohnen als Mais. Dementsprechend ist die Weitergabe von Externalitäten proportional zur Produktionsmenge eine Verzerrung.

Je höher die sektorale Auflösung einer EE-IO-Datenbank, desto geringer ist tendenziell die Verzerrung der Ergebnisse durch die Proportionalitätsannahme. Bspw. umfasst die Exiobase für jede Region 26 einzelne Landwirtschaftssektoren⁴⁰ und verschiedene Indikatoren für blauen Wasserverbrauch.

Abbildung 11: Deutschlands blaue Wasserexporte gemäß Eora26

Dargestellt sind die blauen Wasserexporte gemäß der Eora26 Datenbank (Version 199.82 für das Referenzjahr 2015). Landwirtschaft hat den höchsten Anteil an blauen Wasserexporten gefolgt von petrochemischen und nicht-metallischen Produkten, Elektronik und Maschinen und Bergbau. Die Ergebnisse beruhen auf mutmaßlich fehlerhaften Satellitenkonten.

total_sectoral_exports - DataFrame

Index	Sector	crop production	crop productic	crop productio	t of grazing** (r	imal water sup	industrial produk	industrial produc	footprint (m3/	r footprint (m	footprint (m3/
0	Agriculture	1.44441e+10	1.06169e+08	4.50569e+09	2.51323e+09	3.72641e+08	1.71784e+07	1.95833e+07	1.69573e+10	4.95991e+08	4.52529e+09
14	Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	0	0	0	0	0	1.08157e+08	1.23298e+08	0	1.08157e+08	1.23298e+08
3	Electrical and Machinery	0	0	0	0	0	8.17321e+07	9.31745e+07	0	8.17321e+07	9.31745e+07
11	Mining and Quarrying	0	0	0	0	0	6.95779e+07	7.93184e+07	0	6.95779e+07	7.93184e+07
10	Metal Products	0	0	0	0	0	6.05756e+07	6.90558e+07	0	6.05756e+07	6.90558e+07
22	Transport	0	0	0	0	0	5.2265e+07	5.95817e+07	0	5.2265e+07	5.95817e+07
25	Wood and Paper	0	0	0	0	0	5.21667e+07	5.94699e+07	0	5.21667e+07	5.94699e+07
5	Finacial Intermediation and Business Activities	0	0	0	0	0	4.63908e+07	5.28853e+07	0	4.63908e+07	5.28853e+07
21	Textiles and Wearing Apparel	0	0	0	0	0	4.5803e+07	5.22152e+07	0	4.5803e+07	5.22152e+07
23	Transport Equipment	0	0	0	0	0	3.06122e+07	3.48978e+07	0	3.06122e+07	3.48978e+07

Quelle: Eora-Datenbank

⁴⁰ Reis, Weizen, Getreide (unspezifisch), Wurzeln und Knollen, Zuckerpflanzen, Hülsenfrüchte, Nüsse, Ölsaaten, Gemüse, Früchte, Fasern, Andere Kulturpflanzen, Futterpflanzen, Reis, Weizen, Getreide (unspezifisch), Wurzeln und Knollen, Zuckerpflanzen, Hülsenfrüchte, Nüsse, Ölsaaten, Gemüse, Früchte, Fasern, andere Kulturpflanzen, Futterpflanzen

3.3 Datenübersicht

Die verwendeten Daten und entsprechenden Quellen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Datenübersicht

Tabellarische Übersicht über die verwendeten Daten einschließlich der Quellenangaben.

Datensatz	Beschreibung	Auflösung	Quelle
Wasserdargebot	WaterGAP3 (Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung)	Einzugsgebiete	Alcamo et al. (2003), Döll et al. (2003), Eisner (2016)
Gesamter menschlicher Wasserverbrauch MG	WaterGAP3	Einzugsgebiete	aus der Beek et al. (2010), Eisner (2016), Flörke et al. (2013)
Anthropogener Wassergrundbedarf (MGB)	Der von der WHO-definierte tägliche pro-Kopf-Bedarf (100 Liter)	Kein Raumbezug; Jahr 2020	Howard und Bartram (2003)
Bevölkerung	Rasterdaten zur Weltbevölkerung	Raster 0,5°-0,5° Jahr 2020	CIESIN (2018)
Umweltbedingte Wasserflussanforderungen (EFR)	Anteil des mittleren Monatsdurchflusses eines Einzugsgebiets, der für Ökosysteme zurückzuhalten ist	Raster 0,5°-0,5° Jahresdurchschnitt 1961-2000	Pastor et al. (2014)
Konsuminduzierter Wasserverbrauch	Exiobase 3.8.1 für das Jahr 2021; Blau- und Grünwasser: Native Satellitenkonten der Exiobase 3.8.1; Grauwasser (nur Landwirtschaft): Erstellt basierend auf (FAO, o.D.) und Mekonnen und Hoekstra (2011)	9.600 Sektoren in 48 Regionen; Jahre 1990 bis 2022	Stadler et al. (2018)

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden im ersten Unterkapitel die Belastbarkeitsgrenzen und die aus der Inanspruchnahme der Belastbarkeitsgrenzen abgeleiteten Charakterisierungsfaktoren vorgestellt (Abschnitt 4.1). Im nachfolgenden Unterkapitel werden dann die Ergebnisse zum angenäherten konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland ausgeführt. Dies schließt auch die Detailanalysen wie bspw. sektorale Beiträge, Wertschöpfungsketten und die Allokation des blauen Wasserverbrauchs auf die Einzugsgebiete weltweit mit ein (Abschnitt 4.2.4). Abschließend wird dann der durch Konsum im Ausland induzierte Wasserverbrauch in Deutschland aufgeführt (Abschnitt 4.2.6). Teilweise werden einzelne Aspekte der Ergebnisse in diesem Kapitel auch bereits diskutiert.

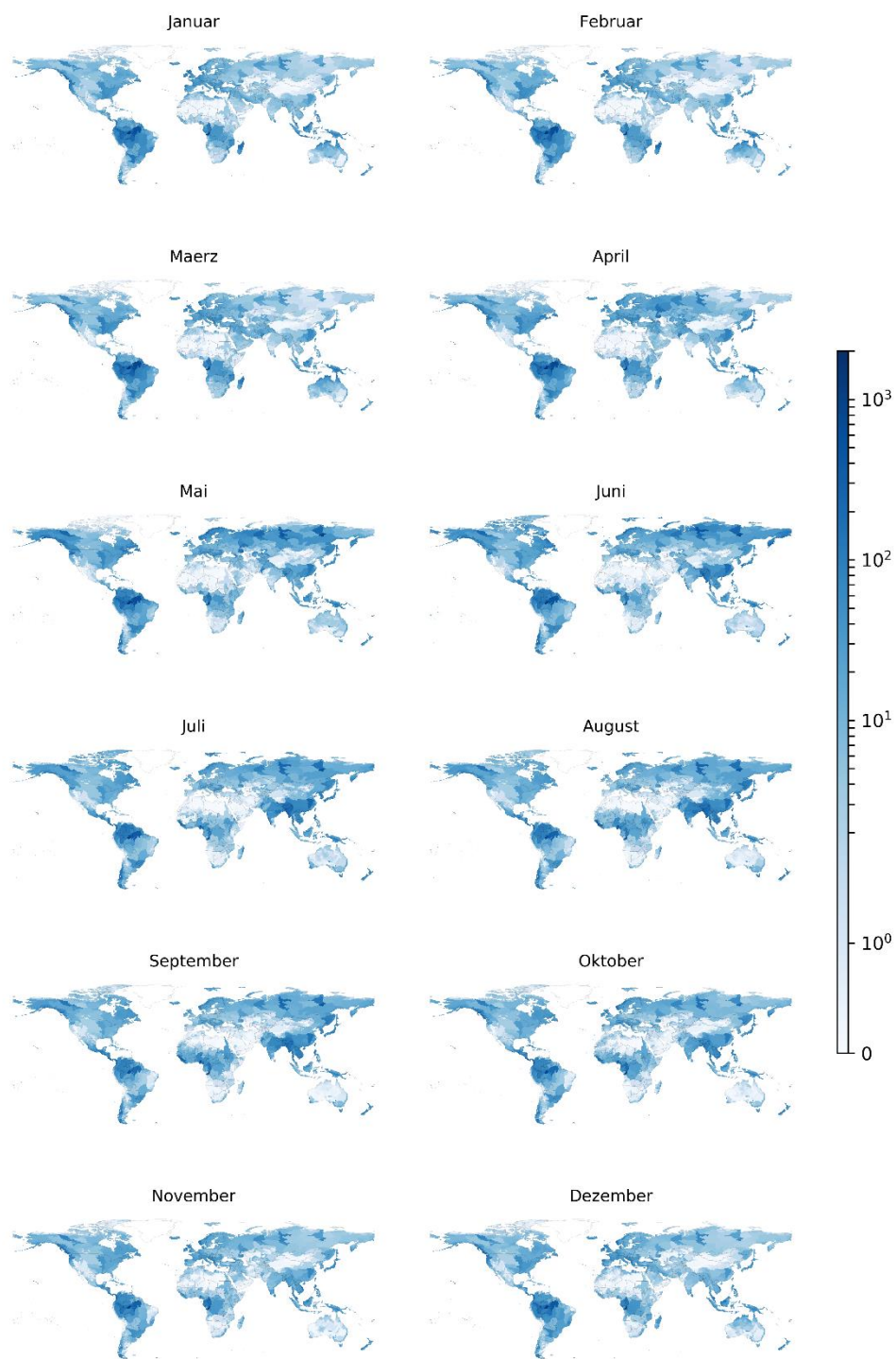
4.1 Charakterisierungsfaktoren

4.1.1 Belastbarkeitsgrenzen

Die Belastbarkeitsgrenzen der Einzugsgebiete sind in Abbildung 12 dargestellt. Sie ergeben sich aus dem Wasserdargebot abzüglich der umweltbedingten Wasserflussanforderungen. Da die umweltbedingten Wasserflussanforderungen (30 bis 60%) vom Wasserdargebot subtrahiert werden, sind die Belastbarkeitsgrenzen der Einzugsgebiete (max. ca. 2.000 mm) niedriger als das Wasserdargebot (max. ca. 3.000 mm).

Abbildung 12: Belastbarkeitsgrenzen

Die Belastbarkeitsgrenzen ergeben sich aus dem Wasserdargebot abzgl. der umweltbedingten Wasserflussanforderungen in Millimeter.



Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Belastbarkeitsgrenzen.pdf*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

4.1.2 Wasserknappheit-Hotspots

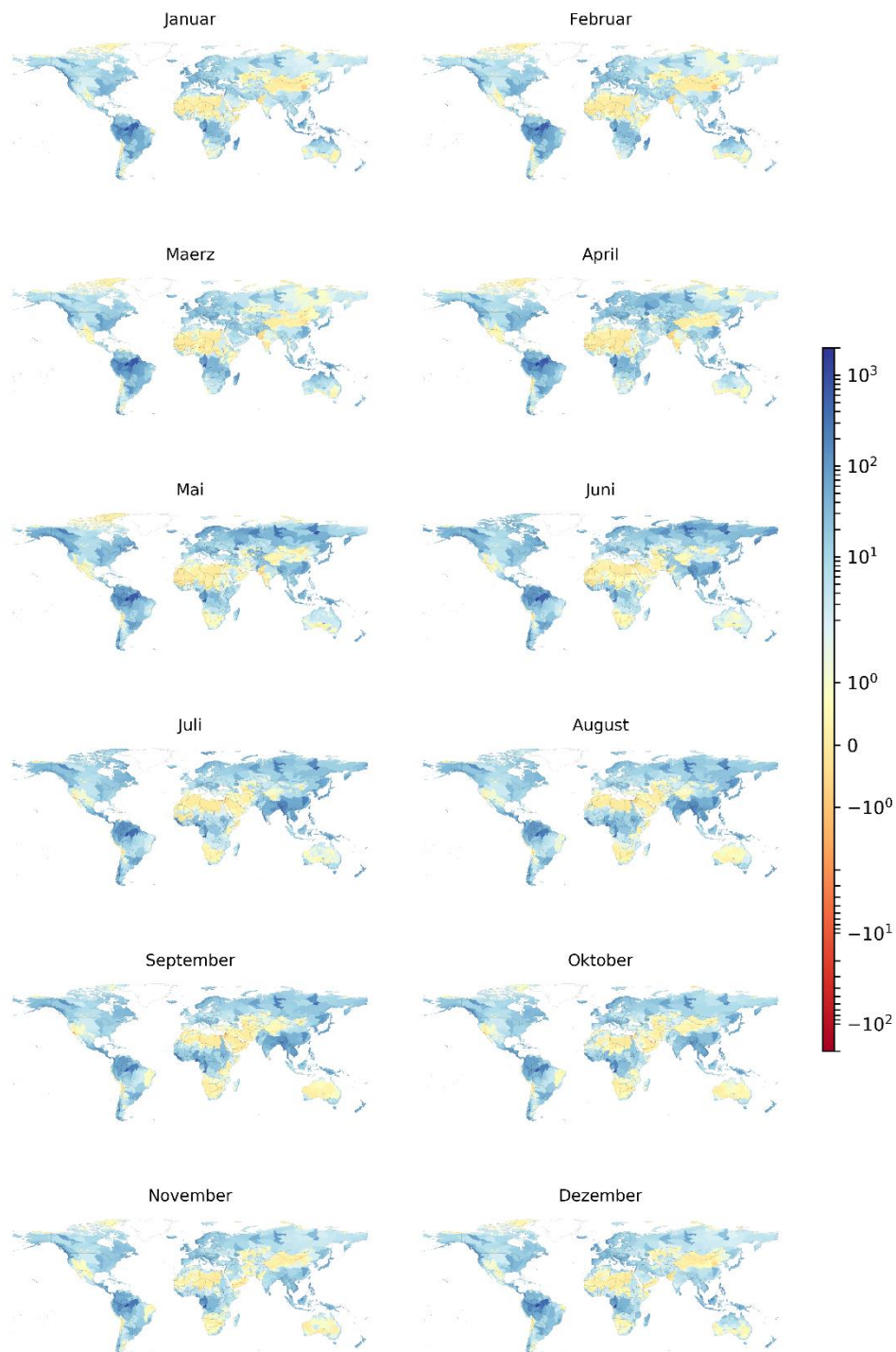
Wasserknappheit-Hotspots ergeben sich aus der Differenz zwischen Belastbarkeitsgrenze und Wasserverbrauch. Es wird hierbei zwischen durch den menschlichen Wassergrundbedarf (Abbildung 13) und den menschlichen Gesamtwasserverbrauch (Abbildung 14) verursachten Wasserknappheit-Hotspots differenziert.

Aus Abbildung 13 wird deutlich, dass die Befriedigung des menschlichen Wassergrundbedarfs weltweit in den meisten Einzugsgebieten keine Wasserknappheit-Hotspots verursacht. Da der menschliche Gesamtwasserverbrauch aber deutlich höher ist als der menschliche Wassergrundbedarf, wird durch den menschlichen Gesamtwasserverbrauch auch in mehr Einzugsgebieten die lokale Belastbarkeitsgrenze überschritten (Abbildung 14). Gebiete, in denen dies der Fall ist, umfassen unter anderem:

- ▶ In Nordamerika große Teile der USA, beginnend im mittleren Westen bis an die Westküste. Hier insbesondere die küstennahen Regionen einschließlich des Ballungsraums Los Angeles. Darüber hinaus der Norden von- und westliche Teile von Mexiko.
- ▶ In Südamerika insbesondere ein schmaler Streifen entlang der Westküste auf Höhe von Ecuador über Peru bis nach Chile. Saisonal aber auch östliche Gebiete Brasiliens einschließlich des Großraums São Paulo und Rio de Janeiro.
- ▶ In Europa in den Sommermonaten große Teile von Südeuropa einschließlich Spanien, Portugal, Frankreich, Italien, Griechenland, die Länder des Balkans und die Türkei. Teilweise auch nördlicher gelegene Regionen wie Teile Dänemarks, der Ukraine oder Weißrusslands.
- ▶ In Afrika die küstennahen Gebiete nördlich der Sahara (insbesondere Libyen und Ägypten). Außerdem Teile Westafrikas, Südafrikas und Ostafrikas. Tendenziell küstennahe Gebiete und weniger die Gebiete im Landesinneren des Kontinents.
- ▶ Große Teile Westafrikas z.B. Mauretanien, Senegal, Mali, Burkina Faso, Niger, Nigeria, Chad, aber auch Ballungszentren wie bspw. Accra in Ghana.
- ▶ Der subsaharische Teil Afrikas eher vereinzelt wie bspw. in Somalia oder Angola.
- ▶ In Westasien große Teile der arabischen Halbinsel, der Türkei, des Libanons, Israels, Jordaniens, Syriens, Iraks und des Iran.
- ▶ In Zentralasien Gebiete östlich des Kaspischen Meers in der Grenzregion von Turkmenistan und Usbekistan.
- ▶ In Ostasien Gebiete in Ostchina in etwa auf der Höhe von Beijing und insbesondere der Ballungsraum Beijing-Tianjin.
- ▶ In Südasien Afghanistan, Pakistan und Indien. Insbesondere die pakistanisch-indische Grenzregion.
- ▶ In Südostasien Gebiete Thailands und die Küstengebiete Vietnams.
- ▶ In Australien die tendenziell mehr bevölkerten Gebiete in der Osthälfte des Kontinents, insbesondere der Südosten.

Abbildung 13: Die Belastbarkeitsgrenzen abzgl. des menschlichen Wassergrundbedarfs

Die Abbildung zeigt die Belastbarkeitsgrenzen abzüglich des menschlichen Wassergrundbedarfs von 100 Litern·Person⁻¹·Tag⁻¹. Die Hotspots sind isoliert im externen Anhang *Karte-CF-Belastbarkeitsgrenze-100-Hotspots.pdf* abgebildet.

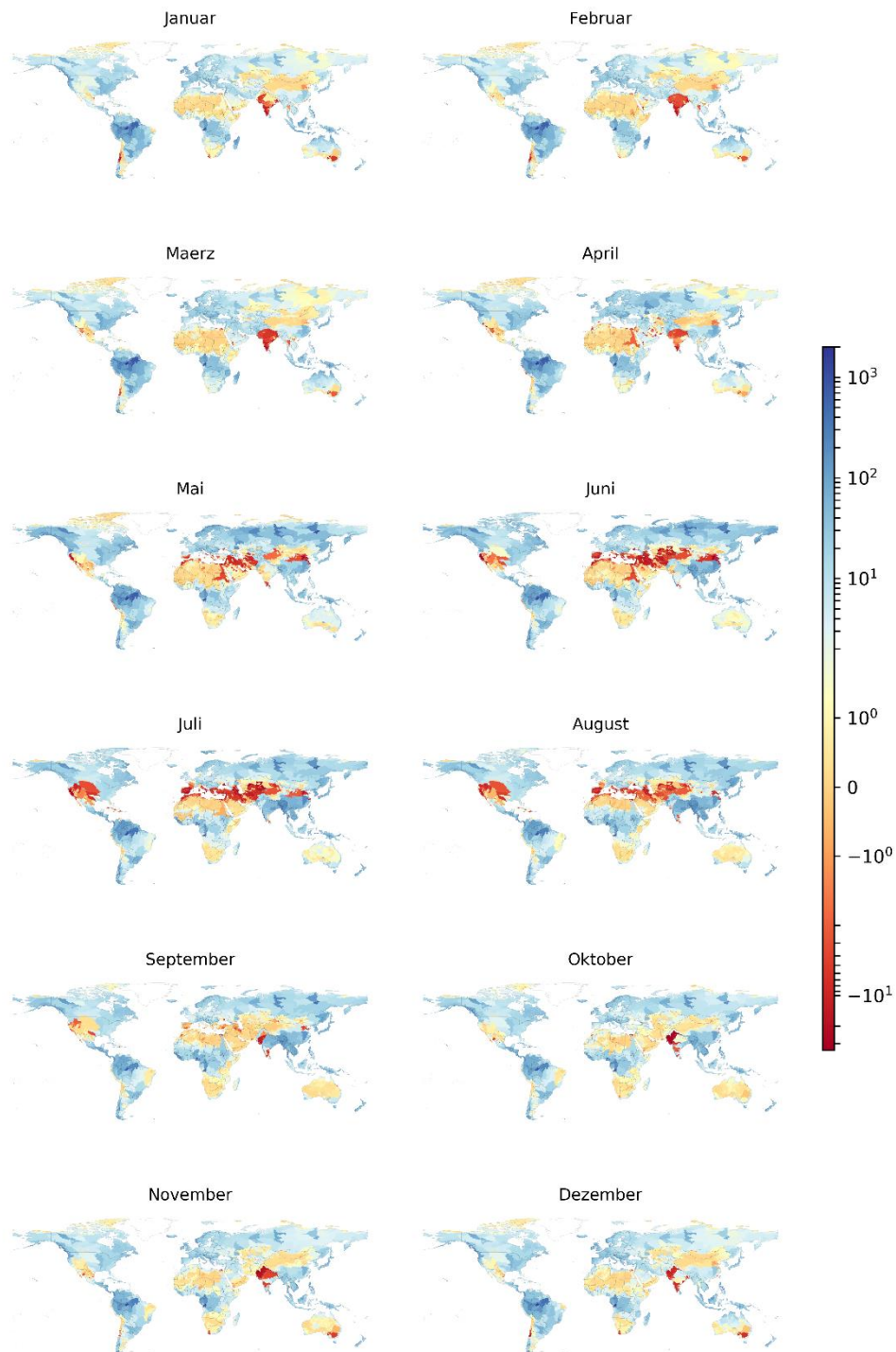


Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Belastbarkeitsgrenze-100.pdf*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

Abbildung 14: Die Belastbarkeitsgrenzen abzgl. des menschlichen Gesamtwasserverbrauchs

Die Abbildung zeigt die Belastbarkeitsgrenzen abzüglich des menschlichen Gesamtwasserverbrauchs. Die Hotspots sind isoliert im externen Anhang *Karte-CF-Belastbarkeitsgrenze-100-MGV-Hotspots.pdf* abgebildet.



Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Belastbarkeitsgrenze-100-MGV.pdf*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

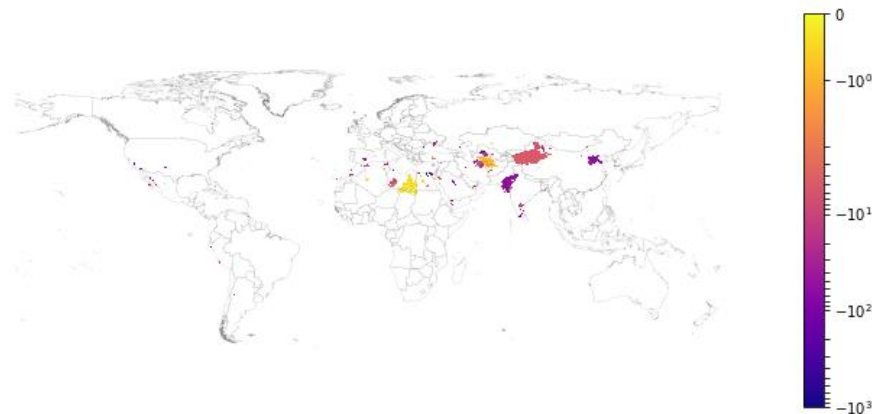
Abbildung 15 zeigt die Wasserdefizite in den Einzugsgebieten pro Jahr. Also Einzugsgebiete, in denen die Summe des gesamten menschlichen Wasserverbrauchs pro Monat die Summe der

monatlichen Belastbarkeitsgrenzen übersteigt. Gebiete, in denen dies der Fall ist, umfassen unter anderem:

- ▶ In Australien die tendenziell mehr bevölkerten Gebiete in der Osthälfte des Kontinents, insbesondere der Südosten.
- ▶ Einzelne Gebiete entlang der Westküste Nordamerikas (USA und Mexiko) und Südamerikas
- ▶ Teile Nordafrikas, insbesondere östliche Regionen
- ▶ Große Flächen in Zentralasien östlich des Kaspischen Meers.
- ▶ In Südasien große Gebiete entlang der indisch-pakistanischen Grenze.
- ▶ In Ostasien der Ballungsraum um Peking herum und die nordöstlichen Gebiete Chinas.

Abbildung 15: Jährliche Wasserdefizite

Die Abbildung zeigt Einzugsgebiete in denen der jährliche anthropogene Gesamtwasserverbrauch die monatlichen Belastbarkeitsgrenzen übersteigt.



Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Wasserdefizite.pdf*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

Es wird also deutlich, dass gemäß der verwendeten Daten aus WaterGAP3 und von Pastor et al. (2014) weltweit viele Regionen zumindest temporär von starker Übernutzung der lokalen Belastbarkeitsgrenzen betroffen sind. Haupttreiber für die Übernutzung ist nicht der menschliche Wassergrundbedarf, sondern der gesamte menschliche Wasserverbrauch, der sich auch aus bspw. landwirtschaftlichen und industriellen Wasserverbrauch ergibt. Häufig wird ein Großteil der so erzeugten Güter jedoch nicht in der Herstellungsregion konsumiert, sondern in anderen Regionen auch im Ausland, wozu auch Deutschland gehören kann. Daher soll in Abschnitt 4.2 die Frage des Anteils von Deutschland an der weltweiten Übernutzung lokaler Belastbarkeitsgrenzen aufgegriffen werden. Zuvor werden im nachfolgenden Abschnitt aber die aus den lokalen Belastbarkeitsgrenzen und dem menschlichen Gesamtwasserverbrauch resultierenden Charakterisierungsfaktoren abgebildet.

4.1.3 Charakterisierungsfaktoren

Die jährlichen Charakterisierungsfaktoren der Einzugsgebiete, Regionen und Nationen sind in Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt. Zusätzlich zeigt Abbildung 16 die monatlichen Charakterisierungsfaktoren der Einzugsgebiete.

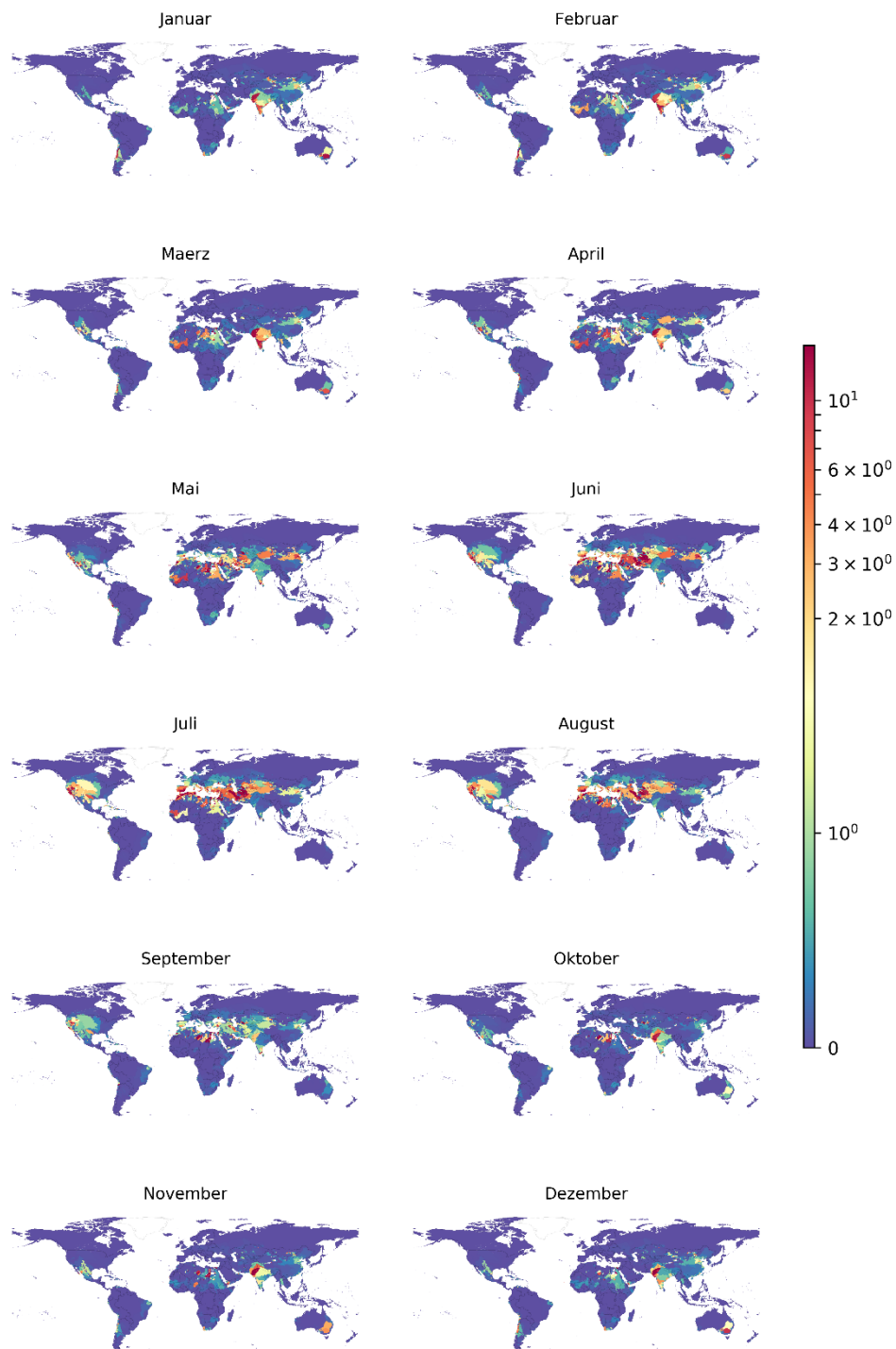
Da sich die Charakterisierungsfaktoren aus dem Quotienten vom menschlichen Gesamtwasserverbrauch und der lokalen Belastbarkeitsgrenze ergeben (siehe Abschnitt 3.1.5), bedeutet ein Charakterisierungsfaktor >1 eine Überschreitung der lokalen Belastbarkeitsgrenze um den Faktor x . Über alle Monate hinweg beträgt die Maximalausprägung der Charakterisierungsfaktoren aller Einzugsgebiete weltweit zwischen 1.385 (November) und ca. 3.100 (September). Das arithmetische Mittel der Charakterisierungsfaktoren beträgt mindestens ca. 2,5 (November) und höchstens ca. 12 (September). Das 75-%-Quantil liegt bei mindestens ca. 0,03 (November, Dezember) und bei höchstens ca. 0,1 (August). Es gibt also einige wenige Einzugsgebiete, die von extremer Übernutzung der Belastbarkeitsgrenzen betroffen sind und viele Einzugsgebiete, in denen die Belastbarkeitsgrenzen nicht überschritten werden. Da es im verwendeten Datensatz auch einige wenige Einzugsgebiete gibt, in denen Wasserverbrauch verordnet wurde, aber nahezu kein Wasser verfügbar ist, kommt es zu extremen Ausreißern. Um dieser datenbedingten Verzerrung entgegenzuwirken, empfiehlt es sich, je nach Anwendungsfall bspw. das 99-%-Quantil der Charakterisierungsfaktoren als Maximalwert zu verwenden.

Je geringer die räumliche Auflösung der Charakterisierungsfaktoren ist, desto geringer sind die Maximalausprägungen der Charakterisierungsfaktoren. Der Grund für diese Beobachtung ist, dass bei der Aggregation der Charakterisierungsfaktoren auf regionale oder nationale Ebene hohe Charakterisierungsfaktoren durch die überwiegend vorkommenden niedrigen Charakterisierungsfaktoren ausgeglichen werden.

Zu den Charakterisierungsfaktoren ist außerdem anzumerken, dass sie auf einer rein quantitativen Analyse hydrologischer Daten beruhen. Sozioökonomische Parameter, welche die Belastbarkeitsgrenzen (Resilienz lokaler Ökosysteme und der lokalen Bevölkerung) ebenfalls beeinflussen können, wurden nicht berücksichtigt.

Abbildung 16: Charakterisierungsfaktoren - Einzugsgebiete (je Monat)

Die Abbildung zeigt die monatlichen Charakterisierungsfaktoren. Das Maximum der Farbskala ist 15. Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Charakterisierungsfaktoren3000.pdf* für ein anderes Maximum.

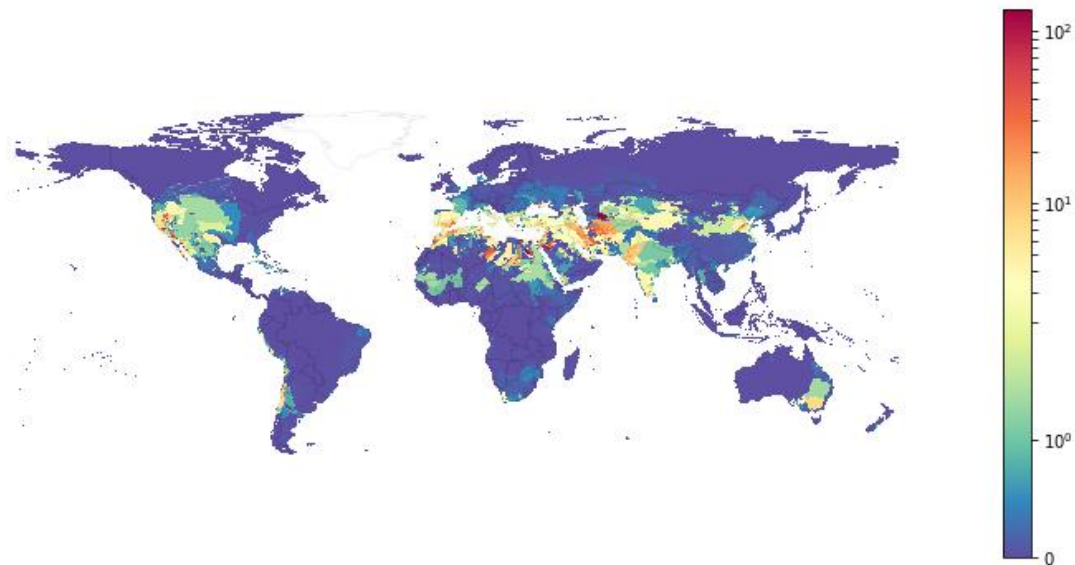


Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Charakterisierungsfaktoren15.pdf* und *Charakterisierungsfaktoren/UBA_FKZ3719312010_Wasserfußabdruck_Charakterisierungsfaktoren.xlsx*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

Abbildung 17: Charakterisierungsfaktoren – Einzugsgebiete (Jahr)

Die Abbildung zeigt die jährlichen Charakterisierungsfaktoren für 8.250 Einzugsgebiete.

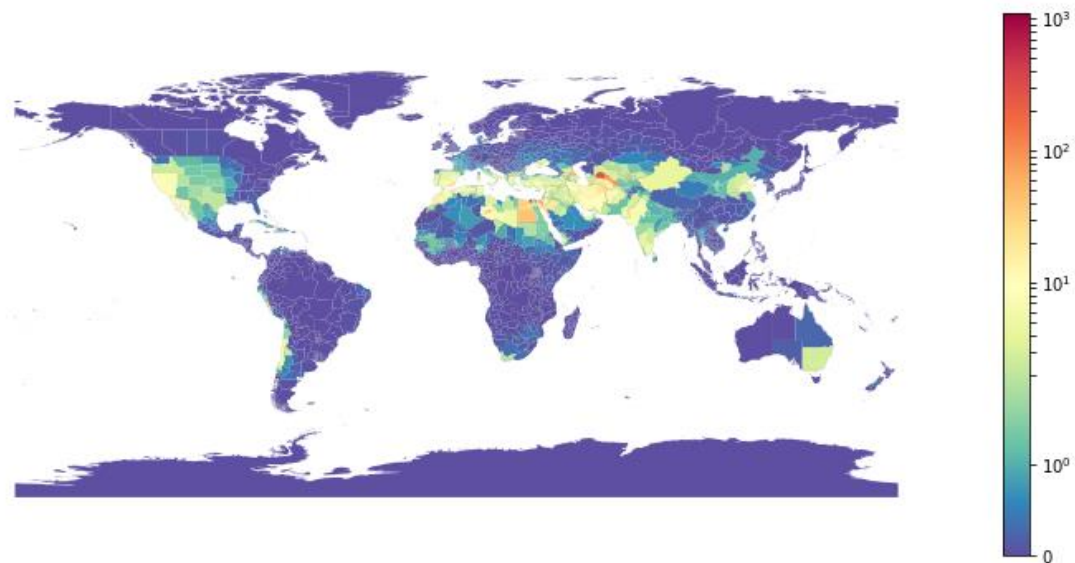


Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Charakterisierungsfaktoren-Jahr.pdf* und *Charakterisierungsfaktoren/UBA_FKZ3719312010_Wasserfußabdruck_Charakterisierungsfaktoren.xlsx*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

Abbildung 18: Charakterisierungsfaktoren – Regional (Jahr)

Die Abbildung zeigt jährlichen regionalen Charakterisierungsfaktoren (also bspw. für Deutschland auf Ebene der Bundesländer). Die externen Anhänge *Karte-CF-Charakterisierungsfaktoren-Regional-3000.pdf* und *Karte-CF-Charakterisierungsfaktoren-Regional-15.pdf* zeigen die jährlichen regionalen Charakterisierungsfaktoren mit verschiedenen Skalenausprägungen.

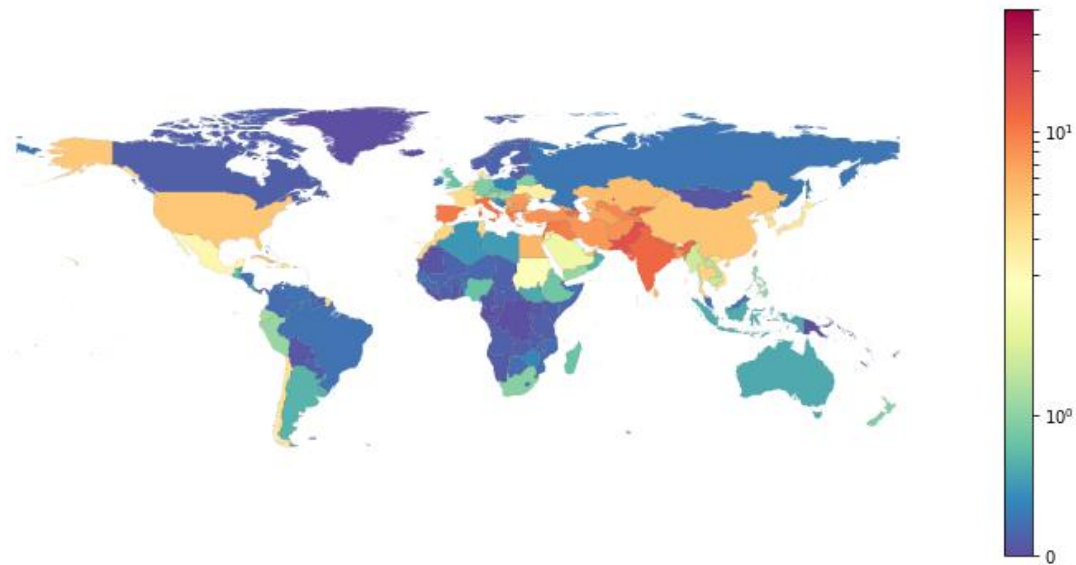


Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Charakterisierungsfaktoren-Regional-Jahr.pdf* und *Charakterisierungsfaktoren/UBA_FKZ3719312010_Wasserfußabdruck_Charakterisierungsfaktoren.xlsx*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

Abbildung 19: Charakterisierungsfaktoren – National (Jahr)

Die Abbildung zeigt jährlichen regionalen Charakterisierungsfaktoren. Die externen Anhänge *Karte-CF-Charakterisierungsfaktoren-National-3000.pdf* und *Karte-CF-Charakterisierungsfaktoren-National-15.pdf* zeigen die jährlichen regionalen Charakterisierungsfaktoren mit verschiedenen Skalenausprägungen.



Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-CF-Charakterisierungsfaktoren-National-Jahr.pdf* und *Charakterisierungsfaktoren/UBA_FKZ3719312010_Wasserfußabdruck_Charakterisierungsfaktoren.xlsx*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

4.2 Konsuminduzierter Wasserverbrauch Deutschlands (Wasserfußabdruck-Sachbilanz)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse verschiedener EE-IO-Analyse-basierter Ansätze zur näheren Untersuchung des Wasserverbrauchs von Deutschland zusammengefasst.

Demnach summiert sich der gesamte konsuminduzierte Wasserverbrauch von Deutschland für das Jahr 2021 auf 219 Mrd. m³ pro Jahr. Diese Menge entspricht in etwa einem täglichen Pro-Kopf-Verbrauch von 7,2 m³. Die Herkunftsregion des verbrauchten Wassers ist zu 14% Deutschland (Wasserverbrauch im Inland) und zu 86% das Ausland (Wasserverbrauch im Ausland; Tabelle 2). Der Wasserverbrauch von Deutschland im Inland setzt sich zu 75% aus grünem Wasser, zu 21% aus grauem Wasser und zu 4% aus blauem Wasser zusammen. Der Wasserverbrauch von Deutschland im Ausland setzt sich zu 83% aus grünem Wasser, zu 6% aus grauem Wasser und zu 11% aus blauem Wasser zusammen (Abbildung 20).

Der geringere Anteil des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland im Inland, insbesondere in Hinsicht auf blaues Wasser, wirft die Frage nach der Herkunft des verbrauchten Wassers auf. In anderen Worten: *Aus welchen Regionen konsumiert Deutschland in Konsumgüter eingebettetes Wasser*⁴¹?

Die Ergebnisse beruhen auf Modellen und sind lediglich als Annäherung zu verstehen. Es handelt sich hierbei um den Wasserverbrauch, der weltweit durch Konsum in Deutschland verursacht wird. Der Wasserverbrauch in Deutschland selber, der durch Konsum in anderen Ländern verursacht wird, ist in Abschnitt 4.2.6 zusammengefasst.

Die grünen und grauen Wasserverbräuche sind in der Exiobase-Datenbank als Indikatoren hinterlegt und werden daher in diesem Abschnitt und im nachfolgenden Abschnitt zu der regionalen Herkunft der Beiträge zu Deutschlands konsuminduzierten Wasserverbrauch mitberichtet. Eine Erfassung des grünen Wasserverbrauchs in der nationalen Berichterstattung wird jedoch aufgrund der geringen ökologischen Aussagekraft nicht oder nur bedingt empfohlen (siehe Abschnitt 5). Daher ist der Analyseschwerpunkt in den folgenden Unterkapiteln Deutschlands konsuminduzierter blauer Wasserverbrauch. Es ist darüber hinaus anzumerken, dass als Leitindikator zur Erfassung des nationalen Ressourcenverbrauchs nicht der volumetrische Wasserverbrauch vorgeschlagen wird, sondern ein charakterisiertes wirkungsorientiertes Ergebnis (siehe Abschnitt 5). Der wirkungsorientierte Wasserverbrauch von Deutschland wird in Abschnitt 4.2.4.2 berichtet.

Tabelle 2: Der konsuminduzierte Wasserverbrauch von Deutschland

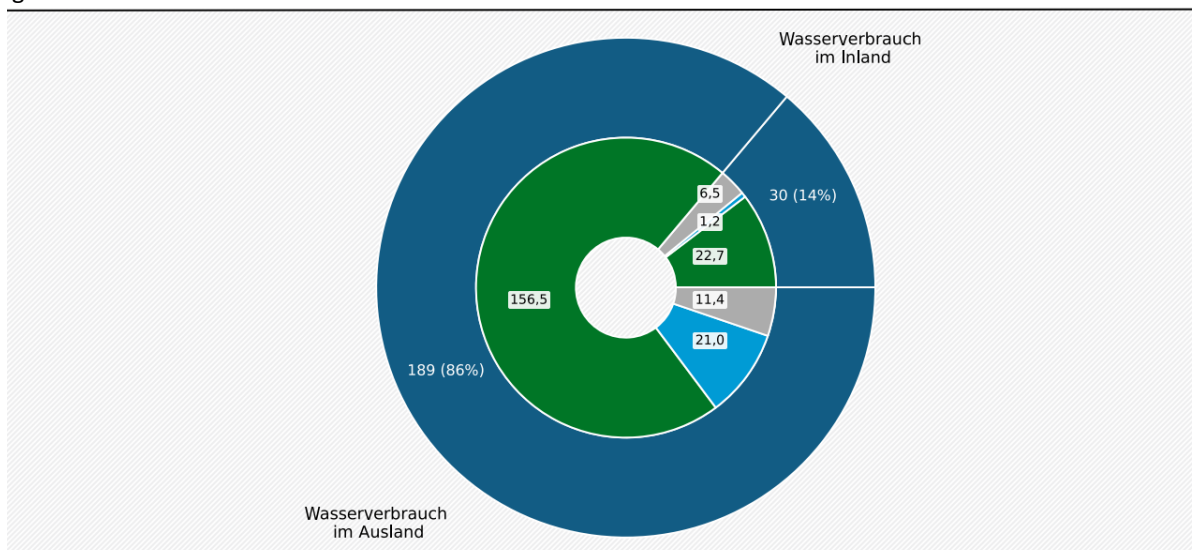
Der Wasserverbrauch von Deutschland differenziert nach blauem, grauem und grünem Wasser. Der tägliche Pro-Kopf-Wasserverbrauch wurde unter der Annahme einer Bevölkerung von 83.000.000 Menschen berechnet.). Siehe auch Zusatzmaterial *Wasser-Fußabdruck-Deutschland - Exiobase 3.8.1/Exiobase_v3.8.1_Endnachfrage_Deutschland_2021.xlsx*.

Einheit	Grün	Blau	Grau	Gesamt
Mrd ³ pro Jahr	179	22	18	219
%	81,7	10,1	8,2	100
Pro-Kopf-Wasserverbrauch in m ³ pro Tag	5,9	0,7	0,6	7,2

⁴¹ Das Konzept von *eingebettetem Wasser* wurde von Allan (2003, 1998, 1996) begründet und findet heute in der Regel unter dem Begriff *virtuelles Wasser* Verwendung. Es handelt sich dabei um Wasser, das eingearbeitet in Güter gehandelt wird.

Abbildung 20: Der konsuminduzierte Wasserverbrauch von Deutschland (Inland und Ausland)

Der Wasserverbrauch von Deutschland im Inland und im Ausland differenziert nach blauem, grauem und grünem Wasser in Mrd. m³. Siehe auch Tabelle 2.



Quelle: Exiobase-Datenbank

4.2.1 Regionale Herkunft der Beiträge zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland

Die Regionen mit den *höchsten Gesamtbeiträgen* (blaues, graues und grünes Wasser) zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland sind in Abbildung 21 dargestellt. Der höchste Beitrag wird durch Deutschland selber (30.365 Mio. m³) bereitgestellt, gefolgt von den Regionen Afrika (29.758 Mio. m³), Asien und Pazifik (28.417 Mio. m³), USA (13.507 Mio. m³), Europa (13.286 Mio. m³), Amerika (12.535 Mio. m³), Spanien (10.184 Mio. m³), China (9.270 Mio. m³), Indien (8.001 Mio. m³) und Polen (7.424 Mio. m³).

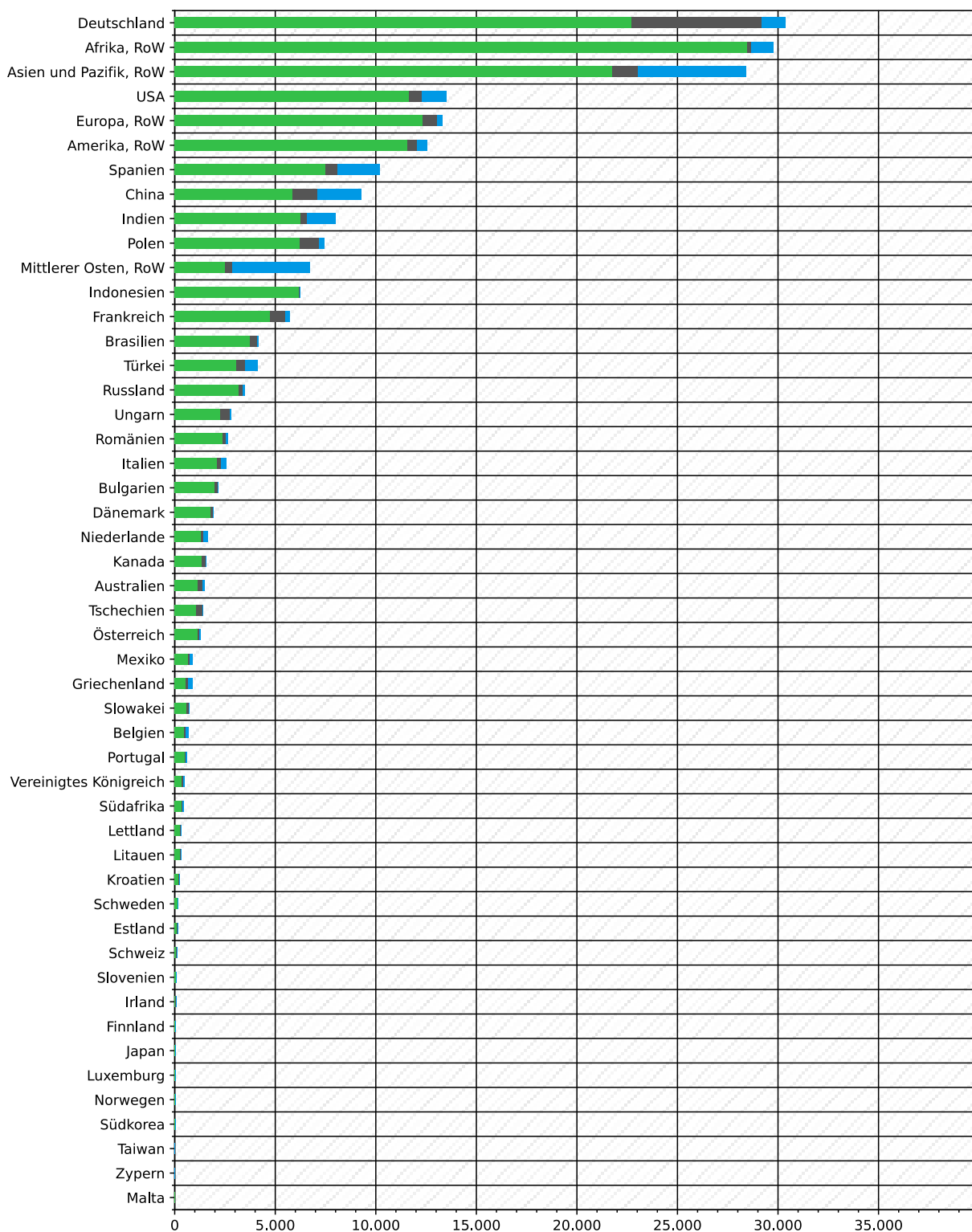
Die Regionen mit den höchsten Beiträgen zum *blauen* Wasserverbrauch von Deutschland sind in Abbildung 22 dargestellt. Der höchste Beitrag wird durch die Region Asien und Pazifik (5.394 Mio. m³) bereitgestellt, gefolgt von den Regionen Mittlerer Osten (3.822 Mio. m³), China (2.189 Mio. m³), Spanien (2.097 Mio. m³), Indien (1.414 Mio. m³), USA (1.203 Mio. m³), Deutschland (1.166 Mio. m³), Afrika (1.079 Mio. m³) und der Türkei (624 Mio. m³).

Die Regionen mit den höchsten Beiträgen zum *grauen* Wasserverbrauch von Deutschland sind Deutschland selber (6.598 Mio. m³), gefolgt von den Regionen Asien und Pazifik (1297.7 Mio. m³), China (1.204 Mio. m³), Polen (960 Mio. m³), Frankreich (719 Mio. m³), Europa (681 Mio. m³), USA (656 Mio. m³), Spanien (572 Mio. m³) und Ungarn (499 Mio. m³). Da für graues Wasser nur Satellitenkonten für Nutzpflanzen erstellt wurden, sind die Ergebnisse vor diesem Hintergrund zu betrachten (siehe Abschnitt 3.2.1).

Da eine Erfassung des grünen und grauen Wasserverbrauchs aufgrund der wissenschaftlichen Unschärfe und damit einhergehenden geringen Aussagekraft (grauges Wasser) bzw. aufgrund der geringeren ökologischen Bedeutung (grünes Wasser) nicht vorgeschlagen wird, sollen diese nicht im Detail analysiert werden (siehe Abschnitt 5). Die nachfolgenden Analysen haben daher den blauen Wasserverbrauch als Fokus.

Abbildung 21: Regionale Beiträge zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland

Die Abbildung zeigt die Beiträge einzelner Regionen zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland in Mio. m³, differenziert nach grünem, blauem und grauem Wasserverbrauch. Siehe auch Tabelle 5. RoW = Verbleibende Weltregionen.

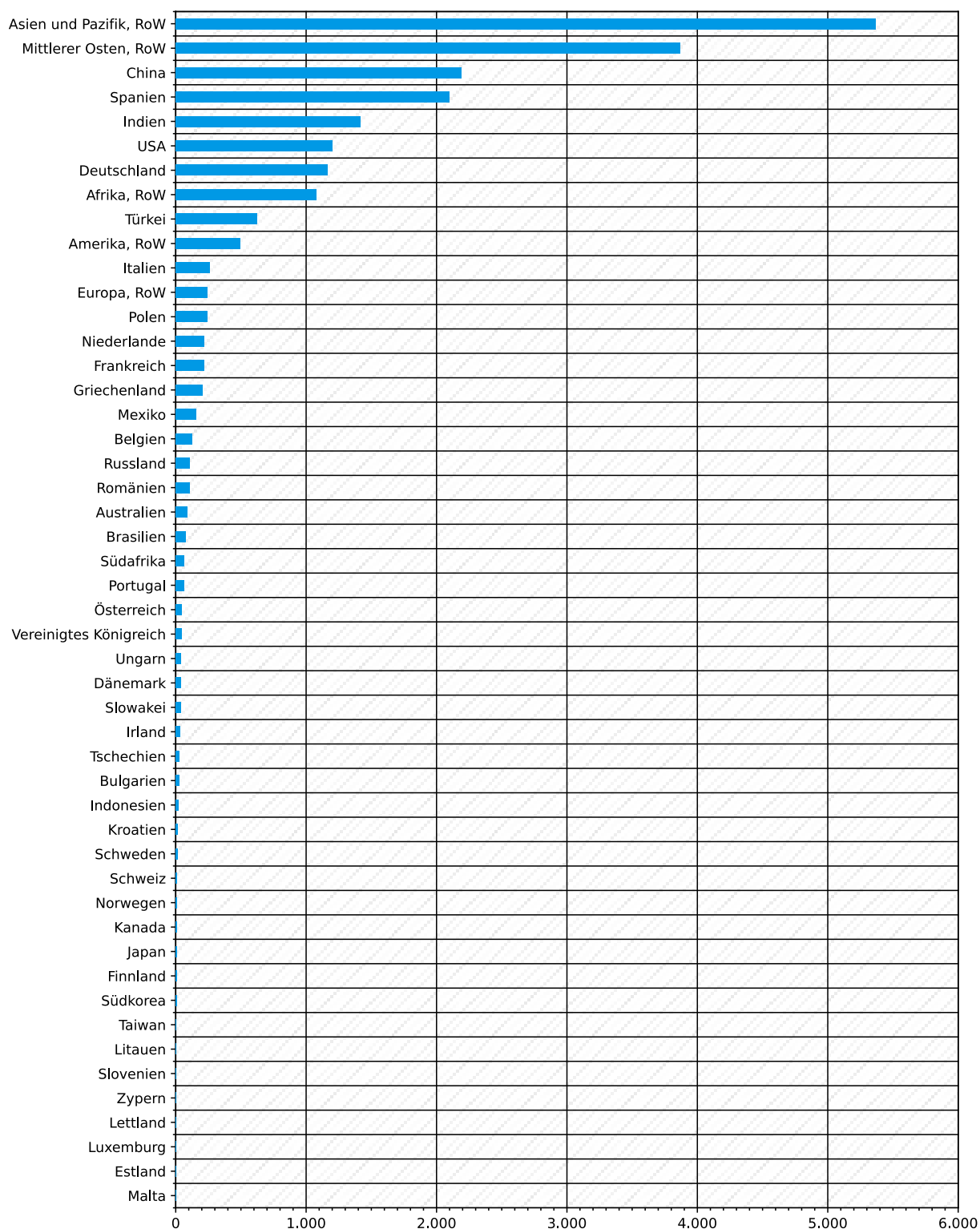


Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-WF-Regionen-Produktionsbasiert.xlsx*

Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 22: Regionale Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland

Die Abbildung zeigt die Beiträge einzelner Regionen zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland in Mio. m³. Siehe auch Tabelle 5. RoW = Verbleibende Weltregionen.



Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-WF-Regionen-Produktionsbasiert.xlsx*

Quelle: Exiobase-Datenbank

4.2.2 Produktionsperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland

In der nachfolgenden Analyse ist der Untersuchungsfokus gänzlich auf den blauen Wasserverbrauch von Deutschland gerichtet. Zunächst werden die Beiträge der 200 Sektoren pro Region⁴² zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch dargestellt -zuerst nach Sektor aggregiert (Abschnitt 4.2.2.1) und anschließend disaggregiert und einschließlich der Herkunftsregion (Abschnitt 4.2.2.2). Es handelt sich also um die direkten und indirekten Beiträge eines Sektors ohne Wertschöpfungskettenschritte.

Produktionsperspektive versus Konsumperspektive

- **Produktionsperspektive (Abschnitt 4.2.2):** Der Wasserverbrauch wird dem Sektor und seiner Region zugeordnet, in dem das Wasser direkt verbraucht wird.
- **Konsumperspektive (Abschnitt 4.2.3):** Der Wasserverbrauch wird dem Sektor und seiner Region zugeordnet, welcher den letzten Wertschöpfungskettenabschnitt vor dem finalen Konsum darstellt.

4.2.2.1 Produktionsperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (aggregiert)

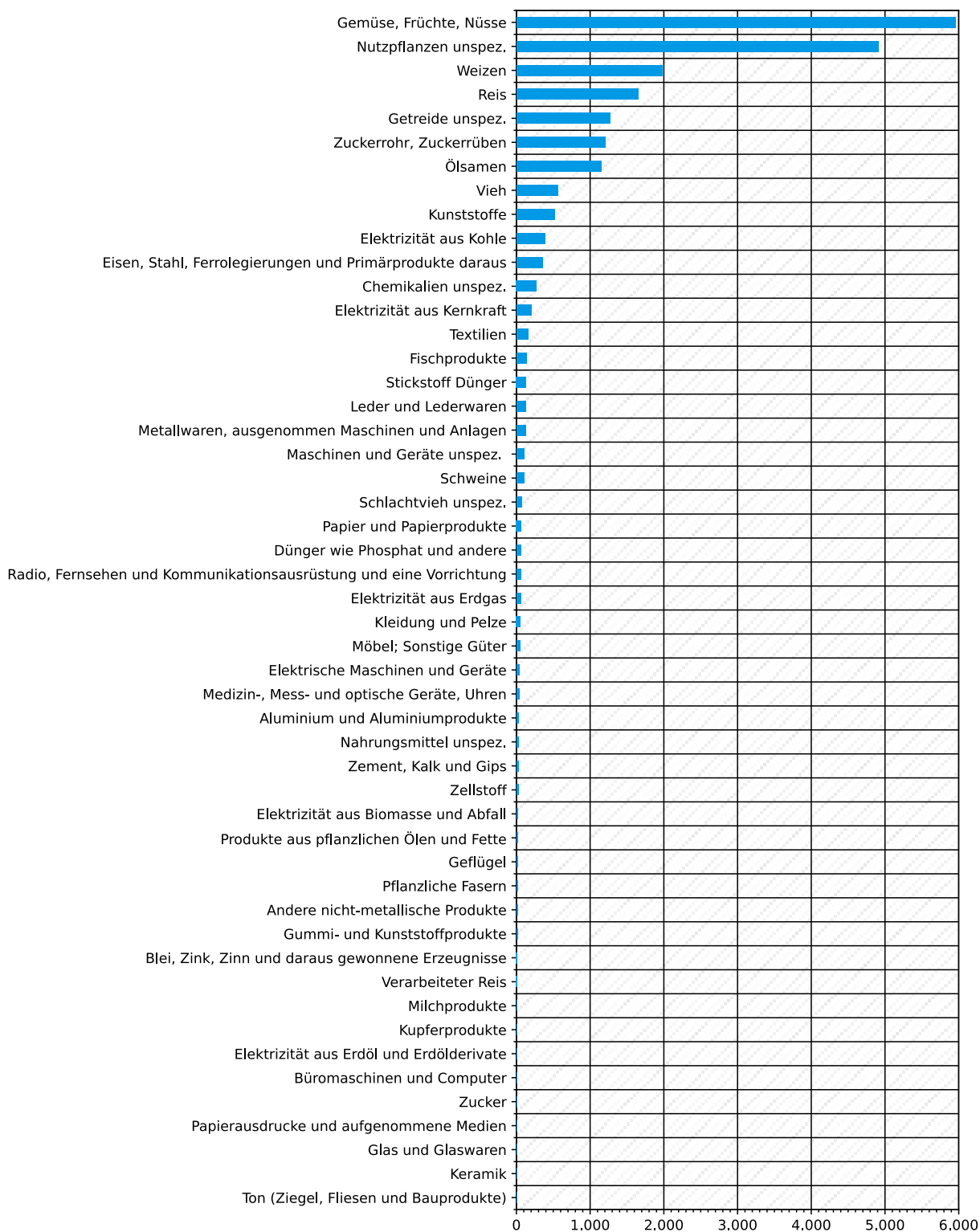
Die zehn höchsten Beiträge zum blauen konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland werden durch die Sektoren Gemüse, Früchte, Nüsse (5.960 Mio. m³), Nutzpflanzen unspezifisch (4.909 Mio. m³), Weizen (1.980 Mio. m³), Reis (1.651 Mio. m³), Getreide unspezifisch (1.270 Mio. m³), Zuckerrohr/Zuckerrüben (1.207 Mio. m³), Ölsamen (1.152 Mio. m³), Vieh (563 Mio. m³), Kunststoffe (521 Mio. m³) und Eisen, Stahl, Ferrolegerungen und Primärprodukte daraus (353 Mio. m³) beigetragen (Abbildung 23).

Bei den ersten acht der zehn Sektoren mit den höchsten Beiträgen zum blauen Wasserverbrauch von Deutschland handelt es sich um direkte Erzeugnisse aus landwirtschaftlicher Produktion. Erst danach folgen mit deutlich geringeren Beiträgen Sektoren, die in keinem Bezug zum Sektor Landwirtschaft stehen.

⁴² Also $49 \times 200 = 9800$ Sektoren; Die Aufteilung der Sektoren folgt teilweise der statistischen Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft, Rev. 1.1 von 2002 (EC, 2002)

Abbildung 23: Produktionsperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (aggregiert)

Die fünfzig Sektoren mit den höchsten aggregierten Beiträgen zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland in Mio. m³.



Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-WF-Blau-Sektoren-Produktionsbasiert-Aggregiert.xlsx*

Quelle: Exiobase-Datenbank

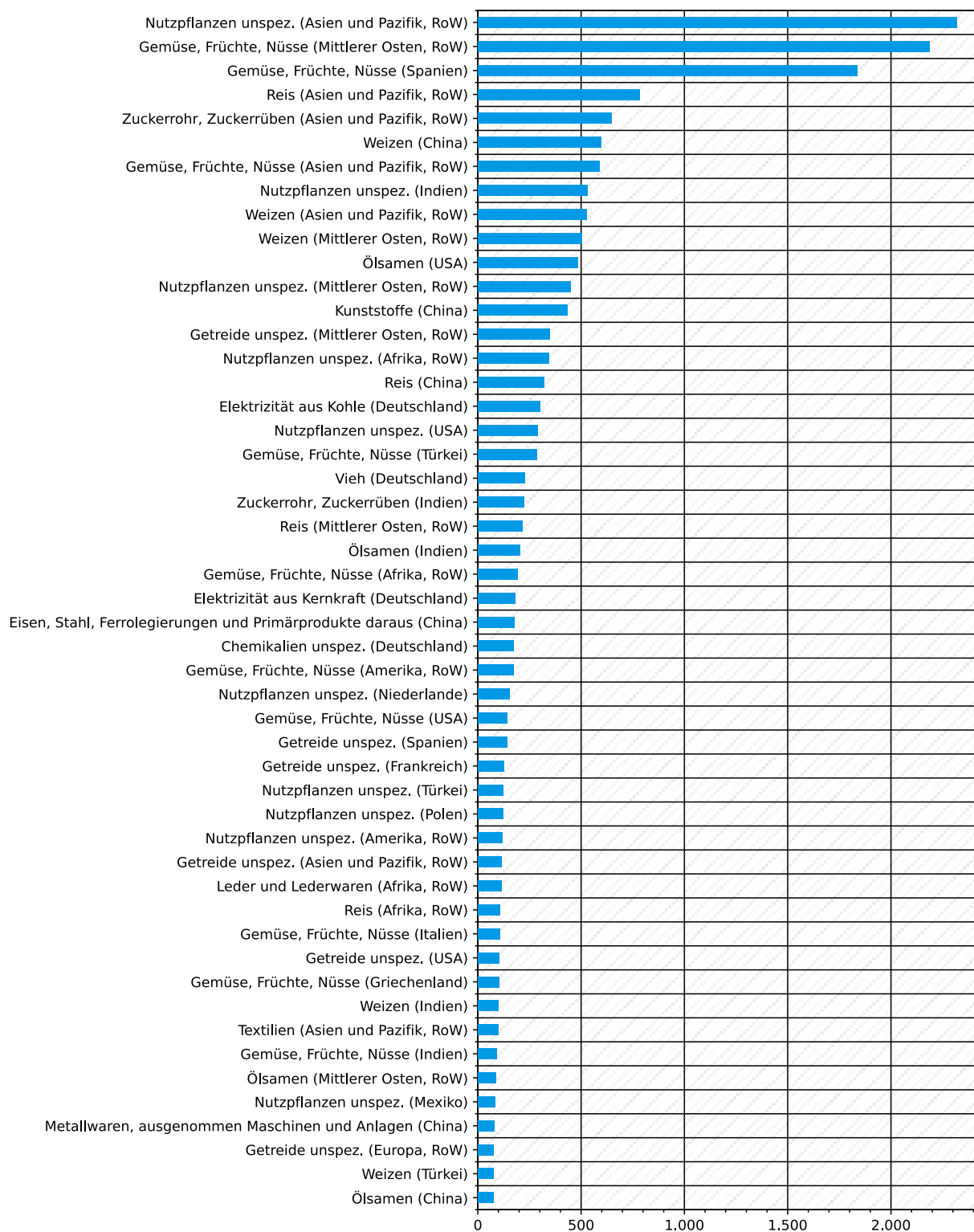
4.2.2.2 Produktionsperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (nach Sektor und Herkunftsregion)

Abbildung 24 zeigt die höchsten Beiträge einzelner Sektoren zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland. Der Unterschied zu Abbildung 23 ist, dass die Beiträge nicht nach Sektoren aggregiert sind und damit die Herkunftsregionen der einzelnen Sektoren sichtbar sind.

Die zehn höchsten nicht-aggregierten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch von Deutschland werden durch die Sektoren Nutzpflanzen unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW); Gemüse, Früchte, Nüsse (Mittlerer Osten, RoW); Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien); Gemüse, Früchte, Nüsse (Asien und Pazifik, RoW); Getreide unspezifisch (Indien); Weizen (China); Reis (Asien und Pazifik, RoW); Weizen (Asien und Pazifik, RoW); Kunststoffe (China) und Weizen (Mittlerer Osten, RoW) beigetragen. Insgesamt resultieren die höchsten Beiträge aus den RoW-Regionen Asien und Pazifik sowie Mittlerer Osten, aber auch aus Spanien, Indien, China und der Türkei. Die ursächlichen Sektoren sind überwiegend landwirtschaftsbezogen. Von den 25 Sektoren mit den höchsten Beiträgen zum blauen Wasserverbrauch von Deutschland haben nur zwei Sektoren keinen direkten Bezug zu Landwirtschaft. Diese Sektoren sind Kunststoffe aus China (Rang 9) und Elektrizität aus Kohle aus Deutschland (Rang 18).

Abbildung 24: Produktionsperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (nach Sektor und Herkunftsregion)

Die fünfzig Sektoren mit den höchsten Beiträgen zum blauen Wasserverbrauch von Deutschland in Mio. m³.
RoW = Verbleibende Weltregionen.



Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle_WF_Blau_Sektoren.xlsx*

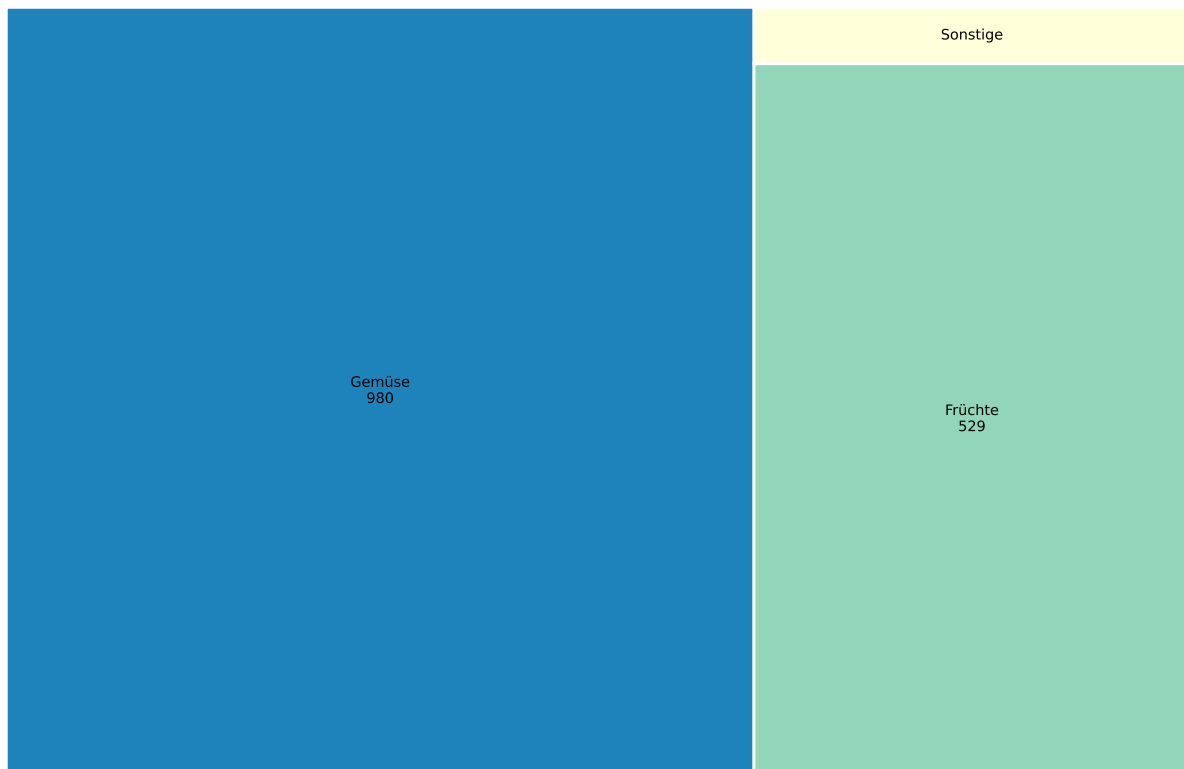
Quelle: Exiobase-Datenbank

4.2.2.2.1 Analyse des blauen Wasserverbrauchs der nicht aggregierten Sektoren

Die in Abbildung 24 aufgelisteten Beiträge einzelner Sektoren zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland können theoretisch weiter aufgeschlüsselt werden. Das ist möglich, weil die Satellitenkonten der Exiobase-Datenbank für blaues Wasser in mehrere Unterkategorien aufgeteilt sind. Die Anteile der Beiträge der einzelnen Unterkategorien können optisch differenziert dargestellt werden. Abbildung 25 zeigt beispielhaft die Zusammensetzung des blauen Wasserverbrauchs des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien). Aus der Abbildung geht hervor, dass bspw. Gemüse einen höheren Anteil am blauen Wasserverbrauch des Sektors hat als Früchte. Da die in Abbildung 24 aufgelisteten Beiträge einzelner Sektoren zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland nicht die Lieferkette des jeweiligen Sektors einschließen, ist der aufgeschlüsselte Wasserverbrauch relativ homogen. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Konsumperspektive des verbrauchten blauen Wassers einschließlich der Wertschöpfungskette dargestellt. Da hier das in Güter eingebettete blaue Wasser über Wertschöpfungsketten auf verschiedene Sektoren verteilt wird, sind auch die spezifischen Beiträge blauen Wassers heterogener (siehe bspw. Abbildung 53, S.149).

Abbildung 25: Verbrauch von blauem Wasser durch Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien)

Aufgeschlüsselte Darstellung des blauen Wasserverbrauchs durch den Sektor Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien) in Mio. m³.



Quelle: Exiobase-Datenbank

4.2.3 Konsumperspektive des blauen Wasserverbrauchs von Deutschland nach Sektor

Während im vorherigen Unterkapitel nur die eigenen direkten und indirekten Beiträge der Sektoren zum blauen Wasserverbrauch von Deutschland abgebildet wurden, werden in diesem Kapitel die direkten Beiträge der Sektoren einschließlich ihrer Wertschöpfungskette abgebildet. Im vorherigen Abschnitt wurde also abgebildet, wie viel Wasserverbrauch bspw. der Sektor „Gastgewerbe“ entweder direkt oder als Abschnitt der Wertschöpfungskette anderer Sektoren zum gesamten Wasserverbrauch von Deutschland beiträgt (Produktionsperspektive). In diesem Abschnitt wird analog dazu dargestellt, wie viel Wasserverbrauch bspw. der Sektor „Gastgewerbe“ einschließlich seiner Wertschöpfungskette (z.B. Agrarerzeugnisse, Energie, etc.) zum gesamten Wasserverbrauch von Deutschland beiträgt (Konsumperspektive).

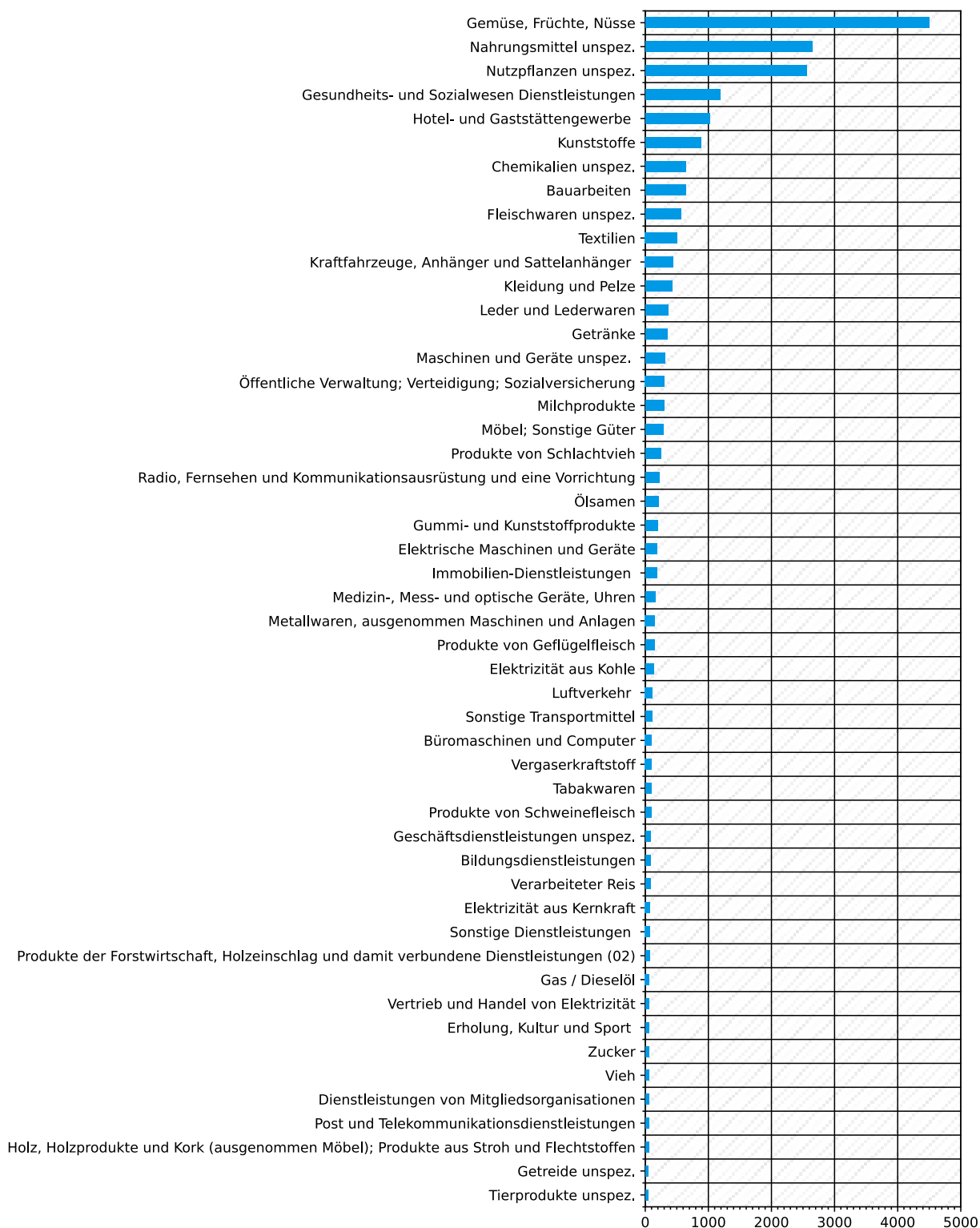
Zuerst nach Sektor aggregiert (Abschnitt 4.2.3.1) und anschließend disaggregiert und einschließlich der Herkunftsregion (Abschnitt 4.2.3.2). Darüber hinaus werden die Wertschöpfungsketten von ausgewählten Sektoren mit hoher Relevanz analysiert (Abschnitt 4.2.3.2.2).

4.2.3.1 Konsumperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (aggregiert)

Die höchsten Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch Deutschlands einschließlich ihrer Wertschöpfungskette werden von den Sektoren Gemüse, Früchte, Nüsse (4.503 Mio. m³); Nahrungsmittel unspezifisch (2.649 Mio. m³); Nutzpflanzen unspezifisch (2.556 Mio. m³); Gesundheits- und Sozialwesen Dienstleistungen (1.189 Mio. m³); Hotel- und Gaststättengewerbe (1.025 Mio. m³); Kunststoffe (879 Mio. m³); Chemikalien unspezifisch (646 Mio. m³); Bauarbeiten (641 Mio. m³); Fleischwaren unspezifisch (563 Mio. m³) und Textilien (508 Mio. m³) beigesteuert (Abbildung 26).

Abbildung 26: Konsumperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (aggregiert)

Die fünfzig aggregierten Sektoren mit den höchsten Verbrauchsmengen von blauem Wasser durch Konsum in Deutschland in Mio. m³.



Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-WF-Blau-Sektoren-Konsumbasiert-Aggregiert.xlsx*

Quelle: Exiobase-Datenbank

4.2.3.2 Konsumperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (nach Sektor und Herkunftsregion)

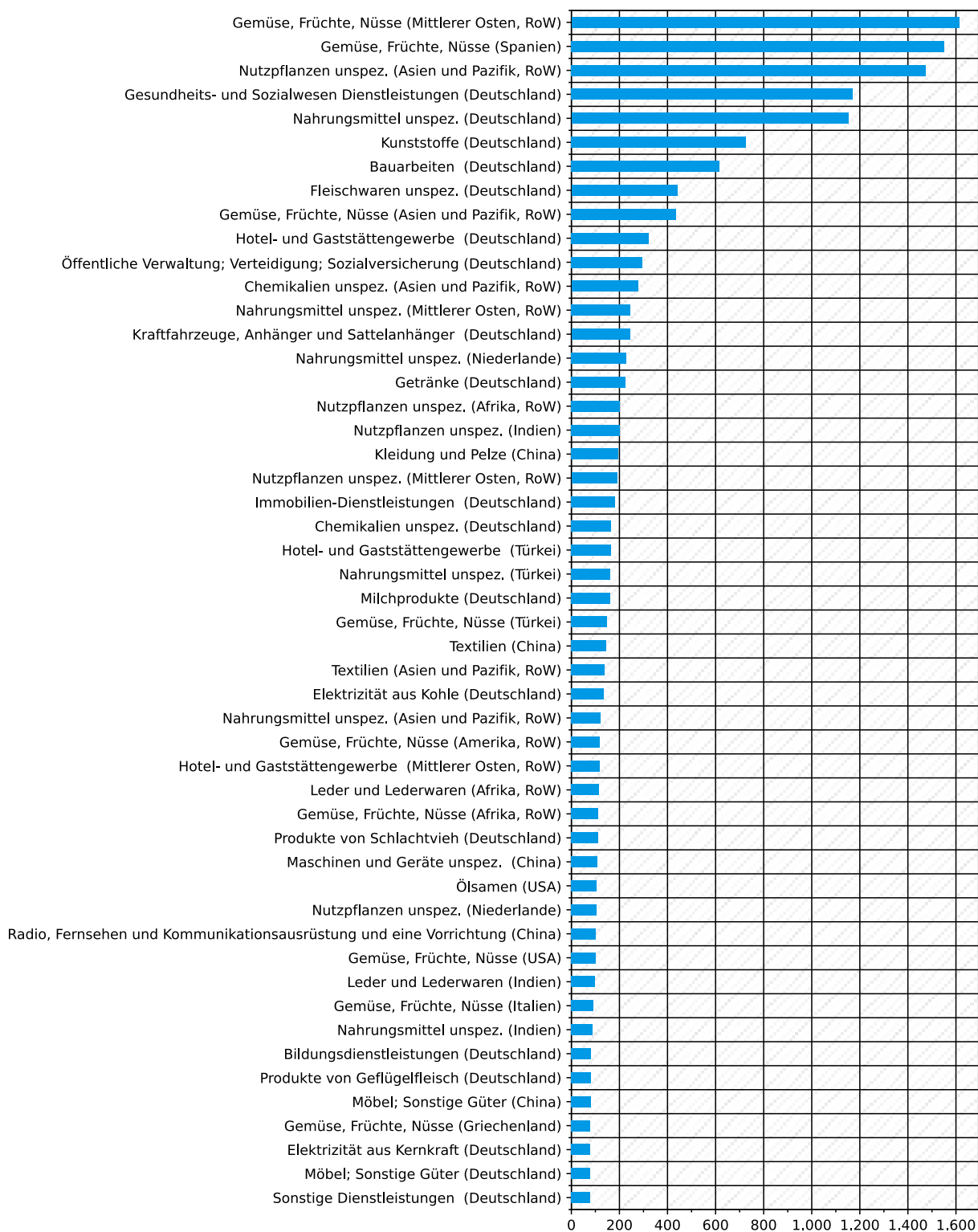
Abbildung 27 zeigt die höchsten Beiträge einzelner Sektoren zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland einschließlich der Wertschöpfungskette. Der Unterschied zu Abbildung 26 ist, dass die Beiträge nicht nach Sektor aggregiert sind und damit die Herkunftsregionen der einzelnen Sektoren sichtbar sind.

Die höchsten Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland werden durch die Sektoren Gemüse, Früchte, Nüsse Mittlerer Osten, RoW (1.613 Mio. m³); Gemüse, Früchte, Nüsse Spanien (1.552 Mio. m³), Nutzpflanzen unspezifisch Asien und Pazifik, RoW (1.475 Mio. m³); Gesundheits- und Sozialwesen Dienstleistungen Deutschland (1.170 Mio. m³), Nahrungsmittel unspezifisch Deutschland (1.152 Mio. m³), Kunststoffe Deutschland (727 Mio. m³), Bauarbeiten Deutschland (616 Mio. m³), Fleischwaren unspezifisch Deutschland (440 Mio. m³), Gemüse, Früchte, Nüsse Asien und Pazifik, RoW (435 Mio. m³) und Hotel- und Gaststättengewerbe Deutschland (321 Mio. m³) beigetragen (Abbildung 27).

Der nachfolgende Abschnitt 4.2.3.2.1 stellt den blauen Wasserverbrauch der Sektoren dem sektoralen Umsatz gegenüber und ermöglicht damit, besonders wasserintensive Sektoren zu identifizieren.

Abbildung 27: Konsumperspektive der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland (nach Sektor und Herkunftsregion)

Die fünfzig Sektoren mit den höchsten Verbrauchsmengen von blauem Wasser durch Konsum in Deutschland in Mio. m³. RoW = Verbleibende Weltregionen.



Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-WF-Blau-Sektoren-Konsumbasiert.xlsx*

Quelle: Exiobase-Datenbank

4.2.3.2.1 Wasserverbrauch und Wasserintensität

In den vorherigen Abschnitten wurde jeweils der gesamte sektorale Wasserverbrauch berichtet. Dabei wurde nicht berücksichtigt, dass Deutschlands absoluter Konsum aus den verschiedenen Sektoren in der Exiobase-Datenbank variiert. Bspw. konsumiert Deutschland rein monetär gesehen gemäß der Exiobase-Datenbank ca. 19-mal mehr aus dem Sektor *Gesundheits- und Sozialwesen (Deutschland)* als aus dem Sektor *Fleischprodukte (Deutschland)*. Das bedeutet auch, dass der Konsum von einer Einheit Output aus dem Sektor *Fleischprodukte* einen 19-mal höheren Wasserverbrauch aufweisen muss als der Sektor *Gesundheits- und Sozialwesen*, um den gleichen absoluten Wasserverbrauch zu induzieren. Dieser Umstand führt auch dazu, dass absolut betrachtet Sektoren, aus denen rein monetär betrachtet viel konsumiert wird, auch tendenziell einen höheren absoluten Wasserverbrauch induzieren.

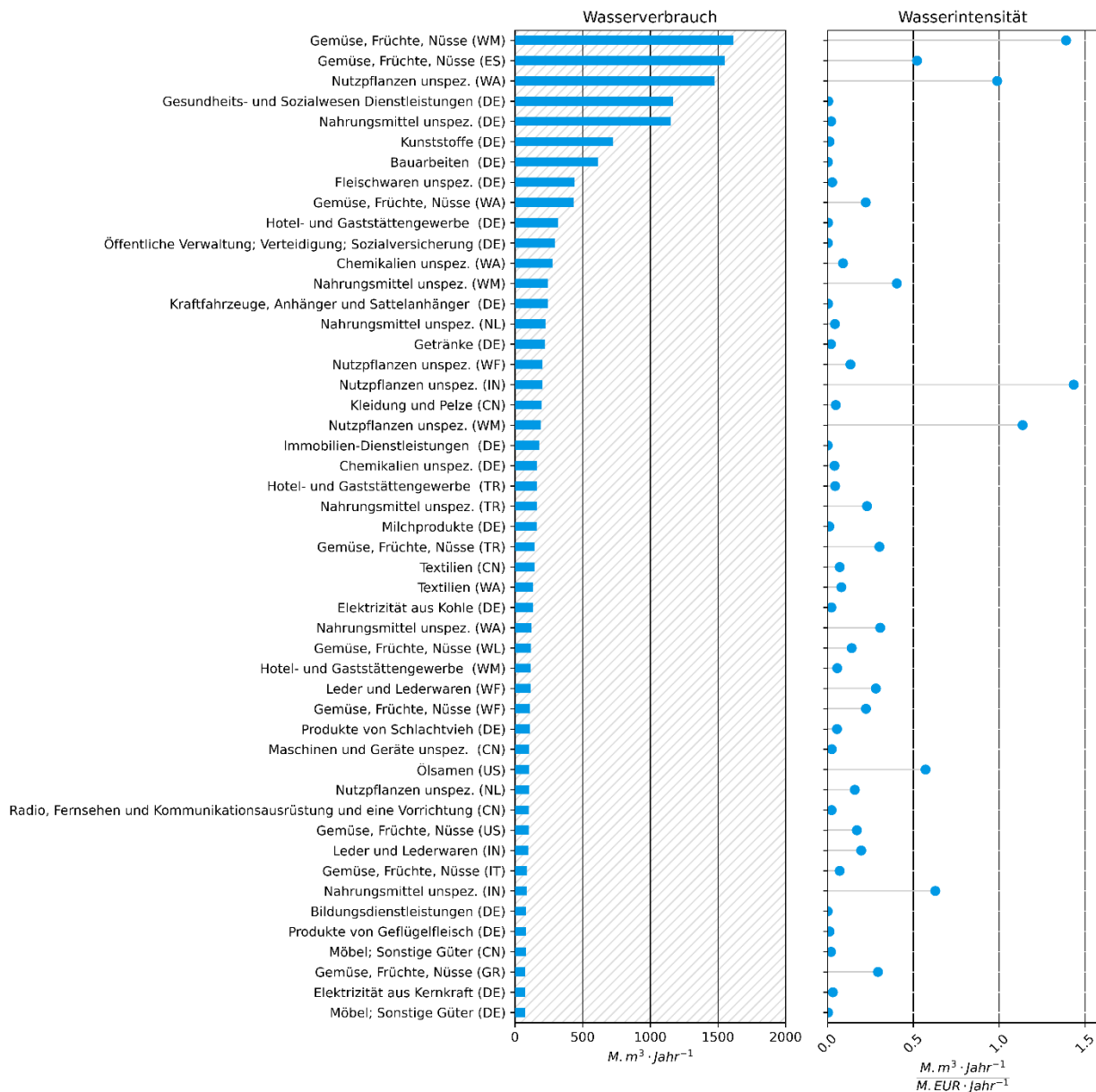
Neben der Frage nach den absoluten Verbrauchsmengen drängt sich also auch die Frage nach der Wasserintensität der Sektoren auf. Also die Frage danach, wie viel Wasser mit einer Einheit Konsum aus einem Sektor verbunden ist. Hierfür kann der konsuminduzierte Wasserverbrauch durch die monetäre Konsummenge von Deutschland aus einem Sektor geteilt werden.

Abbildung 27 (Sektoren weltweit) und Abbildung 28 (Sektoren Deutschland) zeigen neben dem absoluten Wasserverbrauch auch die Wasserintensität pro Einheit Konsum. Aus den Abbildungen geht hervor, dass für die Agrarsektoren *Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien und Mittlerer Osten)* und *Nutzpflanzen (Asien und Pazifik)* bspw. nicht nur der absolute Wasserverbrauch hoch ist, sondern auch die Wasserintensität. Die in Bezug auf absoluten Wasserverbrauch nachfolgenden Sektoren wie bspw. *Gesundheits- und Sozialwesen (Deutschland)*, *Lebensmittel (Deutschland)* und *Plastik (Deutschland)* hingegen sind nicht wasserintensiv. Bei der Betrachtung von ausschließlich deutschen Sektoren erweisen sich die Sektoren *Viehzucht* und *Rindfleisch* als Sektoren mit einer besonders hoher Wasserintensität aber bspw. auch *Tabak*, *Chemikalien* und *Elektrizität* (Abbildung 28).

Der sektorale Wasserverbrauch umfasst vereinfacht gesehen also die zwei Dimensionen Wasserverbrauch und Wasserintensität (Abbildung 30). Eine besonders hohe Hebelwirkung für Interventionen ergibt sich dort, wo sowohl der Wasserverbrauch (Gemüse, Früchte, Nüsse; Nutzpflanzen unspezifisch; Nahrungsmittel; Tierprodukte; etc.) als auch die Wasserintensität (Reis; Vieh; Ölsamen; Tierprodukte; etc.) hoch sind (Abbildung 31). Um das Zustandekommen des hohen Wasserverbrauchs der einzelnen Sektoren zu verstehen, wurden in Abschnitt 4.2.3.2.2 die Wertschöpfungsketten ausgewählter Sektoren und damit auch die Treiber des Wasserverbrauchs bzw. der Wasserintensität genauer analysiert.

Abbildung 28: Gegenüberstellung des sektoralen Wasserverbrauchs und der Wasserintensität (aggregiert)

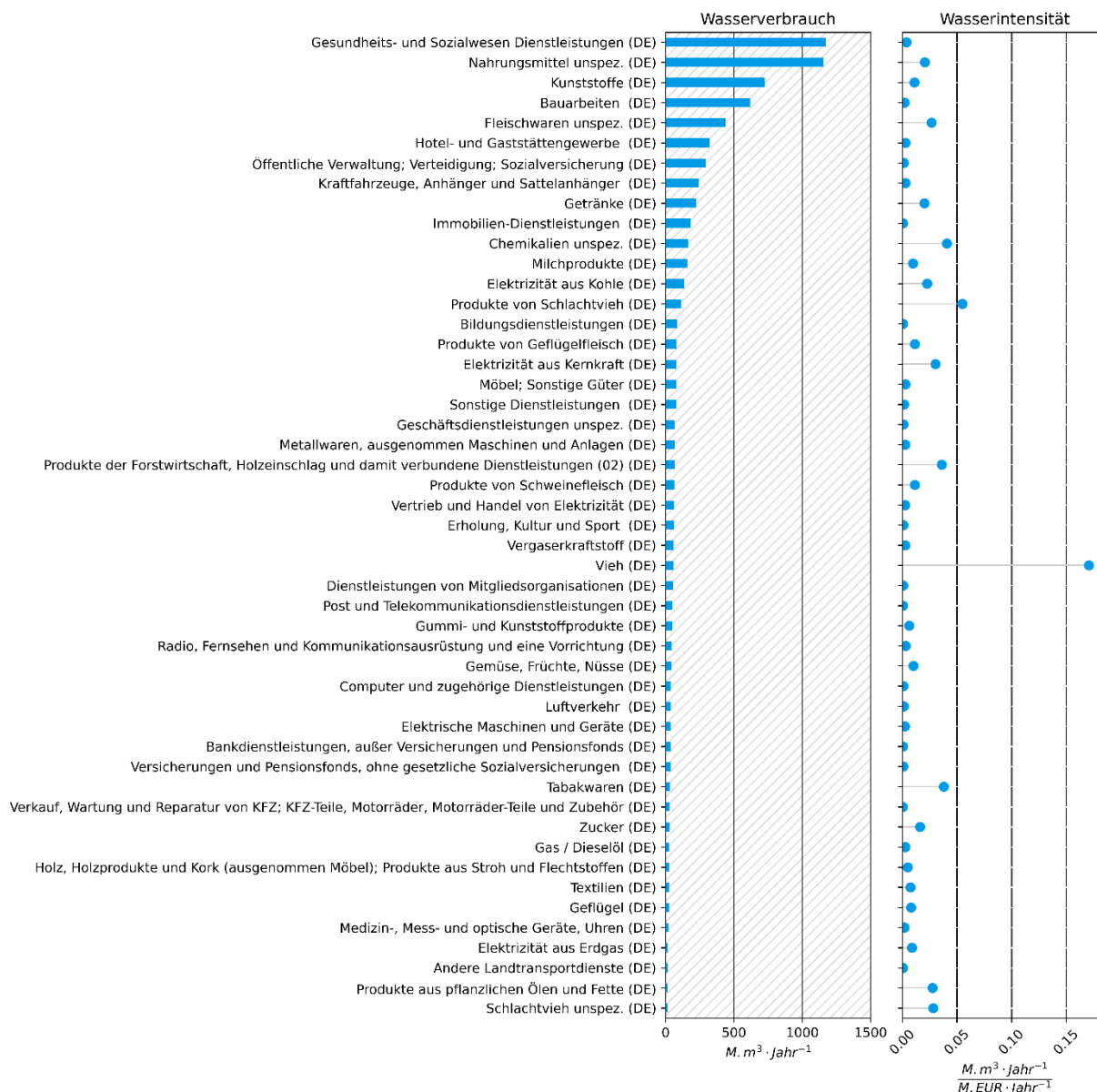
Die Abbildung zeigt den sektoralen Wasserverbrauch und die sektorale Wasserintensivität. Letztere ergibt sich aus dem Wasserverbrauch geteilt durch den monetären Output eines Sektors. Siehe Abbildung 7 (S.61) für einen Überblick der Länder-/Regionen-Codeliste.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 29: Gegenüberstellung des sektoralen Wasserverbrauchs und der Wasserintensität (nur deutsche Sektoren)

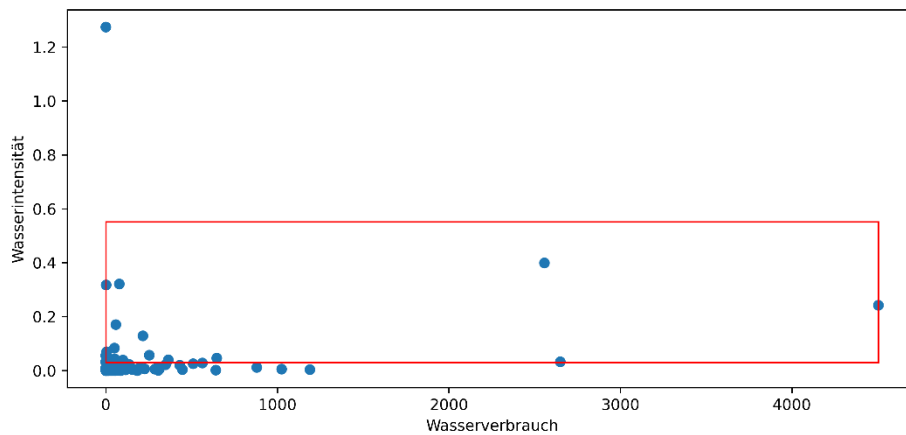
Die Abbildung zeigt den sektoralen Wasserverbrauch und die sektorale Wasserintensivität. Letztere ergibt sich aus dem Wasserverbrauch geteilt durch den monetären Output eines Sektors. Siehe Abbildung 7 (S.61) für einen Überblick der Länder-/Regionen-Codeliste.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 30: Gegenüberstellung Wasserverbrauch und Wasserintensität

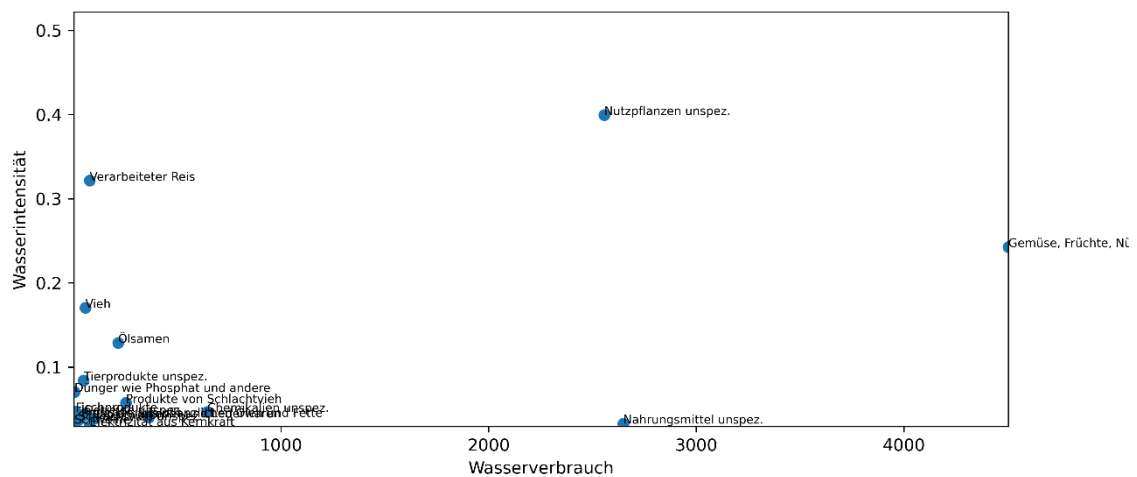
Die Abbildung zeigt den Wasserverbrauch und die Wasserintensität der aggregierten Sektoren induziert durch den Konsum Deutschlands. Dort, wo Wasserverbrauch und Wasserintensität hoch sind (rot umrandet; siehe Abbildung 31), ergibt sich potenziell eine hohe Hebelwirkung.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 31: Gegenüberstellung Wasserverbrauch und Wasserintensität (Hotspots)

Die Abbildung zeigt Sektoren mit einem durch Konsum in Deutschland induzierten hohen Wasserverbrauch und gleichzeitig einer hohen Wasserintensität (siehe roter Ausschnitt in Abbildung 30). Sektoren mit einer hohen Hebelwirkung zur Reduktion des Wasserverbrauchs sind in erster Linie Sektoren mit einer hohen Wasserintensität oder einem hohen absoluten Wasserverbrauch.



Quelle: Exiobase-Datenbank

4.2.3.2.2 Wertschöpfungsketten-Analyse

In den vorherigen Abschnitten wurde der konsuminduzierte blaue Wasserverbrauch von Deutschland nach regionaler Herkunft (Abschnitt 4.2.1), sektoraler Herkunft (Abschnitt 4.2.2) und finalem Konsum (Abschnitt 4.2.3) analysiert. Darüber hinaus wurde für die Sektoren mit den höchsten absoluten Beiträgen zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland einschließlich der Wertschöpfungskette (Konsumperspektive) die Wasserintensität dargestellt (Abschnitt 4.2.3.2.1). Bei den Sektoren, bei denen der direkte Beitrag zum Wasserverbrauch gering ist, bspw. bei den Sektoren *Gesundheit- und Sozialwesen Dienstleistungen* oder *Fleischwaren* stellt sich die Frage danach, welche Sektoren in der Wertschöpfungskette den Wasserverbrauch induzieren. Um dieser Frage nachzugehen, wurde für ausgewählte Sektoren eine SPA (*Structural Path Analysis*) durchgeführt (siehe Abschnitt 3.2.2).

Bei den abgebildeten *Flüssen* handelt es sich ausdrücklich nur um das *virtuelle* blaue Wasser und nicht um physische Warenströme. Abgebildet sind nur die mengenmäßig relevantesten virtuellen blauen Wasserflüsse (Abschneidekriterium). Wenn bspw. Nutzpflanzen ohne künstliche Bewässerung produziert werden und damit keinen bzw. über die Wertschöpfungsketten nur einen sehr geringen blauen Wasserverbrauch haben, dann ist dieser Sektor in den nachfolgenden Abbildungen nicht abgebildet. Zusätzlich zu den Ergebnissen der SPA sind auch die Anteile der einzelnen Indikatoren für blauen Wasserverbrauch am gesamten blauen Wasserverbrauch des jeweiligen Sektors in einem Kacheldiagramm visualisiert.

Die analysierten Sektoren können vereinfacht in zwei Kategorien eingeteilt werden.

Erstens: Sektoren mit einem hohen direkten blauen Wasserverbrauch⁴³:

- ▶ Gemüse, Früchte, Nüsse in der Region Mittlerer Osten (Abbildung 32 und Abbildung 33)
- ▶ Gemüse, Früchte, Nüsse in der Region Spanien (Abbildung 34 und Abbildung 35)
- ▶ Getreide unspezifisch in der Region Asien und Pazifik (Abbildung 48 und Abbildung 49; siehe Anhang B)
- ▶ Gemüse, Früchte, Nüsse in der Region Asien und Pazifik (Abbildung 56 und Abbildung 57; siehe Anhang B)

Zweitens: Sektoren, bei denen der direkte blaue Wasserverbrauch einen geringen Anteil am gesamten blauen Wasserverbrauch ausmacht. Folglich wird bei dieser zweiten Gruppe von Sektoren der Großteil des blauen Wasserverbrauchs über die Wertschöpfungskette von anderen Sektoren beigetragen.

- ▶ Gesundheit- und Sozialwesen Dienstleistungen in der Region Deutschland (Abbildung 36 und Abbildung 37)
- ▶ Bauarbeiten in der Region Deutschland (Abbildung 38 und Abbildung 39)
- ▶ Nahrungsmittel unspezifisch in der Region Deutschland (Abbildung 50 und Abbildung 51; siehe Anhang B)
- ▶ Kunststoffe in der Region Deutschland (Abbildung 52 und Abbildung 53; siehe Anhang B)

⁴³ Der direkte blaue Wasserverbrauch des jeweiligen Sektors ist durch die Beschriftung „direkt“ gekennzeichnet.

- Fleischwaren unspezifisch in der Region Deutschland (Abbildung 54 und Abbildung 55; siehe Anhang B)
- Hotel und Gaststättengewerbe in der Region Deutschland (Abbildung 58 und Abbildung 59; siehe Anhang B)
- Öffentliche Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung in der Region Deutschland (Abbildung 60 und Abbildung 61; siehe Anhang B)
- Chemikalien unspezifisch in der Region Asien und Pazifik (Abbildung 62 und Abbildung 63; siehe Anhang B)
- Nahrungsmittel unspezifisch in der Region Mittlerer Osten (Abbildung 64 und Abbildung 65; siehe Anhang B)
- Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger in der Region Deutschland (Abbildung 66 und Abbildung 67; siehe Anhang B)
- Nahrungsmittel unspezifisch in der Region Niederlande (Abbildung 68 und Abbildung 69; siehe Anhang B)

Bei den Sektoren, die landwirtschaftliche Primärerzeugnisse produzieren, mutmaßlich unter künstlicher Bewässerung, wie bspw. *Gemüse, Früchte, Nüsse* in den Regionen Mittlerer Osten, Spanien oder Asien und Pazifik, hat der direkte blaue Wasserverbrauch tendenziell einen hohen Anteil am gesamten blauen Wasserverbrauch (Kategorie 1). Da hier der Großteil des blauen Wasserverbrauchs aus einem einzelnen Sektor kommt, ist auch die in den Kacheldiagrammen dargestellte Zusammensetzung des blauen Wasserverbrauchs entsprechend homogen. Bei den Sektoren, deren eigener Anteil am blauen Wasserverbrauch nicht signifikant ist (Kategorie 2), ist die in den Kacheldiagrammen dargestellte Zusammensetzung des blauen Wasserverbrauchs tendenziell deutlich heterogener. Der Grund hierfür ist, dass die Beiträge zum Wasserverbrauch nicht von einem einzelnen Sektor dominiert werden, sondern durch verschiedene Sektoren beigetragen werden.

Im Sektor *Nahrungsmittel unspezifisch* in der Region Deutschland wird der größte Anteil des blauen Wasserverbrauchs durch Sektoren im Ausland beigetragen. Das bedeutet, dass die beitragenden Sektoren aus Deutschland entweder keinen oder nur einen geringen Beitrag zum blauen Wasserverbrauch des Sektors leisten. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Sektoren *Hotel- und Gaststätten Gewerbe* (Abbildung 58 und Abbildung 59) und *Öffentliche Verwaltung, Verteidigung und Sozialwesen* (Abbildung 60 und Abbildung 61)⁴⁴. Die Beiträge dieser Sektoren werden jeweils durch Agrarsektoren aus dem Ausland beigetragen.

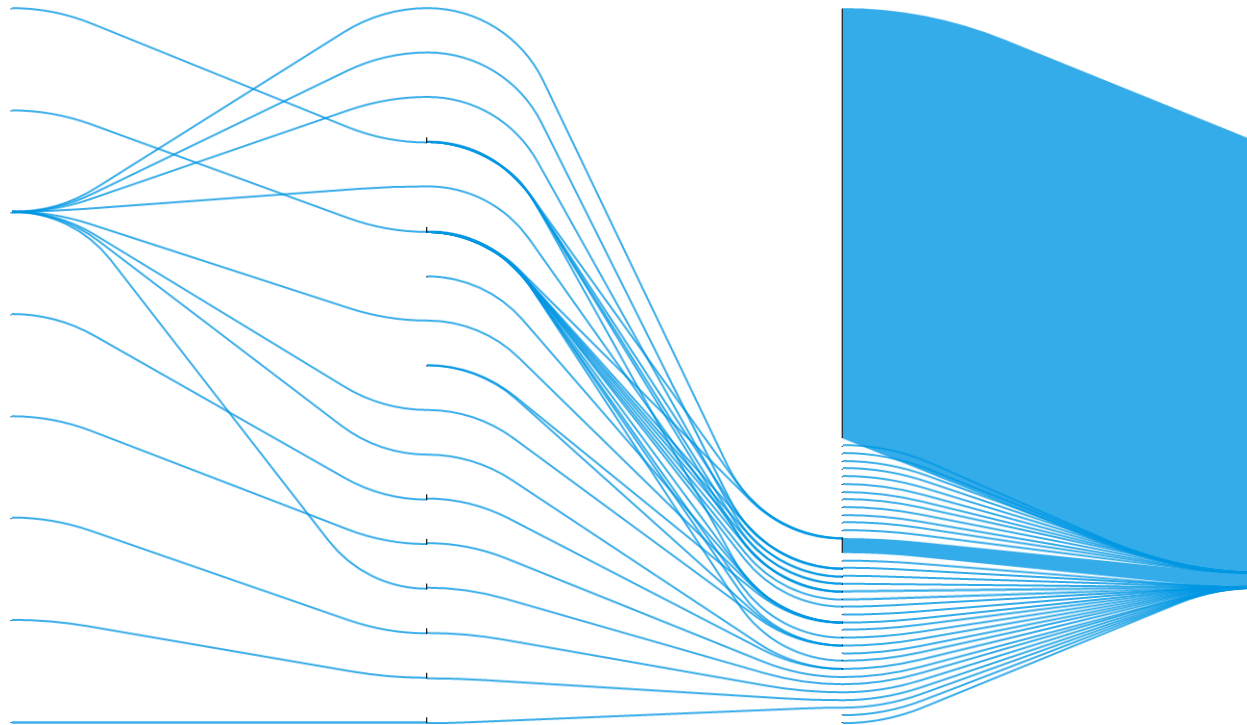
Auch die Sektorengruppe Chemikalien ist sehr blauwasserintensiv und trägt einen hohen Beitrag zum blauen Wasserverbrauch anderer Sektoren bei. Bereits in Abschnitt 4.2.3.2.1 ist der Sektor *Chemikalien* in der Region Deutschland durch eine hohe Wasserintensität in Erscheinung getreten. Sektoren, bei denen diese Sektorengruppe einen signifikanten Anteil am gesamten blauen Wasserverbrauch hat, sind bspw. die Sektoren *Gesundheits- und Sozialwesen* (Abbildung 36), *Kunststoffe* (Abbildung 52) aber auch *Bauarbeiten* (Abbildung 38) in der Region Deutschland. Auffällig ist, dass gemäß der Kacheldiagramme die blauen Wasserbeiträge unabhängig vom Sektor immer in erster Linie durch Agrarerzeugnisse beigetragen werden (Abbildung 37, Abbildung 39 und Abbildung 53). Agrarerzeugnisse sind somit absolut dominant

⁴⁴ Jeweils durch den Sektor *Nutzpflanzen* in der Region Asien und Pazifik

in Bezug auf den Wasserverbrauch verschiedenster Sektoren. Siehe dazu auch die Limitierungen in Abschnitt 6.

Abbildung 32: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Mittlerer Osten, RoW)

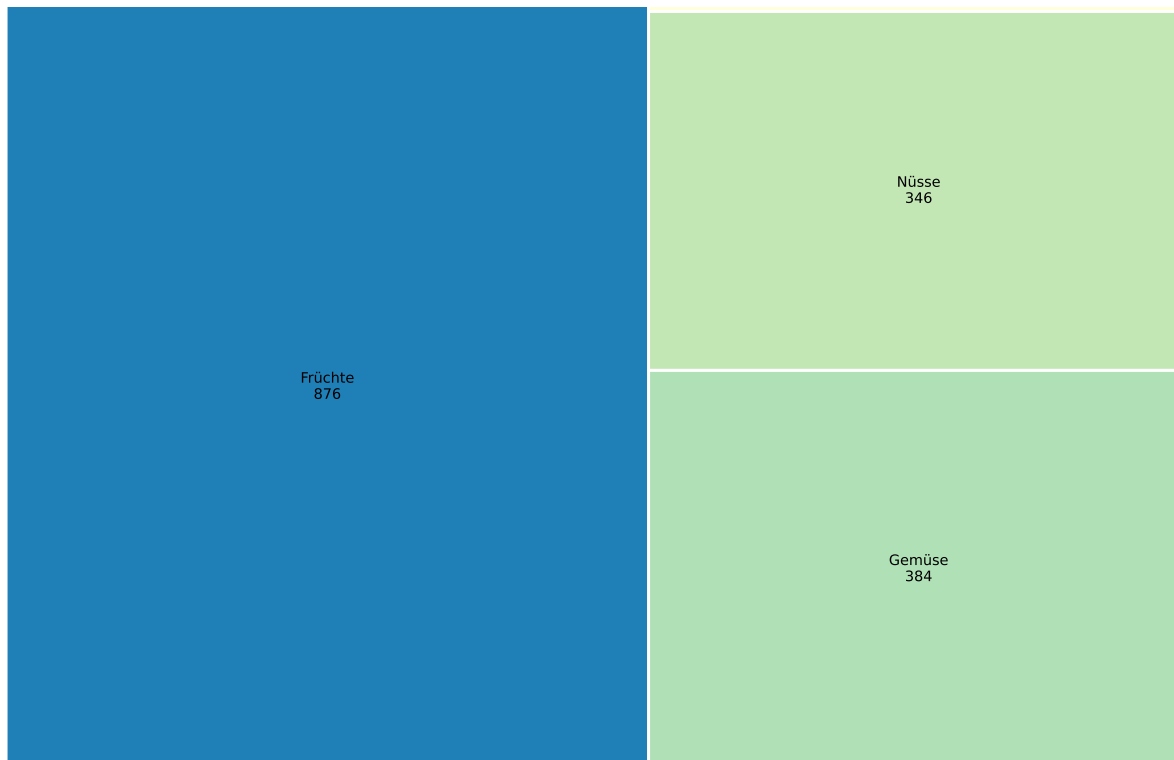
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Mittlerer Osten, RoW).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 33: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Mittlerer Osten, RoW)

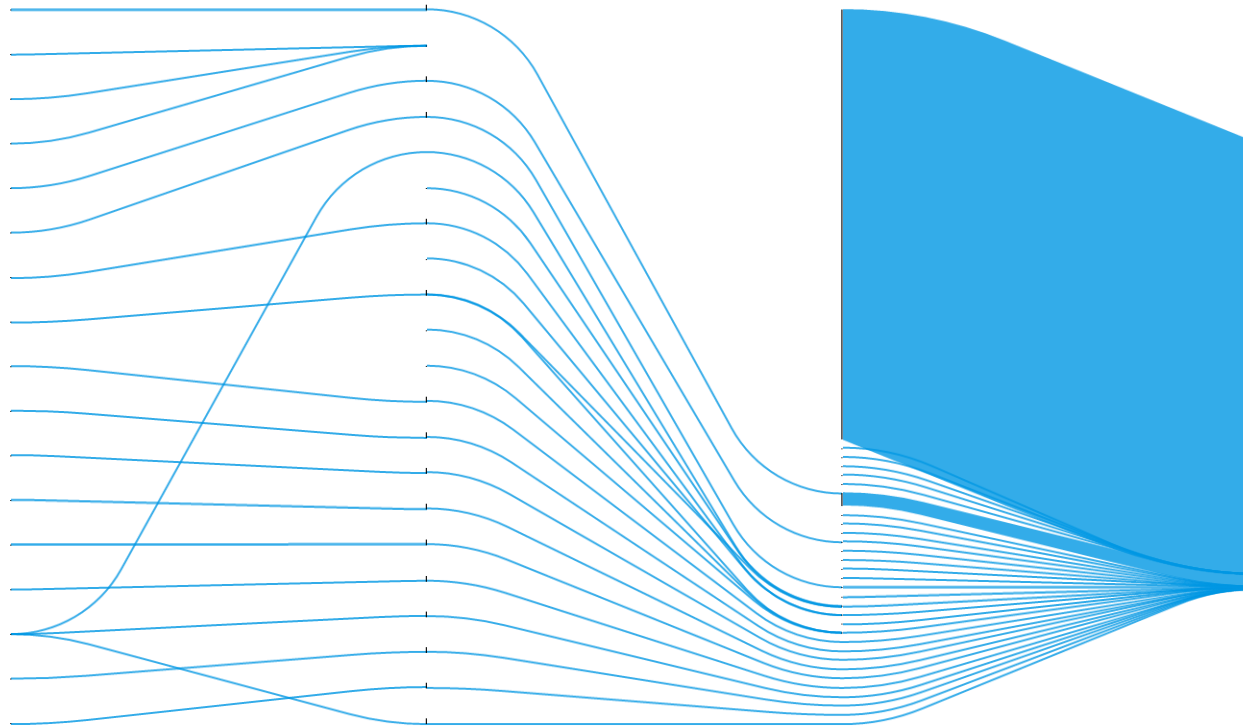
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Mittlerer Osten, RoW) in Mio. m³.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 34: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien)

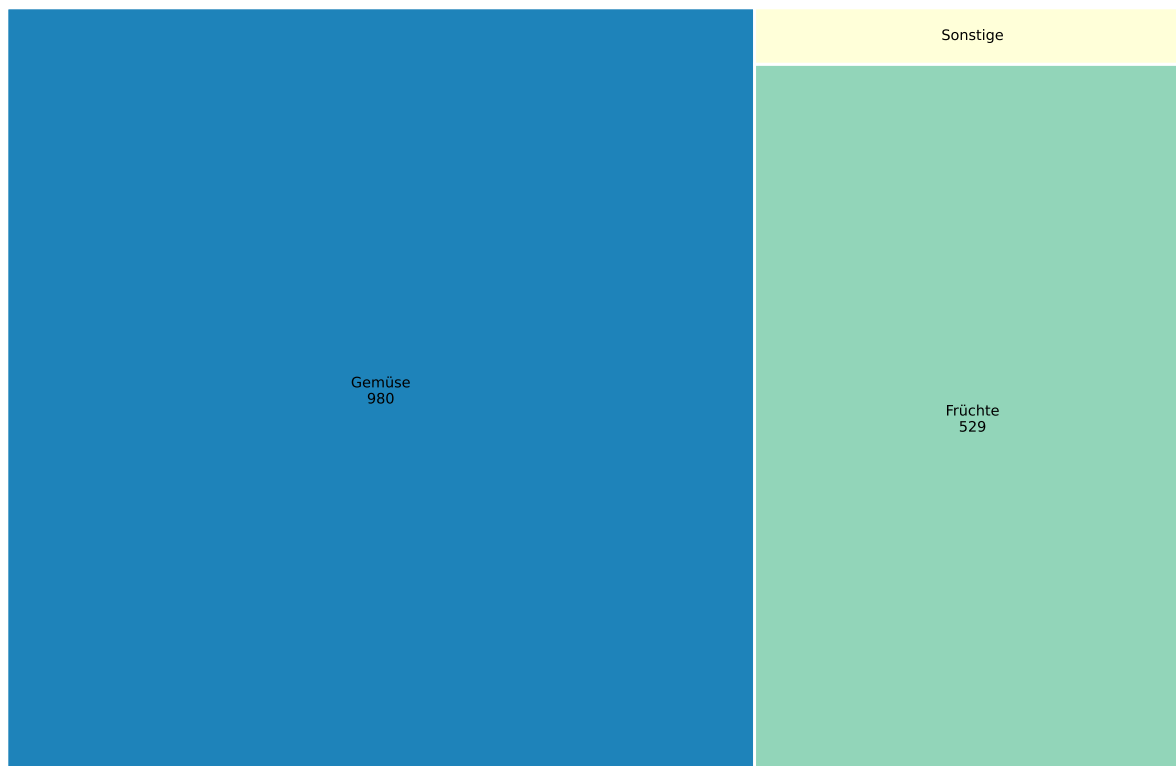
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 35: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien)

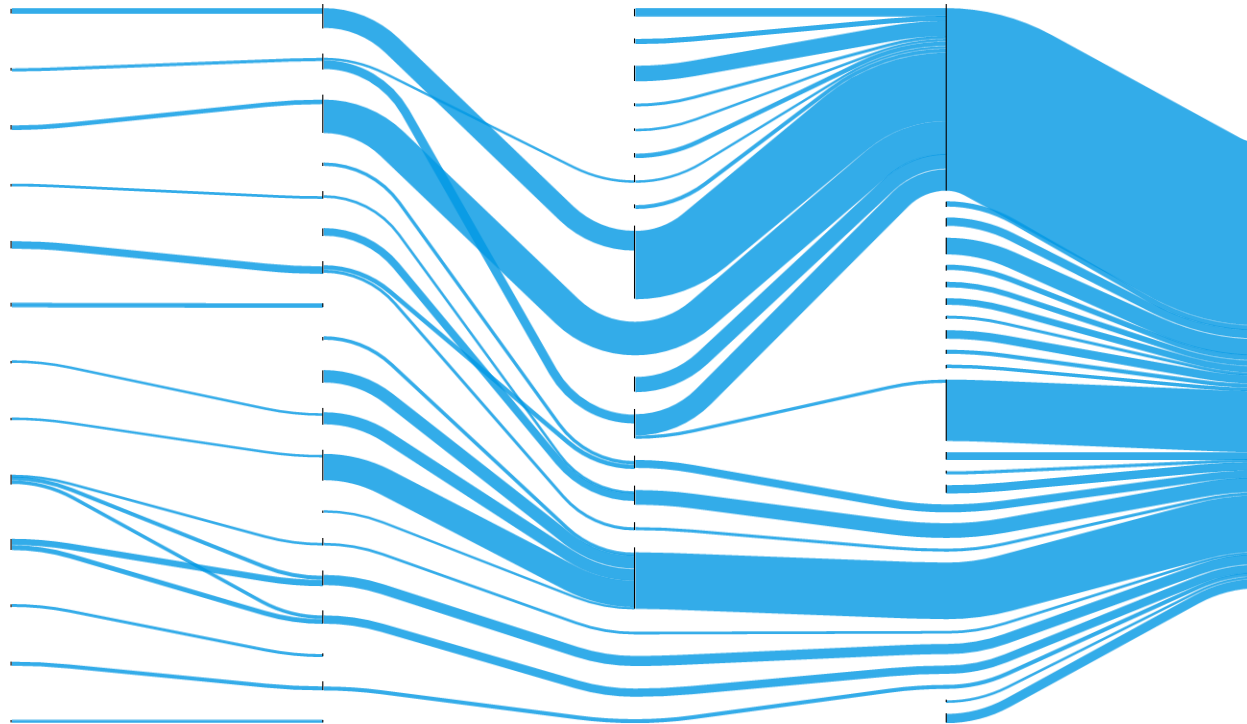
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Spanien) in Mio. m³.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 36: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gesundheits- und Sozialwesen Dienstleistungen (Deutschland)

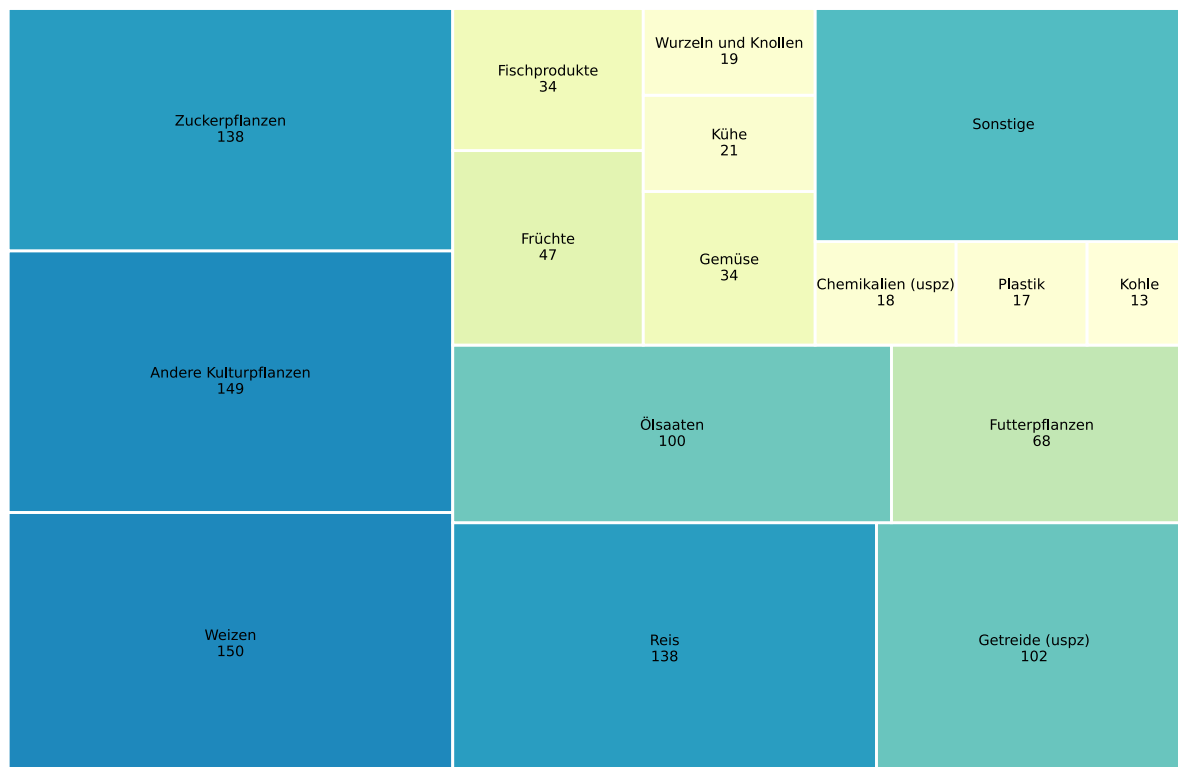
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gesundheits- und Sozialwesen Dienstleistungen (Deutschland).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 37: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Gesundheits- und Sozialwesen Dienstleistungen (Deutschland)

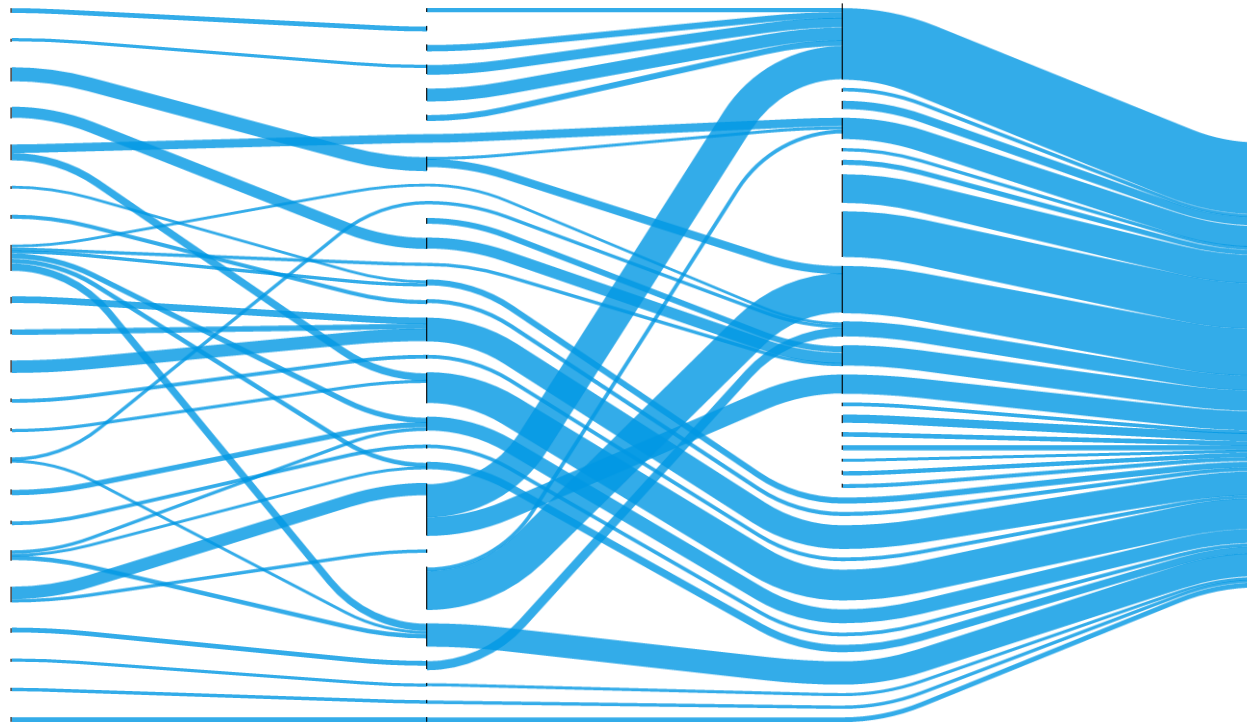
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Gesundheits- und Sozialwesen Dienstleistungen (Deutschland) in Mio. m³.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 38: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Bauarbeiten (Deutschland)

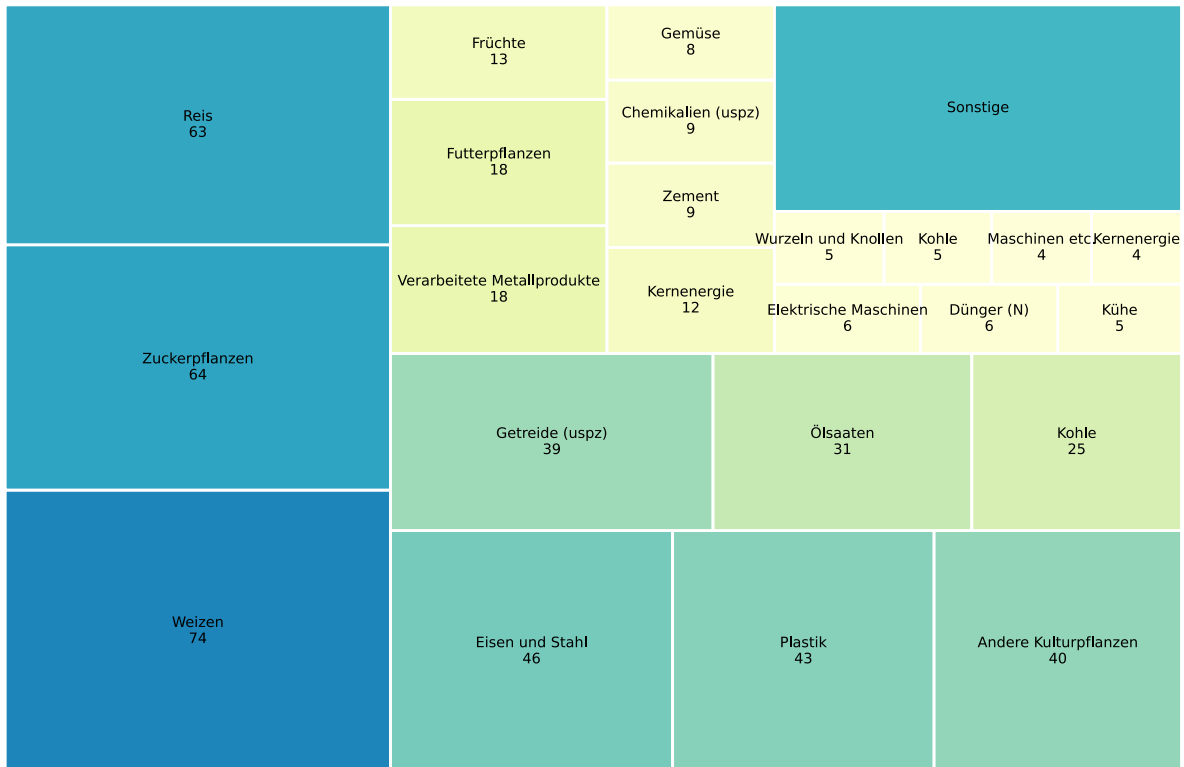
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Bauarbeiten (Deutschland).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 39: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Bauarbeiten (Deutschland)

Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Bauarbeiten (Deutschland) in Mio. m³.



Quelle: Exiobase-Datenbank

4.2.4 Zuordnung des blauen Wasserverbrauchs von Deutschland auf Einzugs- und Flussgebiete

Über die konsumgewichtete Zuordnung der regionalen Beiträge (Abbildung 21) zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland auf Einzugsgebiete kann die mögliche Herkunft des verbrauchten Wassers räumlich weiter angenähert werden (siehe Abschnitt 3.2.3 zur Vorgehensweise). Die so ermittelten Einzugsgebiete mit hohen Beiträgen liegen folglich auch in den Regionen, die bereits in Abschnitt 4.2.1 als Regionen mit einem hohen Beitrag zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland ausgewiesen wurden (Abbildung 40). Insbesondere in Bezug auf die Exiobase-Datenbank ergibt sich durch die Zuordnung des Wasserverbrauchs ein Mehrwert, da auch für die aggregierten RoW-Regionen aufgezeigt wird, in welchen Einzugsgebieten tendenziell am meisten Wasser verbraucht wird.

Einzugsgebiete oder Regionen, die mit erhöhter Wahrscheinlichkeit große Mengen zu Deutschlands konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch beitragen, sind bspw.

In den USA:

- südliche Gebiete des Mississippi,

- der Mittlere Westen
- Teile Kaliforniens.

In Südamerika:

- bspw. Regionen im zentralen Norden von Argentinien.

In Europa:

- insbesondere südeuropäische Regionen z.B. Regionen in Nordspanien,
- Norditalien,
- aber auch Frankreich.
- In Deutschland insbesondere Regionen im Südwesten einschließlich des Einzugsgebiets des Rheins.

In Afrika:

- insbesondere Regionen in Nordafrika z.B. Teile Marokkos oder Ägyptens.

In Asien:

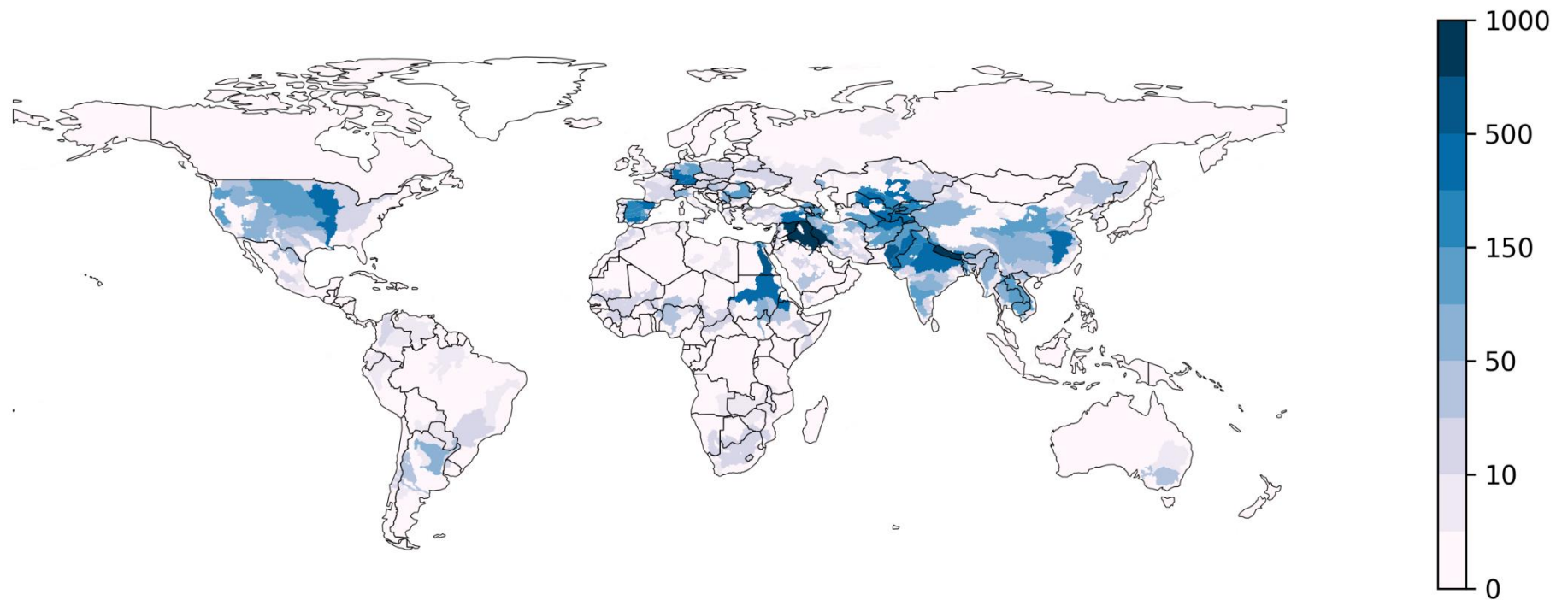
- insbesondere Südasien z.B. in Indien die zentralen Gebiete in Nordindien,
- sowie massiv die Grenzregion zwischen Indien und Pakistan.
- In Vorderasien, der Südosten der Türkei und der Westen Syriens.
- In Zentralasien die südlichen Gebiete Turkmenistans und Kasachstans.
- In Ostasien, der Osten und Nordosten Chinas und in Südostasien Regionen in Nord-Thailand.

Zum besseren Verständnis können die Beiträge auf Ebene von Einzugsgebieten noch einmal auf größere Flusseinzugsgebiete aggregiert werden (Abbildung 41). Demnach sind die Flusseinzugsgebiete mit den zehn höchsten Beiträgen zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch Deutschlands der Ganges (Asien), Indus (Asien), Nil (Afrika), Schatt al-Arab (Asien), Aralsee (Asien), Donau (Europa), Mississippi (Amerika), Ebro (Europa), Kura (Asien), Yangtze (Asien), Rhein (Europa), Hamun-See (Asien), Tarim He (Asien) und Guadalquivir (Europa). Mehrere dieser Flusseinzugsgebiete liegen in Regionen mit einem mittleren oder sogar niedrigen Durchschnittseinkommen. Es ist also wahrscheinlich, dass durch den Konsum in Deutschland erhebliche Mengen an Wasser in wirtschaftlich schwächer gestellten Regionen als Deutschland verbraucht werden.

Bei den in Abbildung 40 zugeordneten Wassermengen handelt es sich jedoch erst einmal um rein volumetrische Annäherung ohne Aussagekraft in Bezug auf die Übernutzung des lokalen Wasserdargebots in den Einzugsgebieten. Daher soll im nachfolgenden Abschnitt zusätzlich die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Wasserverbrauch und möglicher Überschreitungen der lokalen Belastbarkeitsgrenzen nachgegangen werden.

Abbildung 40: Zuordnung des regionalen blauen Wasserverbrauchs von Deutschland auf Einzugsgebiete

Zuordnung des blauen Wasserverbrauchs von Deutschland auf die 8.250 Einzugsgebiete des WaterGAP3 Modells in Mio. m³. Die Farbskala wurde manuell erstellt und ist weder linear noch logarithmisch, sondern wurde für eine optimale Darstellung manuell kalibriert.

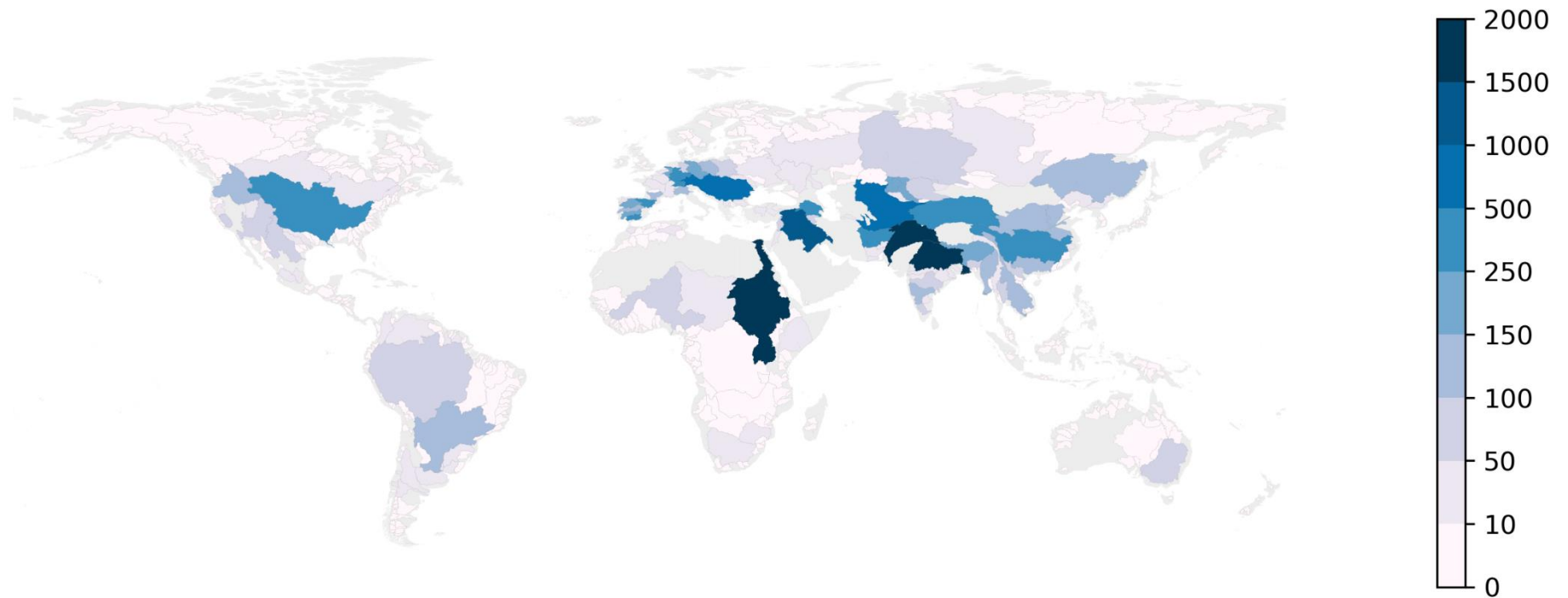


Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-Blauwasser-Einzugsgebiete.pdf*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

Abbildung 41: Zuordnung des regionalen blauen Wasserverbrauchs von Deutschland auf Flussgebiete

Zuordnung des blauen Wasserverbrauchs auf Flussgebiete gemäß HydroSHEDS (Lehner et al., 2008) in Mio. m³. Die Farbskala wurde manuell erstellt und ist weder linear noch logarithmisch, sondern wurde für eine optimale Darstellung manuell kalibriert.



Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-Blauwasser-Flusseinzugsgebiete.pdf* und *Tabelle-Blauwasser-Flusseinzugsgebiete.xlsx*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

4.2.4.1 Überschreitung lokaler Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten

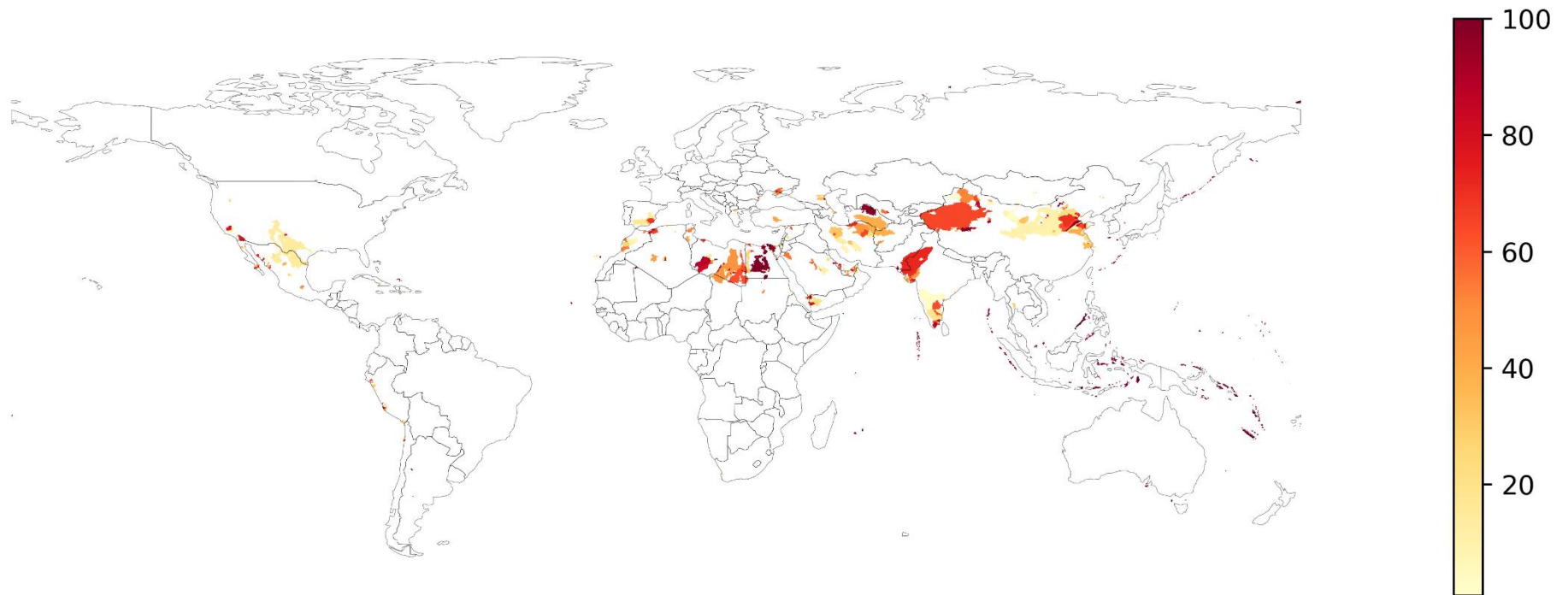
Unabhängig vom konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland ergibt sich für jedes Einzugsgebiet aus dem Wasserdargebot abzgl. des gesamten Wasserverbrauchs im Einzugsgebiet die Menge an Wasserverbrauch, welche die lokalen Belastbarkeitsgrenzen überschreitet. In Abbildung 42 wird für Einzugsgebiete, in denen die lokale Belastbarkeitsgrenze überschritten wird, der Anteil der Überschreitung im Einzugsgebiet am gesamten Wasserverbrauch dargestellt.

Der in Abbildung 40 auf die Einzugsgebiete aufgeteilte konsuminduzierte blaue Wasserverbrauch von Deutschland kann mit den Anteilen des Wasserverbrauchs in Abbildung 42, welche die lokalen Belastbarkeitsgrenzen überschreiten, multipliziert werden. So kann näherungsweise die Gesamtmenge des konsuminduzierten blauen Wasserverbrauchs von Deutschland bestimmt werden, die weltweit die lokalen Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten überschreitet. Vom gesamten konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland von 22.119 Mio. m³ betrifft dies 2.037 Mio. m³ also ca. 9.7%.

Schlussendlich zeigt Abbildung 43 die Einzugsgebiete und zugeordneten Mengen blauen Wasserverbrauchs ausschließlich für die Einzugsgebiete, wo die Menge des zugeordneten Wassers (Abbildung 40) oberhalb des 25%-Quantils und die relative Überschreitung der Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten (Abbildung 42) oberhalb des 75%-Quantils liegen.

Abbildung 42: Überschreitung der Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten

Die Abbildung zeigt die relative Überschreitung der Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten.

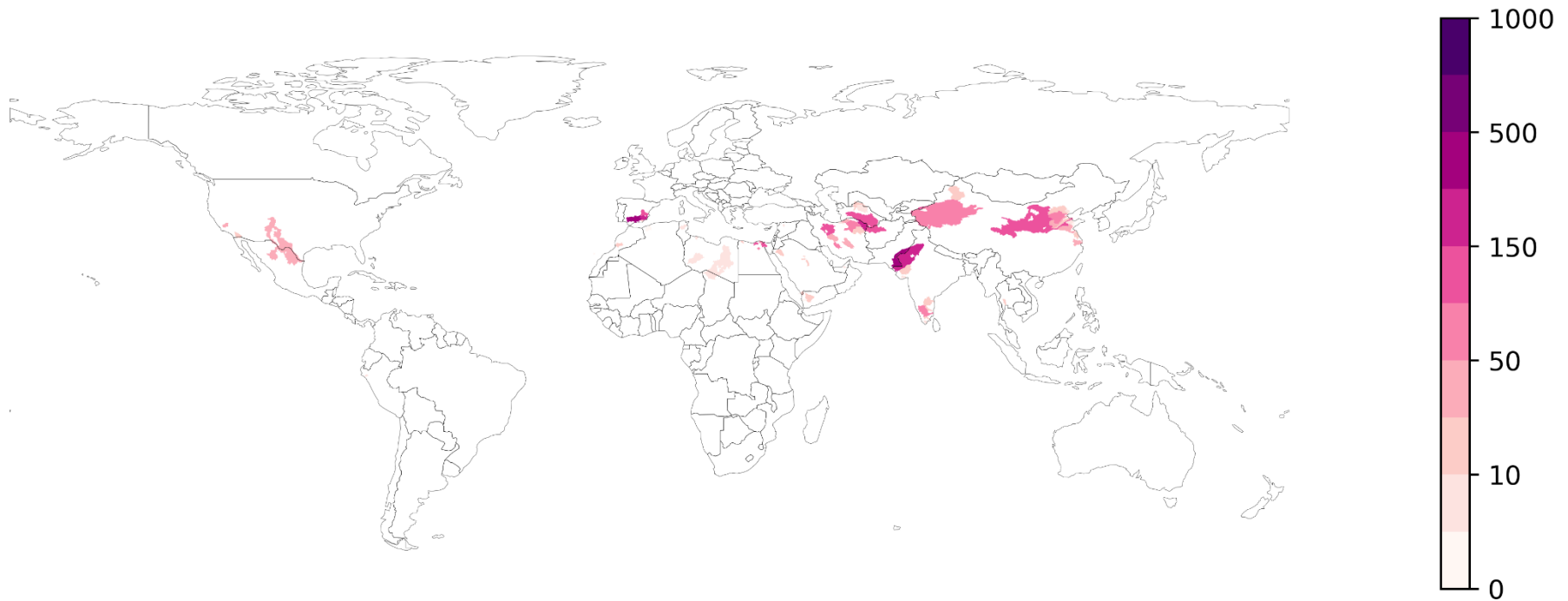


Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-Einzugsgebiete-Ueberschreitungen.pdf*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

Abbildung 43: Überschreitung der Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten - Hotspots

Die Abbildung zeigt die Zuordnung des blauen Wasserverbrauchs von Deutschland auf Einzugsgebiete weltweit. Allerdings nur dort, wo die Menge des zugeordneten Wassers (Abbildung 40) oberhalb des 25%-Quantils und die relative Überschreitung der Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten (Abbildung 42) oberhalb des 75%-Quantils liegen.



Siehe auch Zusatzmaterial *Karte-Einzugsgebiete-Ueberschreitungen-Hotspots.pdf*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

4.2.4.2 Wasserfußabdruck in Bezug auf die Überschreitung lokaler Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten

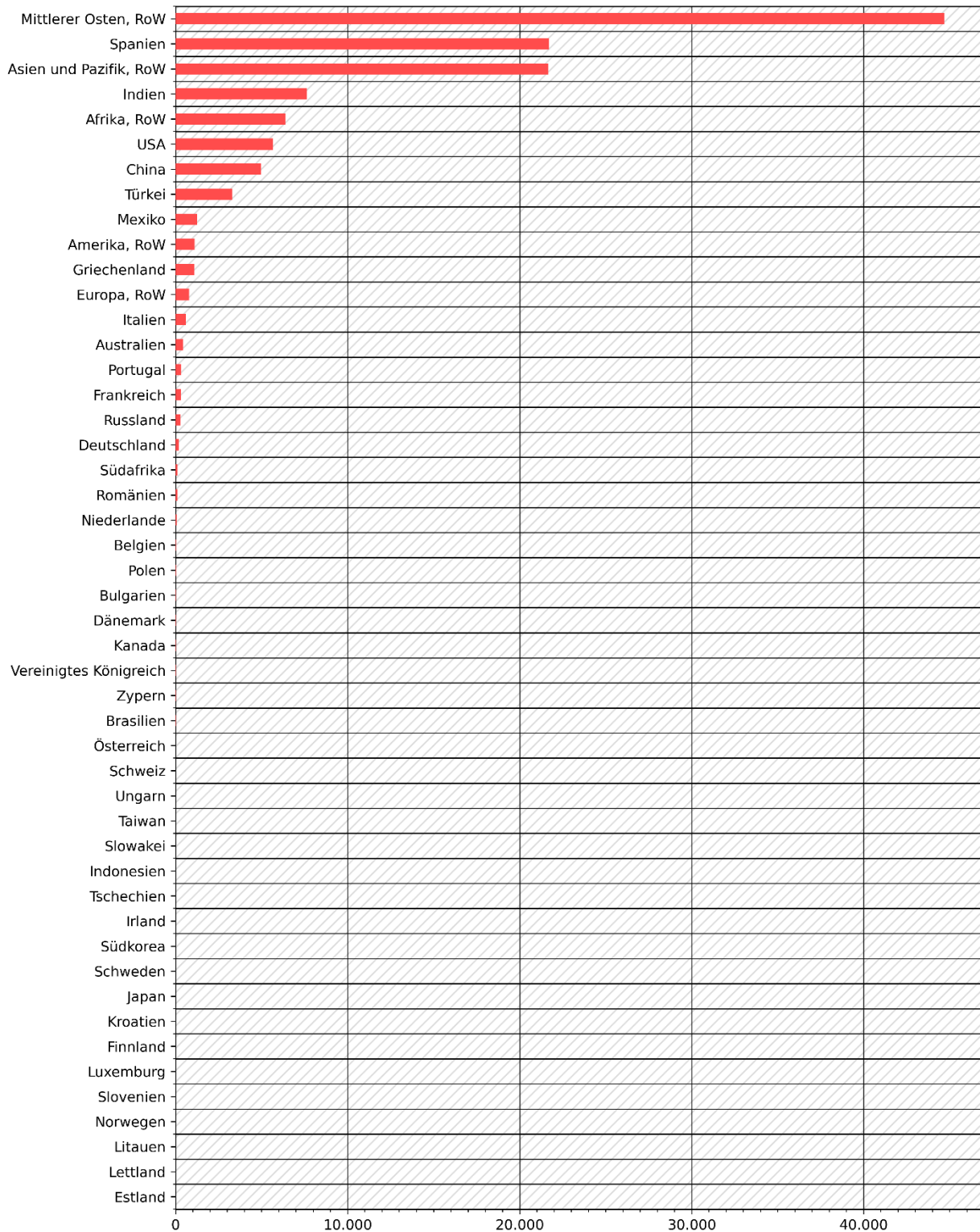
Im vorherigen Abschnitt wurden die Beiträge zum konsuminduzierten Wasserverbrauch Deutschlands Einzugsgebieten zugeordnet. Je nach Einzugsgebiet variiert die Auslastung oder gar Überlastung der lokalen Belastbarkeitsgrenze. Dieser Umstand kann durch Charakterisierungsfaktoren abgebildet werden (Abbildung 16).

Durch die Multiplikation der auf Einzugsgebiete zugeordneten Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland mit den Charakterisierungsfaktoren wird den Beiträgen entsprechend ihrer potenziellen Wirkung eine höhere oder geringere Bedeutung zugemessen. Die Ergebnisse können dann für jede Region aggregiert werden und ermöglichen so eine wirkungsorientierte Auflistung der Beiträge (Abbildung 44).

Gegenüber der in Abbildung 22 dargestellten rein volumetrischen Betrachtung gewinnen bspw. die Regionen Mittlerer Osten, Spanien, Afrika, Mexiko und Griechenland an Bedeutung. Die Region Asien und Pazifik verliert gegenüber den Regionen Mittlerer Osten und Spanien zwar an Bedeutung, behält aber insgesamt eine große Bedeutung. Im wesentlichen entsprechen die Regionen mit den höchsten Beiträgen zum Wasserfußabdruck von Deutschland in Bezug auf die Überschreitung lokaler Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten den in Abbildung 42 dargestellten Hotspots. Nicht-Hotspots Regionen wie bspw. Deutschland, Niederlande und Polen verlieren an Gewicht gegenüber Abbildung 22.

Abbildung 44: Regionale Beiträge zum Wasserfußabdruck in Bezug auf die Überschreitung lokaler Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten

Die fünfzig Länder und Regionen mit den höchsten Beiträgen zum Wasserfußabdruck von Deutschland in Bezug auf die Überschreitung lokaler Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten in Mio. m³ charakterisiert.



Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-WF-Blau-Regionen-Produktionsbasiert-Gewichtet.xlsx*

Quelle: Eigene Darstellung, Fachgebiet für Sustainable Engineering der Technischen Universität Berlin

4.2.5 Online-Tool

Der im Forschungsvorhaben angenäherte konsuminduzierte blaue, graue⁴⁵ und grüne Wasserverbrauch Deutschlands kann online über ein Tool exploriert werden (Abbildung 45). Das Tool ermöglicht eine differenzierte Darstellung von blauen, grauen und grünen Wasserflüssen sowie aller in der Exiobase hinterlegten Sektoren. Wird als Sektor „Alle“ ausgewählt, ermöglicht ein Klick auf eine der Regionen die Auflistung der Sektoren mit den höchsten Beiträgen zum gesamten Wasserelexport der ausgewählten Region. Zusätzlich werden die wichtigsten Wasserflüsse in einem Kreisring-Diagramm abgebildet.

Abbildung 45: Online-Tool

Die Ergebnisse für den gesamten konsuminduzierten Wasserverbrauch durch die Endnachfrage von Deutschland in der Exiobase-Datenbank 3.8.1 im Online-Tool.



Quelle: <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/wf-tools/wf-deu-exiobase> (abgerufen am 27.05.2021)

⁴⁵ Nur Agrargüter (siehe Abschnitt 3.2.1)

4.2.6 Deutschlands Wasserverbrauch durch Konsum im Ausland

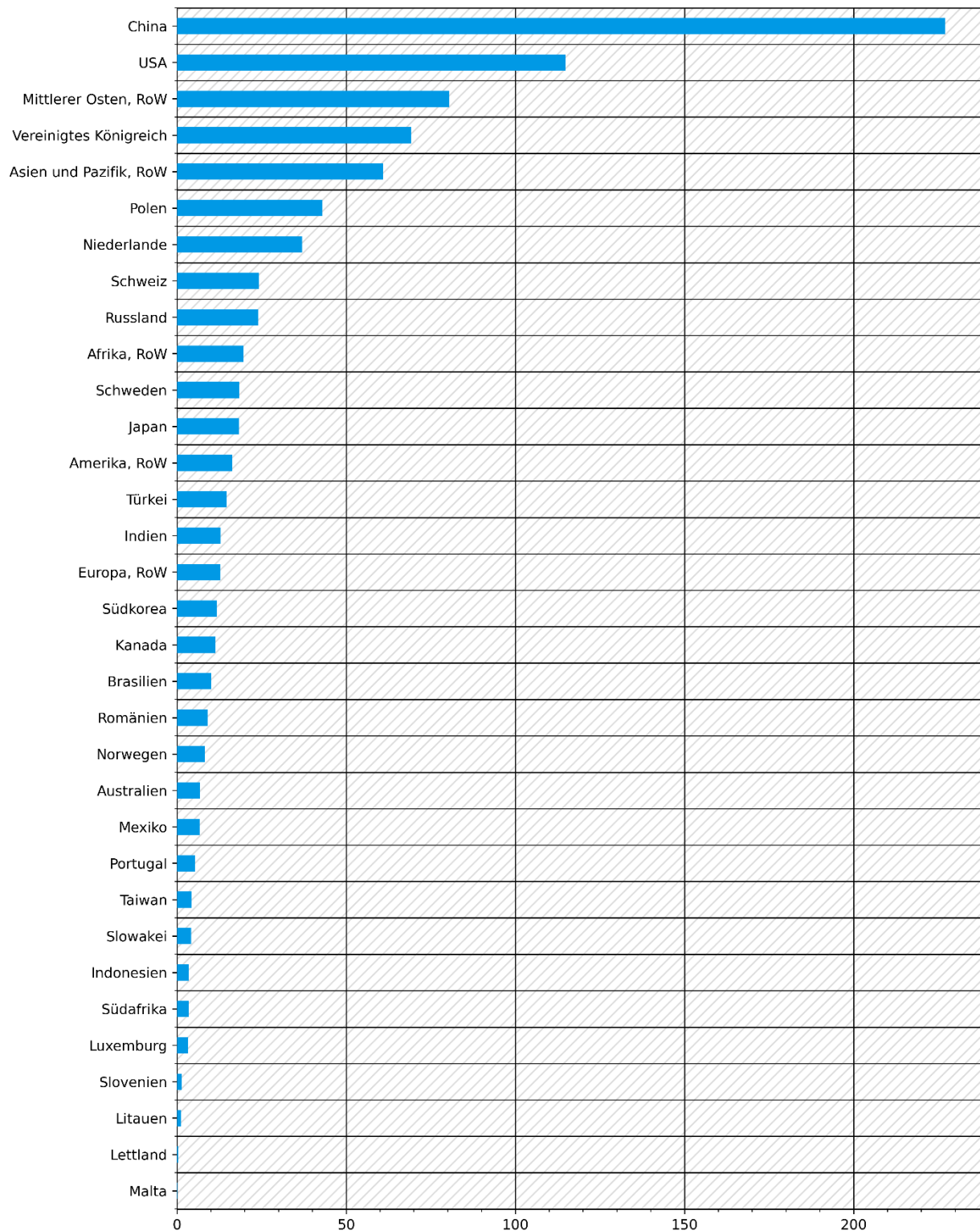
Ebenso wie Konsum in Deutschland in anderen Regionen Wasserverbrauch verursacht, verursacht auch Konsum in anderen Regionen Wasserverbrauch in Deutschland. Bei Deutschlands Exporten handelt es sich in erster Linie um industrielle Erzeugnisse wie bspw. Autos, Autokomponenten, Maschinen, aber auch Pharmaprodukte. Blauwasserintensive landwirtschaftliche Erzeugnisse werden vergleichsweise wenig exportiert bzw. mehrheitlich werden Deutschlands Agrarerzeugnisse nicht bewässert und haben daher keinen blauen Wasserverbrauch (OECD.world, n.d.).

Tendenziell induziert der Konsum in den Regionen Wasserverbrauch in Deutschland, mit denen Deutschland viel Handel betreibt bspw. China, USA, Mittlerer Osten, Vereinigtes Königreich, Asien und Pazifik, Polen, Niederlande, Schweiz und Russland (Abbildung 46). Durch die Aggregation mehrerer Länder tendieren die RoW-Regionen zu einem höheren Rang (siehe Abschnitt 4.2.3.2.1). Abbildung 47 zeigt diesen durch Konsum im Ausland induzierten blauen Wasserverbrauch in Deutschland nach Sektoren. Die Sektoren mit den höchsten Beiträgen sind Chemikalien unspezifisch, Elektrizität aus Kohle, Vieh, Elektrizität aus Kernkraft und Nutzpflanzen unspezifisch.

Abbildung 47 zeigt ausdrücklich nicht den höchsten Wasserverbrauch in Deutschland per Sektor per se. Es ist bspw. denkbar, dass die Elektrizitätssektoren in Deutschland insgesamt den höchsten konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch haben. Wenn die erzeugte Elektrizität aber mehrheitlich in Deutschland konsumiert wird, wird der dadurch induzierte Wasserverbrauch in diesem Abschnitt und den dazugehörigen Abbildungen nicht berücksichtigt.

Abbildung 46: Deutschlands Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch im Ausland

Die Abbildung zeigt die Beiträge Deutschlands zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch im Ausland nach Zielregion in Mio. m³.

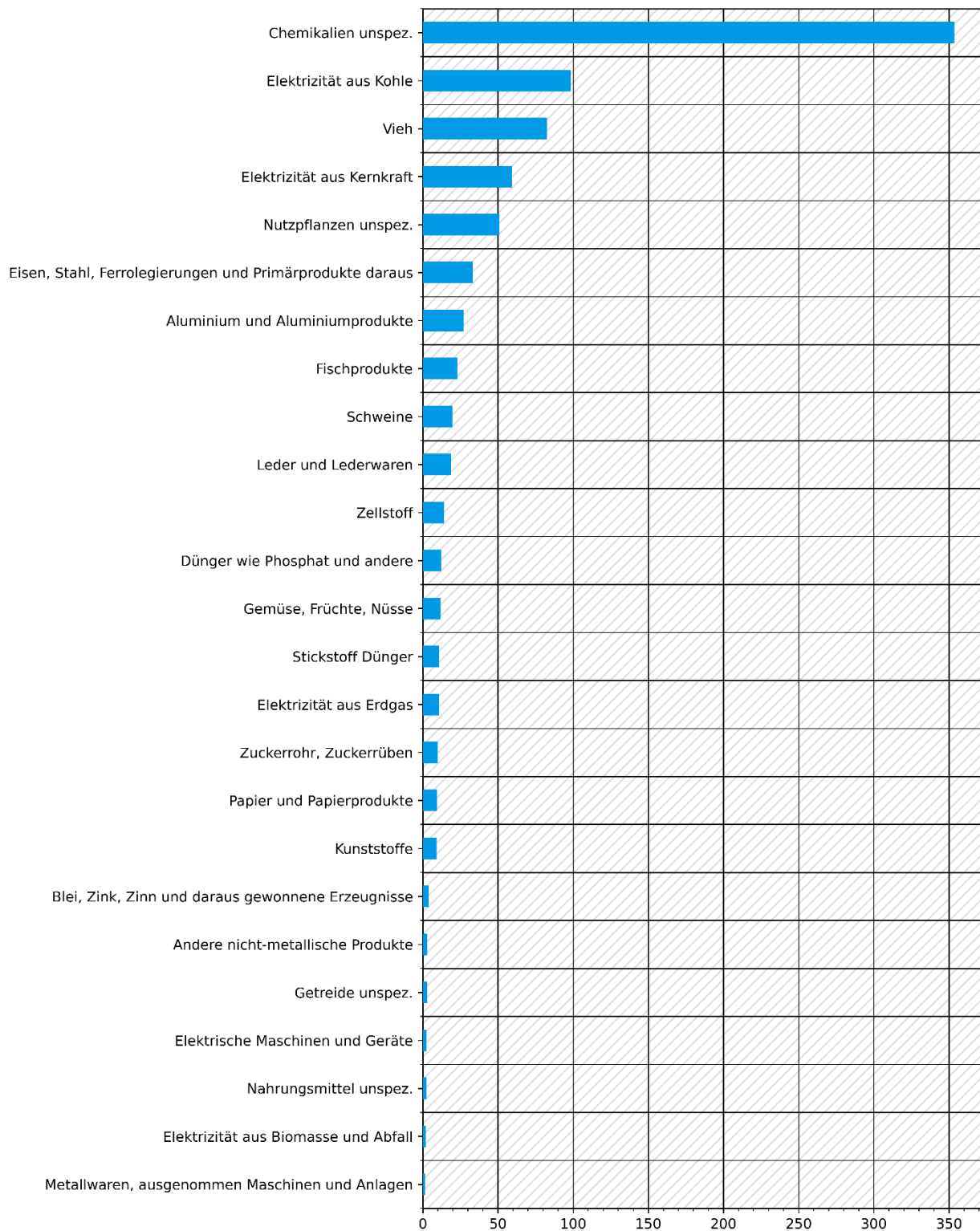


Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-WF-Blau-Exporte-Regionen.xlsx*

Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 47: Deutschlands Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch im Ausland nach Sektor

Die Abbildung zeigt die Beiträge Deutschlands zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch im Ausland nach beitragendem Sektor in Mio. m³.



Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-WF-Blau-Exporte-Sektoren-Aggregiert.xlsx*

Quelle: Exiobase-Datenbank

5 Vorschlag für Indikatoren zur Erfassung des Wasserfußabdrucks von Deutschland

Gemäß der Norm DIN EN ISO 14046 der Internationalen Organisation für Normung (ISO)⁴⁶ ist ein Wasserfußabdruck definiert als „Kennzahl(en) zur quantitativen Bestimmung der potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser“. Eine (*umfassende*) Wasserfußabdruck-Studie darf gemäß DIN EN ISO 14046 nur dann als solche bezeichnet werden, wenn „alle bedeutenden potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser [...] berücksichtigt werden“. Entsprechende Wirkungskategorien zur Erfassung der potenziellen Umweltwirkungen sind der Wasserfußabdruck bezogen auf die Verfügbarkeit von Wasser oder Wasserknappheit, Gewässereutrophierung, Ökotoxizität (terrestrisch und aquatisch) und Gewässerversauerung. Wenn nicht alle bedeutenden potenziellen Umweltwirkungen erfasst werden, handelt es sich gemäß DIN EN ISO 14046 um einen „nicht umfassenden Wasserfußabdruck“, der als solcher und mit einer näheren Bestimmung ausgewiesen werden muss (bspw. „Wasserfußabdruck bezogen auf Wasserknappheit“). Bei ISO-konformer Berichterstattung der Ergebnisse einer Wasserfußabdruck-Studie muss zusätzlich zu den potenziellen Umweltwirkungen außerdem das Sachbilanzergebnis (Verbrauchsmenge) kommuniziert werden.

In Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 14046 zum Wasserfußabdruck und vor dem Hintergrund der Priorisierung von Umweltwirkung werden zur Erfassung des Wasserfußabdrucks von Deutschland folgende Wirkungskategorien vorgeschlagen (siehe auch Tabelle 3):

- 1) Wasserknappheit
- 2) Wasserverschmutzung

In der Literatur wird der Verbrauch von Bodenfeuchte auch als grüner Wasserfußabdruck bezeichnet. Da Indikatoren für den grünen Wasserfußabdruck in der Exiobase-Datenbank hinterlegt sind, wurden die entsprechenden Ergebnisse im vorliegenden Bericht als Zusatzinformation aufgenommen. Da die ökologische Aussagekraft des grünen Wasserfußabdrucks gering ist, wird keine entsprechende Wirkungskategorie vorgeschlagen.

Die vorgeschlagenen Wirkungskategorien sollten mit wirkungsorientierten Indikatoren abgebildet werden. Die wissenschaftliche Entwicklung entsprechender Charakterisierungsmodelle ist aber noch nicht abgeschlossen. Daher werden im folgenden Leitindikatoren und Hilfsindikatoren definiert. Leitindikatoren bilden die Wirkungskategorie bereits mit akzeptabler Robustheit wirkungsorientiert ab. Bei der Wasserknappheit stehen auch operativ anwendbare Modelle und Daten zur Verfügung, um den vorgeschlagenen Leitindikator heranzuziehen. Bei der Wasserknappheit wäre der volumetrische Wasserfußabdruck ein Hilfsindikator, der aufgrund der Anwendbarkeit des Leitindikators aber eigentlich nicht mehr notwendig ist. Bei der Wasserverschmutzung sind zwar einige Leitindikatoren wie z.B. verschiedene Wasserqualität-Indizes definiert worden. Sie sind aber heute methodisch und bezüglich der Datenlage noch nicht robust anwendbar. Deshalb muss hier noch auf einen Hilfsindikator wie den grauen Wasserfußabdruck zurückgegriffen werden. Aufgrund der

⁴⁶ ISO. (2014): Environmental Management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines (ISO 14046:2014).

methodischen Defizite dieses Hilfsindikators sollte er durch robustere Leitindikatoren ersetzt werden, sobald es der wissenschaftliche Fortschritt erlaubt.

Tabelle 3: Indikatorenvorschlag

Die Tabelle zeigt die vorgeschlagenen Leit- und Hilfsindikatoren zur Erfassung des konsuminduzierten Wasserfußabdrucks von Deutschland.

Wirkungskategorie	Indikatoren	Qualität	Quantifizierung	Anmerkung
Wasserknappheit	Knappheitsgewichteter Wasserfußabdruck ⁴⁷	<u>Leitindikator</u> Wirkungsindikator mit hoher Aussagekraft; Anwendbarkeit gegeben;	Wassermenge [Volumen ⁿ Gewichtet]	Im Kontext nationaler Ressourcenberichterstattung anwendbar: Charakterisierung bspw. über das im vorliegenden Forschungsvorhaben entwickelte Charakterisierungsmodell oder andere Charakterisierungsmodelle wie bspw. AWARE oder WAVE+.
Wasserknappheit	Volumetrischer Wasserfußabdruck	<u>Hilfsindikator</u> Inventargröße mit geringer Aussagekraft; Anwendbarkeit gegeben;	Wassermenge [Volumen]	Im Kontext nationaler Ressourcenberichterstattung anwendbar: Entwicklung von Umwelterweiterungen für Input-Output-Analyse über globale hydrologische Modelle (bspw. WaterGAP oder LPJmL) oder sektorspezifische Datenbanken wie bspw. FAOSTAT. Industrieller Wasserverbrauch ist jedoch nur schwer aufzuschlüsseln.
Wasserverschmutzung	Wasserverschmutzung in verschiedenen Wirkungskategorien	<u>Leitindikator(en)</u> Naturwissenschaftliche Wirkungsindikatoren mit hoher Aussagekraft; Anwendbarkeit nicht gegeben;	Wasserverschmutzungsindex • Gewässereutrophierung [kg PO ₄ eq] • Ökotoxizität (aquatisch und terrestrisch) [kg 1,4-dichlorobenzene eq.] • Gewässerversauerung [kg SO ₂ eq.]	Im Kontext nationaler Ressourcenberichterstattung nicht anwendbar: Die Verfügbarkeit globaler Datensätze zur regionalen Emission wasserverschmutzender Substanzen ist nicht gegeben.
Wasserverschmutzung	Grauer Wasserfußabdruck	<u>Hilfsindikator</u> Gewichtung über Grenzwerte; Geringe Aussagekraft; Anwendbarkeit mit Einschränkungen gegeben;	Wassermenge [Volumen]	Im Kontext nationaler Ressourcenberichterstattung eingeschränkt anwendbar: Globale Datensätze existieren, bilden aber nur einzelne Schadstoffeinträge ab (i.d.R. Phosphor oder Stickstoff).

⁴⁷ Water Scarcity Footprint

5.1 Anwendbarkeit und Limitierungen der Indikatoren

Die vorgeschlagenen Indikatoren zur Erfassung des Wasserfußabdrucks von Deutschland sind angelehnt an die Norm DIN EN ISO 14046. Sie beschreiben die nach wissenschaftlicher Kenntnis empfohlene Berichterstattung eines Wasserfußabdrucks.

Die Ergebnisse im vorliegenden Bericht weichen teilweise von der empfohlenen Berichterstattung ab. Der Grund hierfür sind Diskrepanzen zwischen dem, was auf Grundlage verfügbarer Daten erhoben werden kann und was nach Stand der Wissenschaft erhoben werden sollte. Demnach ist es nicht immer möglich, die von der Norm DIN EN ISO 14046 intendierte Berichterstattung vollumfänglich zu erfüllen. Dieser Umstand betrifft insbesondere den Indikator Wasserverschmutzung.

Im Folgenden werden daher die vorgeschlagenen Indikatoren allgemein und auch vor dem Hintergrund der präsentierten Ergebnisse kurz diskutiert.

5.1.1 Wasserfußabdruck in Bezug auf Wasserknappheit

Zur Ermittlung der potenziellen Umweltwirkungen durch den Wasserverbrauch von Deutschland (*Wasserfußabdruck*) wird der knappheitsgewichtete Wasserfußabdruck als Leitindikator vorgeschlagen. In Anlehnung an das Konzept der Planetaren Grenzen wurden die Inventarergebnisse (blauer Wasserfußabdruck) im vorliegenden Bericht gemäß der Überschreitung der Belastbarkeitsgrenzen im Herkunft-Einzugsgebiet charakterisiert. Denkbar ist aber auch eine Charakterisierung mit der Konsensmethode des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) und der Gesellschaft für Umwelttoxikologie und -Chemie (SETAC) AWARE (Boulay et al. 2018) oder WAVE+ (Berger et al. 2018).

Während der Fokus der im vorliegenden Bericht angewandten Methode ausschließlich der Überschreitung der Nutzungsgrenzen in Einzugsgebieten ist, charakterisiert die AWARE-Methode Inventarergebnisse nach ihrem Potenzial, Ökosysteme oder Menschen den Zugang zu Wasser zu verwehren. Die WAVE+-Methode charakterisiert Inventarergebnisse nach der Anfälligkeit eines Einzugsgebiets für Übernutzung der lokalen Wasserressourcen und berücksichtigt außerdem die Rückführung von evaporiertem Wasser über Niederschlag in das Herkunftseinzugsgebiet („atmosphärisches Recycling“). Bei AWARE handelt es sich damit um eine *demand-to-availability* (DTA) Methode und bei WAVE+ um eine *consumption-to-availability* (CTA) Methode.

5.1.2 Wasserfußabdruck in Bezug auf Wasserverschmutzung

Zur Erfassung der Wasserverschmutzung werden wirkungsorientierte Wasserqualitäts-Indikatoren vorgeschlagen. Nach wissenschaftlichem Erkenntnisstand sind dies Gewässereutrophierung, Ökotoxizität (aquatisch und terrestrisch) und Gewässerversauerung.

5.1.2.1 Grauer Wasserfußabdruck

Aufgrund mangelnder Daten zur Berechnung der vorgeschlagenen Wasserqualitäts-Indikatoren auf globaler Ebene konnten diese im vorliegenden Bericht nicht bestimmt werden. Stattdessen wurde Wasserverschmutzung provisorisch und konsistent mit den Indikatoren für blaues und grünes Wasser über den Indikator *graues* Wasser abgebildet.

„[Der Graue Wasserfußabdruck] ist ein Indikator für die Verunreinigung von Süßwasser, die mit der Herstellung eines Produkts [...] in Verbindung gebracht werden kann. Er ist definiert als die Menge an Süßwasser, die erforderlich ist, um die Verunreinigung [...] aufzunehmen [bzw.] um

Verunreinigung so weit zu verdünnen, dass die Wasserqualität mit etablierten Richtlinien übereinstimmt“ (Hoekstra et al. 2012).

Der graue Wasserfußabdruck konnte ausschließlich für den Sektor Landwirtschaft bestimmt werden. Die Daten basieren auf Mekonnen und Hoekstra (2011) und berücksichtigen ausschließlich den Stickstoffeintrag. Die vorliegenden Ergebnisse für Wasserverschmutzung können somit der Orientierung dienen, sind aber ausdrücklich nicht umfassend und werden somit auch nicht als Grundlage für Politikgestaltung empfohlen⁴⁸. Auch eine Verwendung des Indikators *grauer Wasserfußabdruck* unter Berücksichtigung mehrerer Schadstoffeinträge wird aufgrund seiner Undifferenziertheit nicht oder nur bedingt empfohlen. Uneingeschränkt empfohlen werden kann ausschließlich ein differenzierter Wasserqualitätsindex mit mehreren Subindikatoren (siehe Abschnitt 7.2).

5.2 Möglichkeiten der Zielableitung

Für die Operationalisierung der in Tabelle 3 vorgeschlagenen Indikatoren und zur Ableitung von Zielwerten und Handlungsmöglichkeiten sind mehrere Möglichkeiten denkbar.

5.2.1 Direkte Zielableitung

Die naheliegendste Möglichkeit der Zielableitung ergibt sich aus den in Tabelle 3 vorgeschlagenen Indikatoren selbst z.B. die Reduktion des Wasserfußabdrucks um X % gegenüber dem Jahr Y bis zum Jahr Z.

Eine solch einfache Betrachtung sollte allerdings beachten, dass der Wasserfußabdruck durch Schwankungen der Bevölkerungszahl und des Konsums Schwankungen unterliegt. Darüber hinaus kann sich der Wasserfußabdruck ändern, ohne dass Maßnahmen getroffen werden. Dies kann der Fall sein, wenn sich Nutzungseffizienzen in Exportländern oder Strukturen in den globalen Lieferketten verändern.

5.2.2 Zielableitung analog zu ProgRess

In Anlehnung an ProgRess (BMUB, 2016) könnte analog zur Gesamtrohstoffproduktivität ein Indikator für die Gesamtwasserproduktivität gebildet werden. Hierbei werden die in Tabelle 3 vorgeschlagenen Indikatoren mit dem BIP ins Verhältnis gesetzt. Zielvorgaben können entsprechend ProgRess abgeleitet werden (Erhöhung der Wasserproduktivität um X% gegenüber Jahr Y).

$$\text{Gesamtrohstoffproduktivität} = \frac{BIP + \text{Importe}}{RMI_{inkl.Biotik}}$$

$$\text{Gesamtwasserproduktivität} = \frac{BIP + \text{Importe}}{\text{Wasserverbrauch}_{Gewichtet}}$$

BIP: Bruttoinlandsprodukt

DMI: Direkter Materialeinsatz (Direct Material Input)

⁴⁸ Siehe Anmerkungen zum grauen Wasserverbrauch im vorliegenden Bericht (Abschnitt 3.2.1).

RMI: Primärrohstoffeinsatz (Raw Material Input)

Hierfür gelten ähnliche Unsicherheiten wie in der ersten Option – allerdings werden wirtschaftliche Schwankungen durch die Integration des BIP berücksichtigt. Denkbar wäre es auch, diesen Ansatz gezielt auf spezifische Sektoren, Produktgruppen oder Produkte anzuwenden (bspw. Lebensmittel, Textilien, etc.).

5.2.3 Zielableitung mit Fokus auf wasserknappe Regionen

Aus dem Forschungsvorhaben geht hervor, dass Deutschland über den Konsum Wasserverbrauch in Regionen und Einzugsgebieten weltweit induziert. Ein signifikanter Anteil dieses konsuminduzierten Wasserverbrauchs trägt mit großer Sicherheit dazu bei, die Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten zu übernutzen. Schwerpunkt für Maßnahmen zur Reduktion des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland sollten die Herkunftsregionen sein, die in besonderem Maße von der Übernutzung lokaler Belastbarkeitsgrenzen betroffen sind. Eines der Ziele könnte also darin bestehen, den konsuminduzierten Wasserverbrauch gezielt in den Regionen zu reduzieren, die von der Übernutzung lokaler Belastbarkeitsgrenzen betroffen sind.

Der knappheitsgewichtete Wasserfußabdruck ergibt sich aus der Konsummenge multipliziert mit der verbrauchten Menge an Wasser pro Konsumgut und der Multiplikation mit einem Charakterisierungsfaktor. Da die Charakterisierungsfaktoren auf objektiven und wissenschaftlich erarbeiteten Kriterien beruhen, kann hier kein Interventionspunkt zur Reduktion sein. Als mögliche Interventionspunkte bleiben damit nur eine Reduktion der Konsummenge wasserintensiver Güter, die Reduktion der Wasserintensität pro Konsumgut oder eine Kombination aus beiden Interventionsmöglichkeiten.

Da aus den vorliegenden Arbeitsergebnissen hervorgeht, dass ein erheblicher Anteil des knappheitsgewichteten konsuminduzierten Wasserverbrauchs aus Flusseinzugsgebieten mit einem niedrigen mittleren Einkommen importiert wird, sollten sozioökonomische Auswirkungen von Interventionen unbedingt berücksichtigt werden. So kann eine Reduktion von Importmengen oder sogar ein Import-Stop von wasserintensiven Gütern aus wasserknappen Regionen drastische Auswirkungen auf die lokale Wirtschaft und Bevölkerung haben. Daher sollten Existenzgrundlagen gesichert oder alternative Existenzgrundlagen aufgebaut werden. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wird der Aufbau von Kapazitäten zur Wassereffizienzsteigerung durch Anreizsysteme oder Technologietransfer empfohlen. Da im vorliegenden Forschungsvorhaben aber keine Daten zum Wasserverbrauch von einzelnen Konsumgütern erhoben werden konnte, können hierzu keine spezifischen Empfehlungen formuliert werden.

6 Limitierungen der vorliegenden Studie

Die im vorliegenden Bericht zusammengefassten Ergebnisse sind vor dem Hintergrund einiger Limitierungen zu interpretieren. So handelt es sich bei den Ergebnissen bspw. ausdrücklich nicht um empirisch erhobene Daten und damit auch in keinem Fall um ein fehlerfreies Abbild von Deutschlands tatsächlichem Wasserverbrauch. Die Ergebnisse sind durch methodische (bspw. Proportionalitätsannahme; siehe Abschnitt 3.2.5.1) und datenbedingte Einschränkungen (bspw. Satellitenkonten sowie sektorale und regionale Auflösung) in ihrer Aussagekraft limitiert.

Tendenziell steigt die durch die Proportionalitätsannahme⁴⁹ bedingte Unschärfe mit abnehmender sektoraler Auflösung. Da die Satellitenkonten der Eora-Datenbank für Wasser fehlerhaft sind (Abschnitt 3.2.5.1) und eine Erarbeitung neuer Satellitenkonten für Wasser für die Eora-Datenbank aufgrund der heterogenen sektoralen Auflösung und des damit verbundenen Arbeitsaufwands im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht möglich war, musste mit einer anderen Datenbank gearbeitet werden. Zur Auswahl stand die Exiobase-Datenbank mit einer höheren sektoralen Auflösung und die Eora26-Datenbank mit einer höheren regionalen Auflösung. Schlussendlich wurde die geringe sektorale Auflösung der Eora26-Datenbank für die Analyse von konsuminduziertem Wasserverbrauch als ungenügend eingestuft und im Gegenzug die geringere regionale Auflösung der Exiobase-Datenbank toleriert (Abschnitt 3.2.5).

Die Ergebnisse aus der Exiobase-Datenbank sollten stets kritisch betrachtet werden. Gemäß der nativen Satellitenkonten für Wasser der Exiobase-Datenbank v3.8.1 stellen einige wenige Sektoren einen erheblichen Anteil am gesamten weltweiten Wasserverbrauch. Die 50 aus insgesamt 9.800 Sektoren mit den höchsten Werten für sektoralen blauen Wasserverbrauch, unabhängig vom konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland, tragen gemäß Exiobase-Datenbank alleine 87% des weltweiten gesamten blauen Wasserverbrauchs bei. Allein der Sektor *Getreide* in der Region Indien trägt 10,6% zum gesamten weltweiten blauen Wasserverbrauch bei (Tabelle 4). Der blaue Wasserverbrauch dieser Sektoren wird auf den einzelnen Produktionsebenen auf die nachgeschalteten Sektoren aufgeteilt und ist dabei dominant. Dieser Befund geht aus der strukturellen Pfadanalyse hervor und ist deutlich erkennbar bspw. bei der Analyse des Sektors *Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger* in der Region Deutschland. Die Sektoren, die über die Wertschöpfungskette hohe Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors beitragen, sind Sektoren, die gemeinhin mit dem Sektor *Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger* assoziiert würden wie bspw. Elektrizität, Eisen, Stahl, Gummi, Kunststoffe, Metallwaren oder Maschinen (Abbildung 66). Der Wasserverbrauch, der durch diese Sektoren beigetragen wird, ergibt sich aber mehrheitlich durch Zuckerpflanzen, Reis und Weizen (Abbildung 67).

Der Befund von dominierenden Sektoren legt die Vermutung nahe, dass auch der gesamte blaue Wasserverbrauch vieler Sektoren durch einige besonders wenige blauwasserintensive Sektoren dominiert wird. Die Beobachtung ist in besonderem Maße auffällig beim Sektor *Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger* in der Region Deutschland (Abbildung 66). Über die Wertschöpfungskette tragen Sektoren zum gesamten blauen Wasserverbrauch des Sektors bei, die gemeinhin wohl mit der Automobilindustrie assoziiert werden wie bspw. Aluminium, Elektrizität, Eisen, Stahl, Kunststoffe, Metallwaren und Maschinen. Die in Abbildung 67 dargestellte Zusammensetzung des gesamten blauen Wasserverbrauchs des Sektors zeigt aber, dass der blaue Wasserverbrauch für die Bereitstellung von Agrarprodukten (Weizen, Reis und Zucker) den mit Abstand höchsten Beitrag am gesamten blauen Wasserverbrauch des Sektors

⁴⁹ Proportionalitätsannahme bedeutet, dass alle Sektoren oder Konsumierenden jeweils aus allen anderen Sektoren die gleichen relativen Anteile an Gütern konsumieren (siehe Abschnitt 3.2.5.1).

hat (noch vor bspw. Eisen und Stahl). Dieses Ergebnis verstetigt die Vermutung, dass die Werte für blauen Wasserverbrauch der Agrarsektoren alle Wertschöpfungsketten dominieren. Die monetären Flüsse der Exiobase erscheinen von der allgemeinen Erwartungshaltung her plausibel. Die mit den monetären Flüssen einhergehenden Werte zum blauen Wasserverbrauch hingegen erscheinen nicht unbedingt plausibel. Daraus ergeben sich zwei Optionen. Entweder konventionelle Erwartungshaltungen zum Wasserverbrauch müssen überdacht werden oder EE-IO kann aufgrund limitierter sektoraler Auflösung gepaart mit methodisch inhärenten Limitierungen durch die Proportionalitätsannahme (Abschnitt 3.2.5.1) nur bedingt virtuelle Wasserflüsse (ggf. auch für andere Indikatoren) darstellen.

Weiterhin wurde die durch Konsum in Deutschland induzierte Wasserverschmutzung nur für den Agrarsektor abgebildet. Alternativ könnten aus den in der Exiobase hinterlegten nativen Satellitenkonten für Phosphor- und Stickstoffemissionen Indikatoren für graues Wasser entwickelt werden (Abschnitt 3.2.1). Um aber einen vollumfänglichen Wasserfußabdruck zu berechnen, müssten Satellitenkonten für die Wirkungskategorien Gewässereutrophierung, Ökotoxizität (aquatisch und terrestrisch) und Gewässerversauerung entwickelt werden. In der Praxis müssten also global alle Umweltflüsse, welche zu dieser Wirkungskategorien beitragen, regional differenziert erfasst oder angenähert werden und in Satellitenkonten für die Exiobase-Datenbank hinterlegt werden.

Da es sich nur um eine modellhafte Annäherung handelt und empirisch erhobene Daten nicht existieren, kann dem Befund keine eindeutige Fehlerhaftigkeit nachgewiesen werden. Die Frage nach der Plausibilität einiger Ergebnisse insbesondere in Bezug auf die Dominanz einiger weniger Sektoren am Anteil des blauen Wasserverbrauchs anderer Sektoren drängt sich aber auf. Die FAOSTAT-Datenbank bspw. weist für Weizen aus Indien für den Zeitraum 2015 bis einschließlich 2019 einen Exportanteil von lediglich <1% auf⁵⁰. Zwar kann das im Weizenanbau in Indien verbrauchte Wasser theoretisch auch über andere Zwischen- oder Konsumgüter virtuell exportiert werden, dass in der Exiobase-Datenbank gegebene Ausmaß erscheint aber extrem. Gleichzeitig kann aber auch nicht davon ausgegangen werden, dass die Robustheit der Daten in der FAOSTAT-Datenbank höher sind als die Robustheit der Satellitenkonten der Exiobase-Datenbank. Die Diskrepanz verdeutlicht aber, dass die Ergebnisse in jedem Fall kritisch betrachtet werden sollten.

Tabelle 4: Der gesamte blaue Wasserverbrauch einzelner Sektoren

Die Tabelle zeigt den gesamten absoluten Wasserverbrauch ausgewählter Sektoren und der entsprechende Anteil am gesamten weltweiten blauen Wasserverbrauch in den Satellitenkonten für Wasser der Exiobase-Datenbank unabhängig von der Endnachfrage einer Region. Demnach hat bspw. der Sektor *Weizen* in der Region Indien einen Anteil am weltweiten blauen Wasserverbrauch von 10,6%. Alle dargestellten Sektoren zusammen verursachen 75% des weltweiten blauen Wasserverbrauchs.

	Sektor	Blauer Wasserverbrauch [Mio. m ³]	Blauer Wasserverbrauch [%]
IN	Weizen	195.577	10,6
IN	Reis	134.090	7,3
CN	Weizen	120.848	6,5
CN	Reis	101.411	5,5

⁵⁰ Siehe Zusatzmaterial *FAOSTAT-Export-Quantity-2021-06-08 09_49_24.png* und *FAOSTAT-Production-Quantity-2021-06-08 09_49_10.png*

	Sektor	Blauer Wasserverbrauch [Mio. m³]	Blauer Wasserverbrauch [%]
IN	Zuckerrohr, Zuckerrüben	85.034	4,6
IN	Nutzpflanzen unspezifisch	84.030	4,5
WM	Gemüse, Früchte, Nüsse	70.959	3,8
WA	Reis	58.942	3,2
WA	Nutzpflanzen unspezifisch	52.364	2,8
US	Nutzpflanzen unspezifisch	52.093	2,8
WA	Weizen	42.893	2,3
WM	Weizen	37.521	2,0
CN	Kunststoffe	36.323	2,0
IN	Ölsamen	35.537	1,9
IN	Gemüse, Früchte, Nüsse	32.491	1,8
WM	Getreide unspezifisch	28.228	1,5
US	Getreide unspezifisch	28.210	1,5
WA	Gemüse, Früchte, Nüsse	28.017	1,5
CN	Eisen, Stahl, Ferrolegierungen und Primärprodukte daraus	27.845	1,5
WA	Zuckerrohr, Zuckerrüben	25.036	1,4
WM	Nutzpflanzen unspezifisch	23.109	1,3
ID	Reis	22.337	1,2
CN	Getreide unspezifisch	20.771	1,1
WM	Reis	17.756	1,0
US	Ölsamen	17.428	0,9
		Σ 1.378.850	Σ 75

Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-Anteile-Satelliten.xlsx*.

Die aufgeführten Limitierungen bei der Zuordnung des Wasserverbrauchs innerhalb der Datenbank beeinflussen auch die Zuordnung des konsuminduzierten blauen Wasserverbrauchs von Deutschland auf Einzugsgebiete. Die Allokation selber wurde zwar konsumbasiert auf Grundlage des globalen hydrologischen Modells WaterGAP3 durchgeführt, die allokierten Mengen aber resultieren aus der Exiobase-Datenbank. Insgesamt ist die Zuordnung lediglich als Approximation zu verstehen und ist maßgeblich durch die Beiträge einzelner Regionen zum Wasserverbrauch von Deutschland auf Grundlage der EE-IO Analyse und Exiobase-Datenbank beeinflusst. Ein Nachteil der geringen sektoralen Auflösung der Exiobase-Datenbank ist, dass die Hotspots für blauen Wasserverbrauch in aggregierten Weltregionen zusammengefasst sind, was die Unschärfe der Zuordnung auf Einzugsgebiete potenziell erhöht.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der Wasserverbrauch in der verwendeten Datenbank über monetäre Werte abgebildet wird (bspw. $0,5\text{m}^3$ blauer Wasserverbrauch pro 1€ Endnachfrage aus dem Sektor X). Die mit monetären Werten einhergehende Konsummenge kann aber variieren. So kann z.B. ein 1kg Weizen für nahezu einen beliebigen Wert erworben werden z.B. 1€ oder 2€. Mit 2€ Konsum wären in der Input-Output-Rechnung im Vergleich zu 1€ Konsum die doppelten Umweltwirkungen verbunden. Alternativ könnten auch physische Güterströme ausgewertet werden. Der Vorteil dieses Ansatzes läge in erster Linie darin, dass durch den Verzicht der Umwandlung von physisch gehandelten Gütern in monetäre Warenströme keine zusätzliche Unschärfe eingeführt würde. Auf der anderen Seite ergeben sich aber auch Herausforderungen in der Datenerhebung, sodass die Entwicklung einer entsprechenden IO-Datenbank für die gesamte Weltwirtschaft mittelfristig vermutlich nicht realisierbar ist.

7 Diskussion und Fazit

7.1 Der konsuminduzierte Wasserverbrauch und Wasserfußabdruck von Deutschland

Mit der im Forschungsvorhaben angewendeten Methode konnte der konsuminduzierte Wasserverbrauch von Deutschland modellhaft auf insgesamt 219 Mrd. m³ angenähert werden. Diese Menge entspricht in etwa einem täglichen Pro-Kopf-Verbrauch von 7,2 m³. Die Herkunftsregion des verbrauchten Wassers ist zu 14% Deutschland (Wasserverbrauch im Inland) und zu 86% das Ausland (Wasserverbrauch im Ausland; Tabelle 2). Der Wasserverbrauch von Deutschland im Inland setzt sich zu 75% aus grünem Wasser, zu 21% aus grauem Wasser und zu 4% aus blauem Wasser zusammen. Der Wasserverbrauch von Deutschland im Ausland setzt sich zu 83% aus grünem Wasser, zu 6% aus grauem Wasser und zu 11% aus blauem Wasser zusammen (Abbildung 20).

Da blaues Wasser für die Menschen von besonderer Bedeutung ist, wurde der Anteil des konsuminduzierten blauen Wasserverbrauchs detailliert analysiert. So wurden bspw. die Herkunftsregionen (Abbildung 21) und die beitragenden Sektoren bestimmt (Abbildung 23 und Abbildung 24). Darüber hinaus wurde der konsuminduzierte blaue Wasserverbrauch von Deutschland auf Einzugsgebiete weltweit zugeordnet (Abbildung 40 und Abbildung 41), über die entwickelten Charakterisierungsfaktoren (Abbildung 16) gewichtet und anschließend zur besseren Kommunizierbarkeit wieder auf Regionen aggregiert (Abbildung 44).

Wenn die regionalen Beiträge zu Deutschlands konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch gewichtet werden, verliert Deutschlands eigener Beitrag zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch an Bedeutung (*Wasserfußabdruck* in Bezug auf Wasserknappheit). Dieser Umstand bedeutet, dass sich die durch den konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland verursachten Umweltwirkungen mutmaßlich mehr in anderen Regionen wie bspw. Mittlerer Osten, Afrika oder den USA manifestieren, als in Deutschland selber (Abschnitt 4.2.4.2). Haupttreiber des absoluten Wasserverbrauchs in diesen Regionen sind in der Regel Agrarsektoren (Abbildung 27).

Regionen, die gemäß der durchgeführten Allokationsmethode große Mengen zu Deutschlands konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch beitragen (Abbildung 41) sind bspw. Asien und Pazifik (Indus, Aral See), Mittlerer Osten (Nil, Shatt Al Arab), China (Yangtze), Spanien (Ebro), Indien (Ganges) und die USA (Mississippi). Schätzungsweise 9,7% der Beiträge zum konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch von Deutschland überschreiten die lokalen Belastbarkeitsgrenzen von Einzugsgebieten (Abschnitt 4.2.4.1; Abbildung 43).

In der angewendeten EE-IO ergibt sich der konsuminduzierte Wasserverbrauch von Deutschland durch den monetären Konsum aus den Sektoren multipliziert mit dem Wasserverbrauch in den Sektoren pro Einheit Output. Daher tendieren Sektoren mit einem hohen Anteil am gesamten Konsum Deutschlands auch zu einem hohen absoluten Beitrag zu Deutschlands konsuminduzierten blauen Wasserverbrauch. Interventionsmöglichkeiten zur Reduktion des konsuminduzierten blauen Wasserverbrauchs von Deutschland mit großer Hebelwirkung bestehen in erster Linie nicht dort, wo die absoluten Wasserverbrauchsmengen hoch sind, sondern in Sektoren, die gleichzeitig auch noch eine hohe Wasserintensität aufweisen. Also bspw. der Anbau von Gemüse, Nüssen und Früchten, aber auch anderen Nutzpflanzen, insbesondere Reis oder Ölsamen. Darüber hinaus bei Sektoren, in denen diese Agrarerzeugnisse verwendet werden, also z.B. Nahrungsmittel sowie Viehzucht und Fleischproduktion (Abschnitt 4.2.3.2.1).

Der blaue Wasserverbrauch in Deutschland selber, der durch den Konsum in anderen Regionen induziert wird, ergibt sich absolut gesehen maßgeblich aus den Sektoren Chemikalien, Elektrizität und Viehhaltung (Abschnitt 4.2.6). Das heißt aber bspw. nicht, dass dieser blaue Wasserverbrauch durch direkte Exporte induziert wurde. Es ist möglich, dass Outputs (Zwischengüter) aus diesen Sektoren innerhalb von Deutschland weiterverarbeitet werden und erst dann eingearbeitet in Konsumgüter von anderen Sektoren exportiert und im Ausland konsumiert werden.

Für alle Befunde treffen jedoch auch die im Abschnitt 6 angemarkten Limitierungen der angewendeten Methodik zu.

7.2 IO-Analyse zur Nationalen Ressourcenberichterstattung

In Bezug auf die Ergebnisse stellt sich auch die Frage nach Anforderungen von EE-IO-Datenbanken für die nationale Ressourcenberichterstattung sowie der Robustheit von auf Grundlage von EE-IO Analyse erzielten Ergebnissen. Insbesondere in Bezug auf Wasser, welches zu großen Anteilen in einigen wenigen, häufig landwirtschaftsbezogenen Sektoren konsumiert wird, kann eine geringe sektorale Auflösung von IO-Datenbanken eine Limitierung darstellen. Dennoch kann eine IO-Analyse als Screening-Tool dienen, um globalen Wasserverbrauch verschiedenen Akteuren in der Weltwirtschaft zuzuordnen. Auf Grundlage dieser Informationen können Wirtschaftsakteure aber auch die breite Öffentlichkeit und Politik informiert werden. Zur Formulierung robuster Handlungsempfehlungen empfiehlt sich für die jeweiligen identifizierten Hotspots aber eine zusätzliche detaillierte Analyse unter Anwendung weiterer Methoden. Eine IO-Analyse eignet sich derzeit in Bezug auf potenzielle Umweltwirkungen ausschließlich für makroökonomische Analysen. Analysen auf Ebene von einzelnen Produkten können mit Ökobilanzstudien bewertet werden.

Auch in der IO-Analyse gilt, dass für einen Wasserfußabdruck, also potenzielle Umweltwirkungen in Zusammenhang mit Wasser, immer ein gewichtetes Ergebnis kommuniziert werden muss. Reine Verbrauchsvolumina gelten gemäß ISO 14046 nicht als Wasserfußabdruck und haben auch keine Aussagekraft in Bezug auf die tatsächliche Umweltwirkung des Wasserverbrauchs. Eine entsprechende Entwicklung von Satellitenkonten für gängige Datenbanken zur erleichterten Anwendung ist denkbar. Solange keine differenzierten Satellitenkonten für Externalitäten in Bezug auf Wasserverschmutzung existieren, kann mit einer IO-Analyse auch kein *vollumfänglicher* Wasserfußabdruck berechnet werden.

Eine der wohl wichtigsten Anforderungen an IO-Datenbanken für eine langfristige und robuste Erfassung des nationalen konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland ist Konsistenz und gesicherte Verfügbarkeit. Gängige IO-Datenbanken werden kontinuierlich fortentwickelt und sind dabei aber nicht immer zwingend abwärtskompatibel. Dieser Umstand kann für langfristige Politikempfehlungen eine Herausforderung darstellen. So wurde beispielsweise im Bericht zur Nutzung natürlicher Ressourcen durch Deutschland von Lutter et al. (2018) mit der Exiobase-Datenbank v3.3 für das Jahr 2011 gearbeitet. Neuere Versionen der Exiobase-Datenbank wie bspw. die Exiobase-Datenbank v3.8.1 umfassen Zeitreihen bis einschließlich 1995. Die Ergebnisse zwischen verschiedenen Datenbankversionen können jedoch signifikant voneinander abweichen. Daher ist es wichtig, dass neue Datenbankversionen *abwärtskompatibel* entwickelt werden. Durch Online-Plattformen wie bspw. Zenodo⁵¹ ist es jedoch wahrscheinlich, die Bereitstellung verschiedener Datenbankversion in Zukunft zuverlässiger und längerfristiger gesichert werden kann.

⁵¹ <https://zenodo.org/> (abgerufen am 22.09.2021)

Aufgrund von methodischen und datenbedingten Einschränkungen kann die EE-IO-Analyse derzeit nur bedingt zur nationalen Berichterstattung empfohlen werden. Zwar können aus den Ergebnissen allgemeine Muster abgeleitet und bedingt auch zur Politikgestaltung erwägt werden. Eine akkurate Erfassung des nationalen Wasserfußabdrucks und die fehlerfreie Beantwortung detaillierter Fragestellungen kann jedoch nicht garantiert werden.

7.3 Kommunikation eines Wasserfußabdrucks für Verbraucherinnen und Verbraucher

Die im vorliegenden Bericht zusammengefassten Ergebnisse machen deutlich, wie stark der Einfluss des Konsums der Deutschen auf die globalen Wasserressourcen ist. Die Kommunikation des Wasserfußabdrucks von Produkten an Verbraucherinnen und Verbraucher ist somit ein wichtiges Instrument, um über Kaufentscheidungen unseren Wasserverbrauch im Ausland und die daraus resultierenden ökologischen und sozialen Konsequenzen zu reduzieren.

Schon die Agenda 21 schlug für bestimmte Industriesektoren Ökolabels zur Förderung nachhaltiger Produktion und nachhaltigem Konsum vor (BMZ, 2017; UN, 2015). Tatsächlich ist laut Statista (2019) die Zahl der Verbraucherinnen und Verbraucher, die bereit sind, für umweltfreundliche Produkte mehr Geld auszugeben, zwischen 2014 und 2018 um fast ein Drittel gestiegen.

Viele Ökolabels adressieren derzeit unterschiedliche Aspekte in Bezug auf Wasser. Während Aspekte der Wasserverschmutzung oft über die Einhaltung konkreter Schadstoffkonzentrationen in die Vergabekriterien eingehen, wird der Wasserverbrauch meist nur qualitativ adressiert. So schreibt z.B. der im Baumwollsektor verbreitete Zertifizierungsstandard Better Cotton Initiative (BCI) unter anderem vor, effiziente Bewässerungspraktiken einzusetzen sowie Bewässerungspläne zu erstellen⁵². Diese Maßnahmen führen zwar in der Theorie zur Senkung der Wasserverluste auf den Feldern, deren reale Effekte sind aber schwer einzuschätzen, da keine Zielwerte für die Effizienzsteigerung vorgegeben werden. Ähnlich wie beim Baumwollanbau, fordert das für Textilprodukte geltende Label Global Organic Textile Standard (GOTS) eine Überwachung des Wasserverbrauchs. Im Gegensatz zur Wasserverschmutzung werden aber keine konkreten Zielwerte bzw. Maßnahmen vorgeschrieben⁵³.

Label, die den Wasserverbrauch eines Produktes adressieren und direkt kommunizieren, sind eher selten anzutreffen. Derartige volumetrische Water Footprint Label sind für den Verbraucher zwar leicht verständlich, die daraus resultierende Konsumentenentscheidung allerdings nicht immer zielführend⁵⁴. So kann ein geringerer Wasserverbrauch in einer wasserknappen Region durchaus ernstere Konsequenzen hervorrufen als ein hoher Wasserverbrauch in einer wasserreichen Region (Wichelns, 2017). Davon abgesehen besteht die Gefahr, dass derartige Water Footprint Labels (wenn sie von den Konsumierenden ernst genommen werden) zum Boykott wasserintensiver Produkte führen, was verheerende

⁵² Better Cotton Initiative. *BCI PRINCIPLES AND CRITERIA. Version 2.1.* (2018).

⁵³ GOTS gGmbH. *Global Organic Textile Standard (GOTS). Version 5.0.* (2017).

⁵⁴ Leach, Allison M., Kyle A. Emery, Jessica Gephart, Kyle F. Davis, Jan Willem Erisman, Adrian Leip, Michael L. Pace, u. a. „Environmental Impact Food Labels Combining Carbon, Nitrogen, and Water Footprints“. *Food Policy* 61 (Mai 2016): 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2016.03.006>.

ökonomische und soziale Konsequenzen in den Anbaugebieten haben kann. Aus diesen Gründen, schlägt die TU Berlin auch andere Vergabekriterien – wie die kontinuierliche Steigerung der Wassereffizienz in wasserknappen Gebieten – vor (siehe unten).

Einen Schritt weiter als eine rein volumetrische Betrachtung geht das vom Umweltbundesamt geförderte Verbändevorhaben „Durstige Güter“⁵⁵. Im Rahmen einer Ausstellung und auf der Internetseite werden Verbraucher*innen über den Wasserfußabdruck von ausgewählten Produkten je nach Herkunftsregion informiert.

Neben einer direkten Kommunikation des Wasserverbrauchs von Produkten besteht eine Möglichkeit darin, den Wasserfußabdruck in die Vergabekriterien bestehender Labels zu integrieren. Im Auftrag des Umweltbundesamtes und in Kooperation mit dem Ökoinstitut hat die TU Berlin bereits eine mögliche Integration des Wasserfußabdrucks in die Vergabekriterien des Blauen Engel untersucht⁵⁶.

Basierend auf eigenen Vorarbeiten und anderen Studien werden verschiedenen Möglichkeiten für die Kommunikation des in diesem Forschungsvorhaben weiterentwickelten Wasserfußabdrucks gesehen:

- Erstellung eines Labels, das den knappheitsgewichteten Wasserfußabdruck von Produkten mithilfe der in AP2 entwickelten Bewertungsmethodik oder einer verwandten Bewertungsmethodik (bspw. AWARE⁵⁷ oder WAVE+⁵⁸) direkt kommuniziert oder vergeben wird, wenn ein noch festzulegender Grenzwert unterschritten ist
- Integration des knappheitsgewichteten Wasserfußabdrucks (AP2) in die Vergabekriterien eines bestehenden Typ 1 Öko-Labels (z.B. Blauer Engel)
- Entwicklung eines Labels, das vergeben wird, wenn Maßnahmen zur Reduktion des Wasserverbrauchs in Regionen getroffen werden, in denen die Lokalen Belastungsgrenzen in Bezug auf Wasser überschritten sind
- Überarbeitung der vom Umweltbundesamt mitentwickelten „Tipps für den wasserschonenden Einkauf“ im Rahmen der Initiative „Virtuelles Wasser im Einkaufskorb“. Die bisherigen Empfehlungen können durch eine Analyse des knappheitsgewichteten Wasserfußabdrucks verifiziert und ggf. angepasst werden.
- Entwicklung eines Tools zur Berechnung des persönlichen Wasserfußabdrucks (Wasserverbrauch einschließlich Knappheitsgewichtung). Zwar gibt es bereits eine Reihe von Tools zur Berechnung des persönlichen Wasserfußabdrucks⁵⁹, jedoch ohne Wirkungsabschätzung und nicht spezifisch für den deutschsprachigen Raum und in Bezugnahme auf Wirkungen im Ausland. Für Unternehmen/Organisationen gibt es die Möglichkeit, unter Verwendung des WELLE-OWF-Tools⁶⁰, den Wasserfußabdruck anzunähern.

⁵⁵ <https://www.durstige-gueter.de>.

⁵⁶ Gensch, Carl-Otto, Ran Liu, Britta Stratmann, Jenny Teufel, Matthias Finkbeiner, Vanessa Bach, Markus Berger, und Daniel Grimm. *Product Carbon Footprint und Water Footprint: Möglichkeiten zur methodischen Integration in ein bestehendes Typ-1 Umweltzeichen (Blauer Engel) unter besonderer Berücksichtigung des Kommunikationsaspektes*, UBA FKZ 3710 95 304, 2017.

⁵⁷ Boulay et al. (2018)

⁵⁸ Berger et al. (2018)

⁵⁹ <https://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/personal-water-footprint-calculator/personal-calculator-extended/>; <https://www.activesustainability.com/sustainable-life/calculate-water-footprint/>; <https://www.watercalculator.org/>

⁶⁰ <https://wf-tools.see.tu-berlin.de/wf-tools/owf/#/calculation>

7.4 Empfehlungen für Indikatoren und Zielsetzung

Empfehlungen für Indikatoren zur Erfassung des konsuminduzierten Wasserverbrauchs von Deutschland und Möglichkeiten der Zielsetzung sind in Abschnitt 5 zusammengefasst. Als Leitindikatoren werden der knappheitsgewichtete konsuminduzierte Wasserverbrauch und ein differenzierter Wasserqualitätsindex vorgeschlagen. Da die vorgeschlagene wissenschaftlich intendierte Berichtsebene insbesondere in Hinblick auf Wasserverschmutzung derzeit nicht erfüllt werden kann, wird der graue Wasserverbrauch als temporärer Hilfsindikator empfohlen.

Eine Reduktion des Wasserverbrauchs sollte in erster Linie für die Sektoren mit einer großen Hebelwirkung angestrebt werden. Interventionsmöglichkeiten zur Reduktion des konsuminduzierten blauen Wasserverbrauchs von Deutschland mit großer Hebelwirkung bestehen in erster Linie nicht dort, wo die absoluten Wasserverbrauchsmengen hoch sind, sondern in Sektoren, die gleichzeitig auch noch eine hohe Wasserintensität aufweisen. Also bspw. der Anbau von Gemüse, Nüssen und Früchten, aber auch anderen Nutzpflanzen, insbesondere Reis oder Ölsamen. Darüber hinaus bei Sektoren, in denen diese Agrarerzeugnisse verwendet werden, also z.B. Nahrungsmittel sowie Viehzucht und Fleischproduktion (Abschnitt 4.2.3.2.1). Geografische Aspekte sollten berücksichtigt werden und Reduktionsmaßnahmen auf Regionen fokussieren, in denen lokale Belastbarkeitsgrenzen bereits überschritten werden oder Belastbarkeitsgrenzen beinahe erreicht werden. Diese Regionen umfassen unter anderem Südeuropa, Nordafrika, Südasien und Westamerika (siehe Abschnitt 4.2.4.1 und 4.2.4.2).

8 Quellenverzeichnis

- Aguiar, A., Narayanan, B., McDougall, R., 2016. An Overview of the GTAP 9 Data Base. *J. Glob. Econ. Anal.* 1, 181–208. <https://doi.org/10.21642/JGEA.010103AF>
- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., Siebert, S., 2003. Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrol. Sci. J.* 48, 317–337. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.3.317.45290>
- Allan, J.A., 2003. Virtual Water - the Water, Food, and Trade Nexus. Useful Concept or Misleading Metaphor? *Water Int.* 28, 106–113. <https://doi.org/10.1080/02508060.2003.9724812>
- Allan, J.A., 1998. Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. *Ground Water* 36, 545–546. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>
- Allan, J.A., 1996. Water Use and Development in Arid Regions: Environment, Economic Development and Water Resource Politics and Policy. *Rev. Eur. Community Int. Environ. Law* 5, 107–115. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9388.1996.tb00258.x>
- Amores, M.J., Verones, F., Raptis, C., Juraske, R., Pfister, S., Stoessel, F., Antón, A., Castells, F., Hellweg, S., 2013. Biodiversity Impacts from Salinity Increase in a Coastal Wetland. *Environ. Sci. Technol.* 47, 6384–6392. <https://doi.org/10.1021/es3045423>
- aus der Beek, T., Flörke, M., Lapola, D.M., Schaldach, R., Voß, F., Teichert, E., 2010. Modelling historical and current irrigation water demand on the continental scale: Europe. *Adv. Geosci.* 27, 79–85. <https://doi.org/10.5194/adgeo-27-79-2010>
- AWS, 2019. International Water Stewardship Standard - Version 2.0.
- Berger, M., Eisner, S., van der Ent, R., Flörke, M., Link, A., Poligkeit, J., Bach, V., Finkbeiner, M., 2018. Enhancing the Water Accounting and Vulnerability Evaluation Model: WAVE+. *Environ. Sci. Technol.* 52, 10757–10766. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05164>
- Berger, M., Finkbeiner, M., 2010. Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assessment? *Sustainability* 2, 919–944. <https://doi.org/10.3390/su2040919>
- Bjørn, A., Boulay, A.-M., Sim, S., King, H., Clavreul, J., Mueller, C., Bulle, C., Margni, M., n.d. Requirements for developing planetary boundaries-based impact categories and application to freshwater use.
- Bjørn, A., Sim, S., Boulay, A.-M., King, H., Clavreul, J., Lam, W.Y., Barbarossa, V., Bulle, C., Margni, M., 2020. A planetary boundary-based method for freshwater use in life cycle assessment: Development and application to a tomato production case study. *Ecol. Indic.* 110, 105865. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105865>
- BMU, 2021. Planetare Belastbarkeitsgrenzen | BMU [WWW Document]. URL <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit-internationales-digitalisierung/nachhaltige-entwicklung/integriertes-umweltprogramm-2030/planetare-belastbarkeitsgrenzen/> (accessed 1.30.20).
- BMUB, 2016. Deutsches Ressourceneffizienz-programm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen (ProgRess II).
- BMZ, 2017. Der Zukunftsvertrag für die Welt - Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung 28.
- Bogardi, J.J., Fekete, B.M., Vörösmarty, C.J., 2013. Planetary boundaries revisited: a view through the 'water lens.' *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 5, 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.006>
- Boulay, A.-M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M.J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A.V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., Pfister, S., 2018. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *Int. J. Life Cycle Assess.* 23, 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>

- Boulay, A.-M., Bulle, C., Bayart, J.-B., Deschênes, L., Margni, M., 2011. Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health. *Environ. Sci. Technol.* 45, 8948–8957. <https://doi.org/10.1021/es1030883>
- Bruckner, M., Wood, R., Moran, D., Kuschig, N., Wieland, H., Maus, V., Börner, J., 2019. FABIO - The Construction of the Food and Agriculture Biomass Input–Output Model. *Environ. Sci. Technol.* 53, 11302–11312. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03554>
- Bunsen, J., Berger, M., Finkbeiner, M., 2021. Planetary boundaries for water – A review. *Ecol. Indic.* 121. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107022>
- Cabernard, L., Pfister, S., 2021. A highly resolved MRIO database for analyzing environmental footprints and Green Economy Progress. *Sci. Total Environ.* 755, 142587. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142587>
- Canals, L.M. i, Chenoweth, J., Chapagain, A., Orr, S., Antón, A., Clift, R., 2009. Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I—inventory modelling and characterisation factors for the main impact pathways. *Int. J. Life Cycle Assess.* 14, 28–42. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0030-z>
- CIESIN, 2018. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Count, Revision 11. NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Palisades, NY.
- Cole, M.J., Bailey, R.M., New, M.G., 2014. Tracking sustainable development with a national barometer for South Africa using a downscaled “safe and just space” framework. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, E4399–E4408. <https://doi.org/10.1073/pnas.1400985111>
- Crutzen, P.J., 2002. Geology of mankind. *Nature* 415, 23–23. <https://doi.org/10.1038/415023a>
- Destouni, G., Jaramillo, F., Prieto, C., 2013. Hydroclimatic shifts driven by human water use for food and energy production. *Nat. Clim. Change* 3, 213–217. <https://doi.org/10.1038/nclimate1719>
- Doka, G., 2016. Combining life cycle inventory results with planetary boundaries: The Planetary Boundary Allowance impact assessment method Update PBA'06. Doka LCA Zurich Switz.
- Döll, P., Kaspar, F., Lehner, B., 2003. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *J. Hydrol.* 270, 105–134. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00283-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00283-4)
- EC, 2002. Europa - RAMON - Classifications Download List [WWW Document]. URL https://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures/index.cfm?TargetUrl=LST_NOM_DTL&StrNom=NACE_1_1 (accessed 9.23.21).
- EC, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, 327.
- Eisner, S., 2016. Comprehensive evaluation of the WaterGAP3 model across climatic, physiographic, and anthropogenic gradients.
- Falkenmark, M., Wang-Erlandsson, L., Rockström, J., 2019. Understanding of water resilience in the Anthropocene. *J. Hydrol.* X 2, 100009. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2018.100009>
- Fang, K., Heijungs, R., Duan, Z., de Snoo, G., 2015. The Environmental Sustainability of Nations: Benchmarking the Carbon, Water and Land Footprints against Allocated Planetary Boundaries. *Sustainability* 7, 11285–11305. <https://doi.org/10.3390/su70811285>
- Fanning, A.L., O'Neill, D.W., 2016. Tracking resource use relative to planetary boundaries in a steady-state framework: A case study of Canada and Spain. *Ecol. Indic.* 69, 836–849. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.034>
- FAO, o.D. FAOSTAT [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (accessed 6.6.19).
- Flörke, M., Kynast, E., Bärlund, I., Eisner, S., Wimmer, F., Alcamo, J., 2013. Domestic and industrial water uses of the past 60 years as a mirror of socio-economic development: A global

- simulation study. *Glob. Environ. Change* 23, 144–156.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.018>
- Forin, S., Mikosch, N., Berger, M., Finkbeiner, M., 2019. Organizational water footprint: a methodological guidance. *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 403–422.
<https://doi.org/10.1007/s11367-019-01670-2>
- Fraiture, C. de, Molden, D.J., Amarasinghe, U.A., Makin, I.W., 2001. Podium: Projecting water supply and demand for food production in 2025.
- Gerten, D., Hoff, H., Rockström, J., Jägermeyr, J., Kummu, M., Pastor, A.V., 2013. Towards a revised planetary boundary for consumptive freshwater use: role of environmental flow requirements. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 5, 551–558.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.001>
- Gerten, D., Rockström, J., Heinke, J., Steffen, W., Richardson, K., Cornell, S., 2015. Response to Comment on “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet.” *Science* 348, 1217–1217. <https://doi.org/10.1126/science.aab0031>
- Gleeson, T., Wang-Erlandsson, L., Porkka, M., Zipper, S.C., Jaramillo, F., Gerten, D., Fetzer, I., Cornell, S.E., Piemontese, L., Gordon, L.J., Rockström, J., Oki, T., Sivapalan, M., Wada, Y., Brauman, K.A., Flörke, M., Bierkens, M.F.P., Lehner, B., Keys, P., Kummu, M., Wagener, T., Dadson, S., Troy, T.J., Steffen, W., Falkenmark, M., Famiglietti, J.S., 2020a. Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. *Water Resour. Res.* 56. <https://doi.org/10.1029/2019WR024957>
- Gleeson, T., Wang-Erlandsson, L., Zipper, S.C., Porkka, M., Jaramillo, F., Gerten, D., Fetzer, I., Cornell, S.E., Piemontese, L., Gordon, L.J., Rockström, J., Oki, T., Sivapalan, M., Wada, Y., Brauman, K.A., Flörke, M., Bierkens, M.F.P., Lehner, B., Keys, P., Kummu, M., Wagener, T., Dadson, S., Troy, T.J., Steffen, W., Falkenmark, M., Famiglietti, J.S., 2020b. The Water Planetary Boundary: Interrogation and Revision. *One Earth* 2, 223–234.
<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.009>
- Gordon, L.J., Steffen, W., Jönsson, B.F., Folke, C., Falkenmark, M., Johannessen, A., 2005. Human modification of global water vapor flows from the land surface. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 102, 7612–7617. <https://doi.org/10.1073/pnas.0500208102>
- Hanafiah, M.M., Xenopoulos, M.A., Pfister, S., Leuven, R.S.E.W., Huijbregts, M.A.J., 2011. Characterization Factors for Water Consumption and Greenhouse Gas Emissions Based on Freshwater Fish Species Extinction. *Environ. Sci. Technol.* 45, 5272–5278.
<https://doi.org/10.1021/es1039634>
- Heistermann, M., 2017. HESS Opinions: A planetary boundary on freshwater use is misleading. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 3455–3461. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3455-2017>
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., Mekonnen, M., 2012. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, 1st ed. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781849775526>
- Hoff, H., Nykvist, B., Carson, M., 2014. “Living well, within the limits of our planet”? Measuring Europe’s growing external footprint 28.
- Howard, G., Bartram, J., 2003. Domestic water quantity, service level and health. World Health Organization.
- Hui, C., 2006. Carrying capacity, population equilibrium, and environment’s maximal load. *Ecol. Model.* 192, 317–320. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.001>
- ISO, 2014. *Environmental Management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines (ISO 14046:2014)*.
- Jaramillo, F., Destouni, G., 2015. Comment on “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet.” *Science* 348, 1217–1217.
<https://doi.org/10.1126/science.aaa9629>

- Kitzes, J., 2013. An Introduction to Environmentally-Extended Input-Output Analysis. *Resources* 2, 489–503. <https://doi.org/10.3390/resources2040489>
- Kleinen, T., Füssel, H.-M., Bruckner, T., 2004. Vorsorgeprinzip und Klimawandel: Der Leitplankenansatz 18.
- Kupfer, T., Baitz, M., Colodel, C.M., Kokborg, M., Schöll, S., Rudolf, M., Thellier, L., Bos, U., Bosch, F., Gonzalez, M., Schuller, O., Hengstler, J., Stoffregen, A., Thylmann, D., 2018. GaBi Database & Modelling Principles.
- Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A., 2008. New Global Hydrography Derived From Spaceborne Elevation Data. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 89, 93. <https://doi.org/10.1029/2008EO100001>
- Lenzen, M., Kanemoto, K., Moran, D., Geschke, A., 2012. Mapping the Structure of the World Economy. *Environ. Sci. Technol.* 46, 8374–8381. <https://doi.org/10.1021/es300171x>
- Lenzen, M., Moran, D., Kanemoto, K., Geschke, A., 2013. Building Eora: A global multi-region input-output database at high country and sector resolution. *Econ. Syst. Res.* 25, 20–49. <https://doi.org/10.1080/09535314.2013.769938>
- Leontief, W., 1970. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *Rev. Econ. Stat.* 52, 262–271. <https://doi.org/10.2307/1926294>
- Leontief, W.W., 1936. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. *Rev. Econ. Stat.* 105–125.
- Luan, I.O.B., 2010. Singapore Water Management Policies and Practices. *Int. J. Water Resour. Dev.* 26, 65–80. <https://doi.org/10.1080/07900620903392190>
- Lutter, S., Giljum, S., Gözet, B., Wieland, H., 2018. Die Nutzung natürlicher Ressourcen - Bericht für Deutschland 2018. Umweltbundesamt.
- Mateo-Sagasta, J., Marjani, S., Turrall, H., 2018. More people, more food, worse water?: A global review of water pollution from agriculture.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W., 1972. The limits to growth: a report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind, 2. ed. ed. Universe Books, New York.
- Meadows, D.H., Randers, J., Meadows, D.L., 2004. The limits to growth: the 30-year update, Reprint. ed. Earthscan, London.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Meybeck, M., 2003. Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 358, 1935–1955. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1379>
- Micklin, P., 2007. The Aral Sea Disaster. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 35, 47–72. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140120>
- Micklin, P.P., 1988. Desiccation of the Aral Sea: A Water Management Disaster in the Soviet Union. *Science* 241, 1170–1176. <https://doi.org/10.1126/science.241.4870.1170>
- Miller, R.E., Blair, P.D., 2009. Input-Output Analysis: Foundations and Extensions, Second Edition 784.
- Molden, D., 2009. Planetary boundaries: The devil is in the detail. *Nat. Clim. Change* 1, 116–117. <https://doi.org/10.1038/climate.2009.97>
- Motoshita, M., Ono, Y., Pfister, S., Boulay, A.-M., Berger, M., Nansai, K., Tahara, K., Itsubo, N., Inaba, A., 2018. Consistent characterisation factors at midpoint and endpoint relevant to agricultural water scarcity arising from freshwater consumption. *Int. J. Life Cycle Assess.* 23, 2276–2287. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0811-5>

- Nykqvist, B., Persson, Å., Moberg, F., Persson, L., Cornell, S., Rockström, J., 2013. National environmental performance on planetary boundaries: a study for the Swedish Environmental Protection Agency. Swedish Environmental Protection Agency.
- OECD.world, n.d. Germany (DEU) Exports, Imports, and Trade Partners [WWW Document]. URL <https://oec.world/en/profile/country/deu> (accessed 2.15.21).
- Oki, T., Kanae, S., 2006. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science* 313, 1068–1072. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- Pastor, A.V., Ludwig, F., Biemans, H., Hoff, H., Kabat, P., 2014. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 5041–5059. <https://doi.org/10.5194/hess-18-5041-2014>
- Petschel-Held, G., Schellnhuber, H.-J., Bruckner, T., Tóth, F.L., Hasselmann, K., 1999. The Tolerable Windows Approach: Theoretical and Methodological Foundations. *Climatic Change* 41, 303–331. <https://doi.org/10.1023/A:1005487123751>
- Pfister, S., Bayer, P., 2014. Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. *J. Clean. Prod.* 73, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.031>
- Pfister, S., Bayer, P., Koehler, A., Hellweg, S., 2011. Environmental Impacts of Water Use in Global Crop Production: Hotspots and Trade-Offs with Land Use. *Environ. Sci. Technol.* 45, 5761–5768. <https://doi.org/10.1021/es1041755>
- Pfister, S., Koehler, A., Hellweg, S., 2009. Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environ. Sci. Technol.* 43, 4098–4104. <https://doi.org/10.1021/es802423e>
- Pfister, S., Kulionis, V., 2020. Feasibility Study on Strengthening the Environmental Footprints and Planetary Boundaries Concepts within the Green Economy Progress Measurement Framework.
- Postel, S.L., 1998. Water for Food Production: Will There Be Enough in 2025? *BioScience* 48, 629–637. <https://doi.org/10.2307/1313422>
- Pradinaud, C., Northey, S., Amor, B., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Boulay, A.-M., Junqua, G., Lathuillière, M.J., Margni, M., Motoshita, M., Niblick, B., Payen, S., Pfister, S., Quinteiro, P., Sonderegger, T., Rosenbaum, R.K., 2019. Defining freshwater as a natural resource: a framework linking water use to the area of protection natural resources. *Int. J. Life Cycle Assess.* 24, 960–974. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1543-8>
- Ridoutt, B.G., Huang, J., 2012. Environmental relevance - the key to understanding water footprints. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, E1424–E1424. <https://doi.org/10.1073/pnas.1203809109>
- Rockström, J., Falkenmark, M., Allan, T., Folke, C., Gordon, L., Jägerskog, A., Kummu, M., Lannerstad, M., Meybeck, M., Molden, D., Postel, S., Savenije, H., Svedin, U., Turton, A., Varis, O., 2014. The unfolding water drama in the Anthropocene: towards a resilience based perspective on water for global sustainability. *Ecohydrology* n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/eco.1562>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009a. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S.I., Lambin, E., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P.,

- Foley, J., 2009b. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecol. Soc.* 14, art32. <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>
- Ryberg, M.W., Owsianiak, M., Clavreul, J., Mueller, C., Sim, S., King, H., Hauschild, M.Z., 2018a. How to bring absolute sustainability into decision-making: An industry case study using a Planetary Boundary-based methodology. *Sci. Total Environ.* 634, 1406–1416. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.075>
- Ryberg, M.W., Owsianiak, M., Richardson, K., Hauschild, M.Z., 2018b. Development of a life-cycle impact assessment methodology linked to the Planetary Boundaries framework. *Ecol. Indic.* 88, 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.065>
- Sandin, G., Peters, G.M., Svanström, M., 2015. Using the planetary boundaries framework for setting impact-reduction targets in LCA contexts. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 1684–1700. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0984-6>
- Shiklomanov, I.A., Rodda, J.C., 2003. World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century.
- Stadler, K., 2021. Pymrio – A Python Based Multi-Regional Input-Output Analysis Toolbox. *J. Open Res. Softw.* 9, 8. <https://doi.org/10.5334/jors.251>
- Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C.-J., Simas, M., Schmidt, S., Usubiaga, A., Acosta-Fernández, J., Kuenen, J., Bruckner, M., Giljum, S., Lutter, S., Merciai, S., Schmidt, J.H., Theurl, M.C., Plutzar, C., Kastner, T., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., de Koning, A., Tukker, A., 2018. EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables: EXIOBASE 3. *J. Ind. Ecol.* 22, 502–515. <https://doi.org/10.1111/jiec.12715>
- Stadler, Konstantin, Wood, Richard, Bulavskaya, Tatyana, Södersten, Carl-Johan, Simas, Moana, Schmidt, Sarah, Usubiaga, Arkaitz, Acosta-Fernández, José, Kuenen, Jeroen, Bruckner, Martin, Giljum, Stefan, Lutter, Stephan, Merciai, Stefano, Schmidt, Jannick H, Theurl, Michaela C, Plutzar, Christoph, Kastner, Thomas, Eisenmenger, Nina, Erb, Karl-Heinz, Koning, Arjan, Tukker, Arnold, 2021. EXIOBASE 3. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4588235>
- Statista, 2019. Käufertypen - Zahlungsbereitschaft für umweltfreundliche Produkte 2018 | Statistik [WWW Document]. Statista. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/264571/umfrage/kaeufertypen-zahlungsbereitschaft-fuer-umweltfreundliche-produkte/> (accessed 6.5.19).
- Steffen, W., Crutzen, P.J., McNeill, J.R., 2007. The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature. *AMBIO J. Hum. Environ.* 36, 614–621. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:TAAHNO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2)
- Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sorlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855–1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Stephan, A., Bontinck, P.-A., 2019. pyspa - An object-oriented python package for structural path analysis. figshare. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.8080763.V1>
- Teah, H.Y., Akiyama, T., San Carlos, R., Rayo, O.V., Khew, Y.T.J., Zhao, S., Zheng, L., Onuki, M., 2016. Assessment of Downscaling Planetary Boundaries to Semi-Arid Ecosystems with a Local Perception: A Case Study in the Middle Reaches of Heihe River. *Sustainability* 8, 1233. <https://doi.org/10.3390/su8121233>
- The Guardian, 2013. Will we ever see water footprint labels on consumer products? [WWW Document]. URL <https://www.theguardian.com/sustainable-business/water-footprint-labels-consumer-products> (accessed 6.3.19).

- Timmer, M. (Ed.), 2012. The World Input-Output Database (WIOD): Contents, Sources and Methods.
- Tuomisto, H.L., Hodge, I.D., Riordan, P., Macdonald, D.W., 2012. Exploring a safe operating approach to weighting in life cycle impact assessment – a case study of organic, conventional and integrated farming systems. *J. Clean. Prod.* 37, 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.06.025>
- UN, 2015. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Resolut. Adopt. Gen. Assem.
- UNESCO, UN-Water, 2020. United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. UNESCO, Paris.
- Uusitalo, V., Kuokkanen, A., Grönman, K., Ko, N., Mäkinen, H., Koistinen, K., 2019. Environmental sustainability assessment from planetary boundaries perspective – A case study of an organic sheep farm in Finland. *Sci. Total Environ.* 687, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.120>
- Verones, F., Pfister, S., Hellweg, S., 2013a. Quantifying Area Changes of Internationally Important Wetlands Due to Water Consumption in LCA. *Environ. Sci. Technol.* 47, 9799–9807. <https://doi.org/10.1021/es400266v>
- Verones, F., Saner, D., Pfister, S., Baisero, D., Rondinini, C., Hellweg, S., 2013b. Effects of Consumptive Water Use on Biodiversity in Wetlands of International Importance. *Environ. Sci. Technol.* 47, 12248–12257. <https://doi.org/10.1021/es403635j>
- Vionnet, S., Lessard, L., Offutt, A., Levova, T., Humbert, S., 2012. Quantis Water Database - Technical report.
- WaterStat, 2021. WaterStat - water footprint statistics [WWW Document]. URL <https://waterfootprint.org/en/resources/waterstat/> (accessed 1.29.20).
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wichelns, D., 2017. Volumetric water footprints, applied in a global context, do not provide insight regarding water scarcity or water quality degradation. *Ecol. Indic.* 74, 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.008>
- Zipper, S.C., Jaramillo, F., Wang-Erlandsson, L., Cornell, S.E., Gleeson, T., Porkka, M., Häyhä, T., Crépin, A.-S., Fetzer, I., Gerten, D., Hoff, H., Matthews, N., Ricaurte-Villota, C., Kummu, M., Wada, Y., Gordon, L., 2020. Integrating the Water Planetary Boundary With Water Management From Local to Global Scales. *Earths Future* 8. <https://doi.org/10.1029/2019EF001377>

A Herkunftsregionen

Tabelle 5: Regionale Beiträge zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland

Die Abbildung zeigt die Beiträge einzelner Regionen zum konsuminduzierten Wasserverbrauch von Deutschland in Mio. m³.

Rang	Region	Grünes Wasser	Graues Wasser	Blaues Wasser
1	Deutschland	22709,96	6488,42	1166,83
2	Afrika, RoW	28442,96	236,77	1079,25
3	Asien und Pazifik, RoW	21755,97	1297,67	5364,3
4	USA	11648,04	656,28	1203,3
5	Europa, RoW	12360,68	681,1	244,65
6	Amerika, RoW	11584,81	458,22	492,39
7	Spanien	7515,63	571,53	2096,96
8	China	5876,01	1204,2	2189,99
9	Indien	6259,85	328,13	1413,51
10	Polen	6219,81	960,9	243,56
11	Mittlerer Osten, RoW	2505,58	340,58	3868,1
12	Indonesien	6195,66	41,02	21,92
13	Frankreich	4767,47	719,21	219,5
14	Brasilien	3739,85	360,93	73,85
15	Türkei	3090,01	404,5	624,1
16	Russland	3178,5	221,86	109,44
17	Ungarn	2274,63	499,45	40,38
18	Rumänien	2362,79	192,74	109,11
19	Italien	2112,69	180,42	262,78
20	Bulgarien	1966,73	183,15	25,65
21	Dänemark	1771,25	116,83	38,58
22	Niederlande	1284,25	159,26	219,77
23	Kanada	1350,61	195,62	10,35
24	Australien	1139,	252,53	89,68
25	Tschechien	1078,92	314,06	27,88
26	Österreich	1130,57	119,37	48,44
27	Mexiko	686,06	48,85	155,21

Rang	Region	Grünes Wasser	Graues Wasser	Blaues Wasser
28	Griechenland	577,35	83,94	208,4
29	Slowakei	595,69	109,74	37,38
30	Belgien	469,99	100,04	126,74
31	Portugal	520,87	11,05	67,48
32	Vereinigtes Königreich	359,65	91,15	43,81
33	Südafrika	341,58	41,66	67,61
34	Lettland	261,37	50,41	1,79
35	Litauen	280,09	18,28	3,72
36	Kroatien	179,77	33,72	14,88
37	Schweden	130,5	37,72	14,19
38	Estland	121,45	29,14	,7
39	Schweiz	74,89	20,9	11,72
40	Slowenien	67,93	26,32	2,28
41	Irland	47,72	4,65	31,51
42	Finnland	50,54	3,09	9,75
43	Japan	33,34	,99	10,08
44	Luxemburg	32,15	5,86	,9
45	Norwegen	21,98	1,6	11,41
46	Südkorea	20,74	1,99	8,72
47	Taiwan	-	-	5,06
48	Zypern	1,55	,28	2,03
49	Malta	,63	,04	,11
	Summe	179.198	17.906	22.119

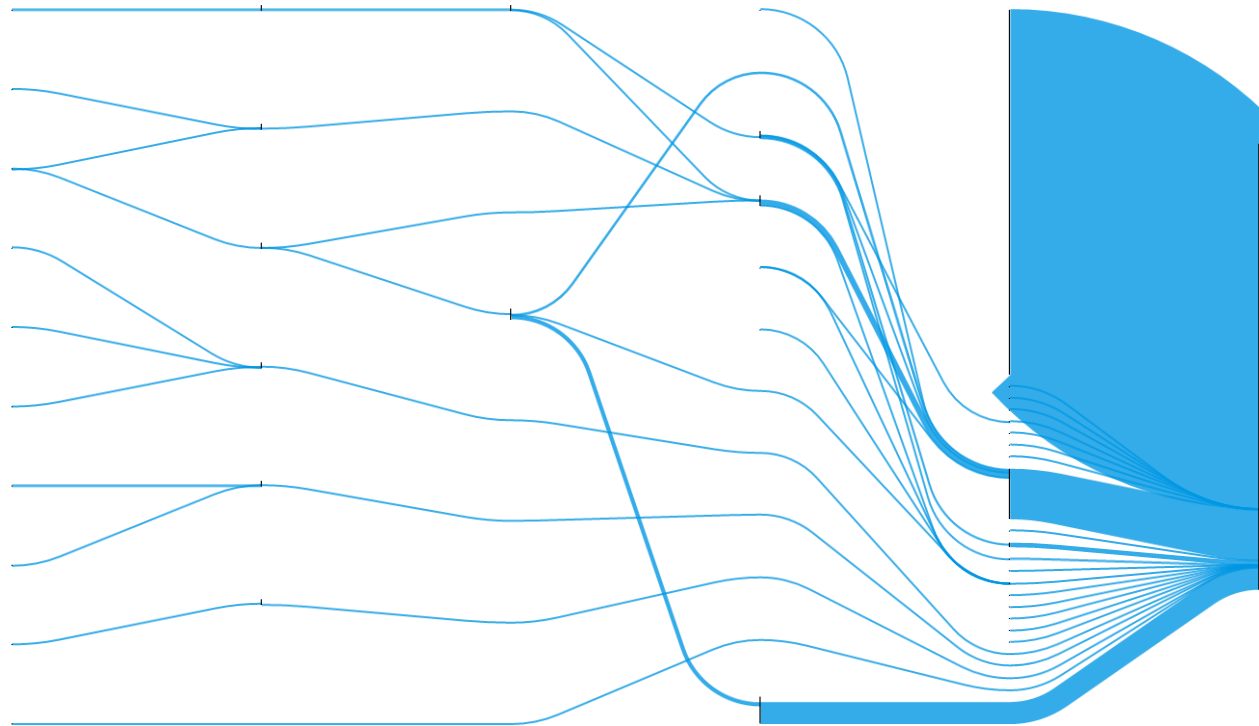
Siehe auch Zusatzmaterial *Tabelle-WF-Regionen-Produktionsbasiert.xlsx*.

B Wertschöpfungsketten-Analyse

Die nachfolgenden Abbildungen ergänzen Abschnitt 4.2.3.2.2 auf S. 96.

Abbildung 48: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Getreide unspezifisch (WA)

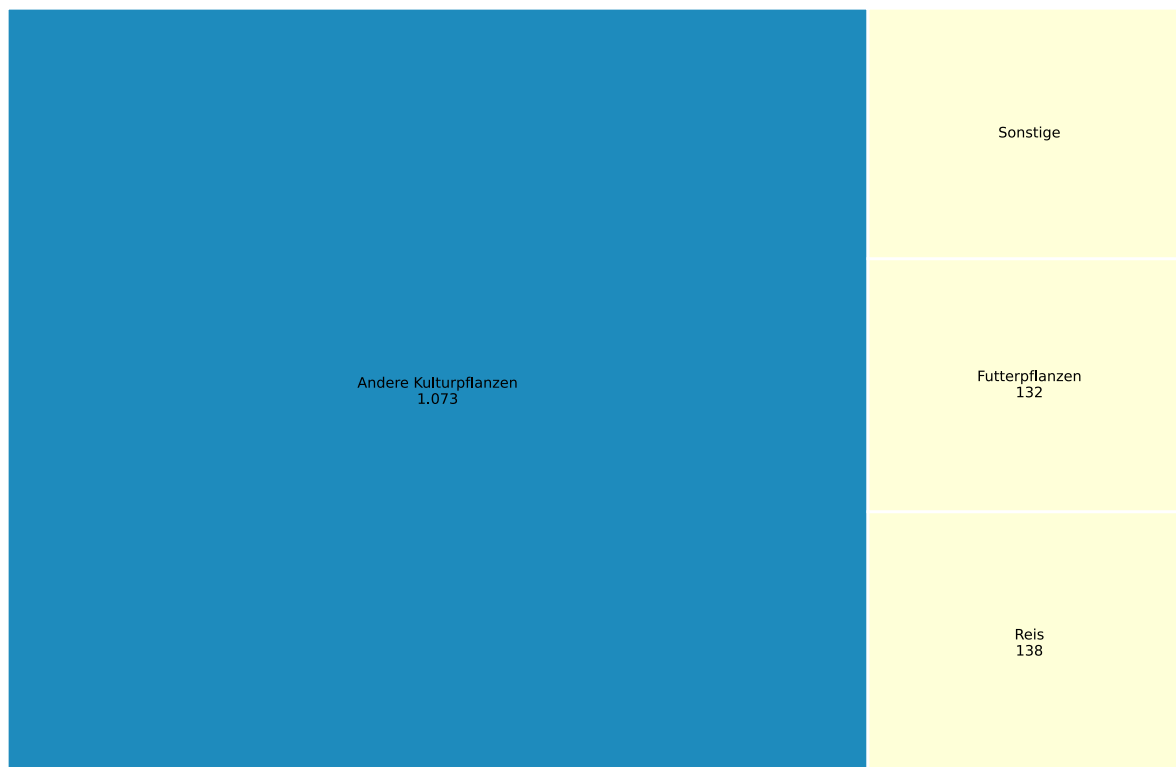
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Getreide unspezifisch (WA).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 49: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Nutzpflanzen unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW)

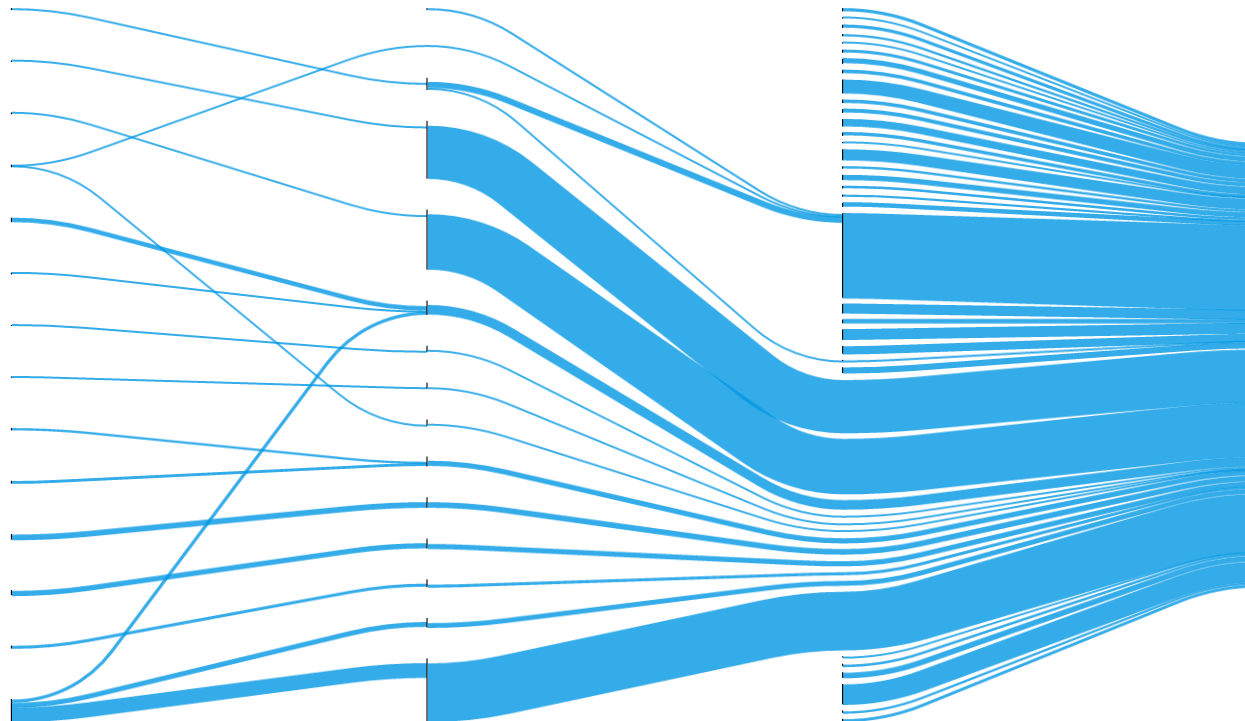
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Nutzpflanzen unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 50: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Deutschland)

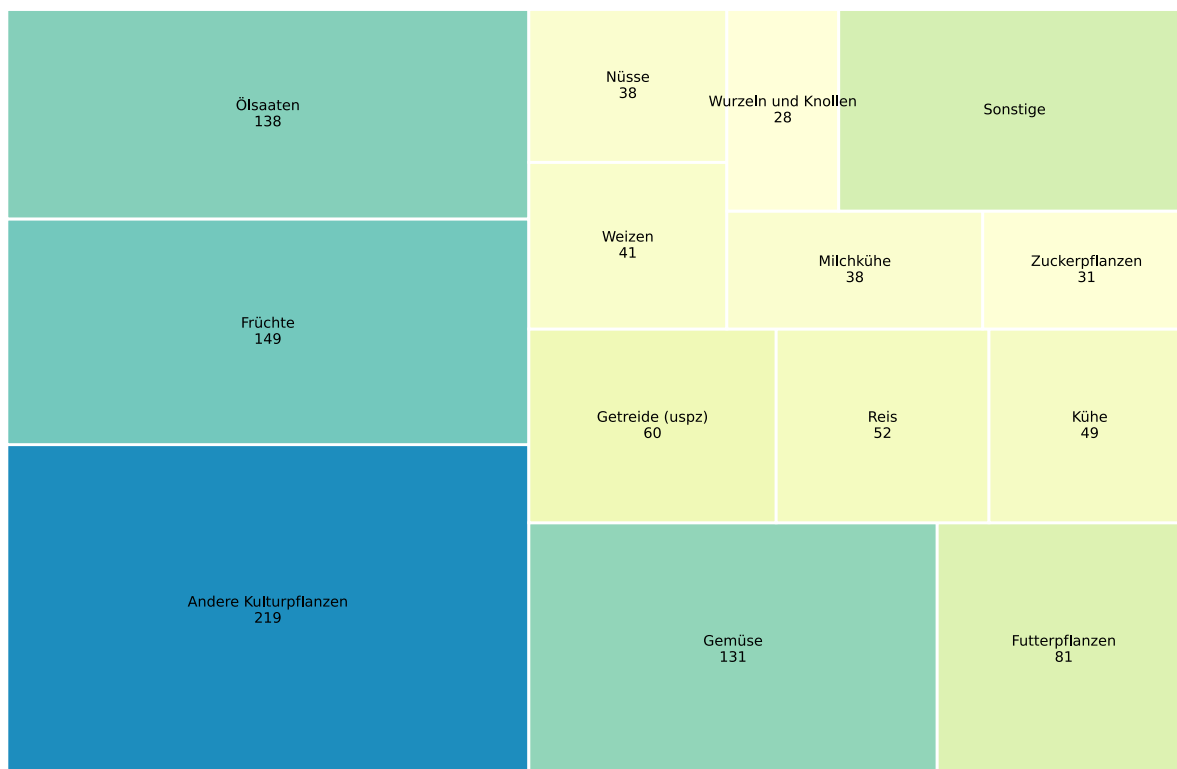
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Deutschland).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 51: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Deutschland)

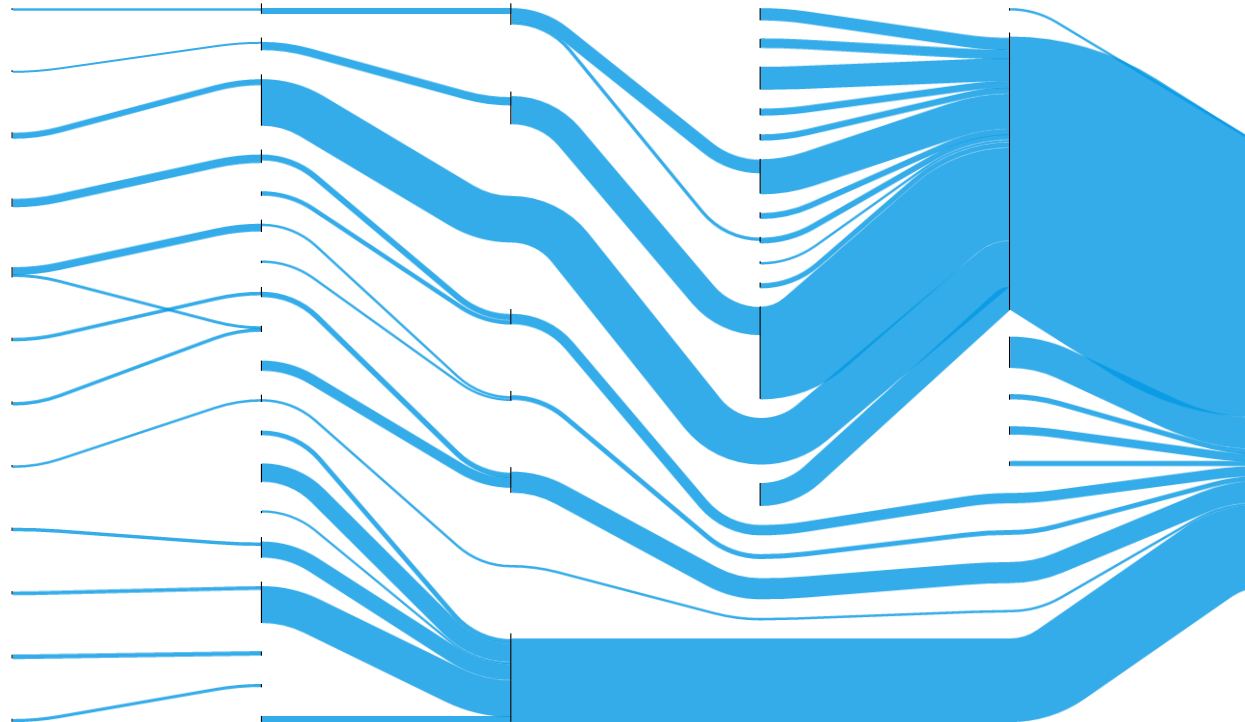
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Deutschland) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 52: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Kunststoffe (Deutschland)

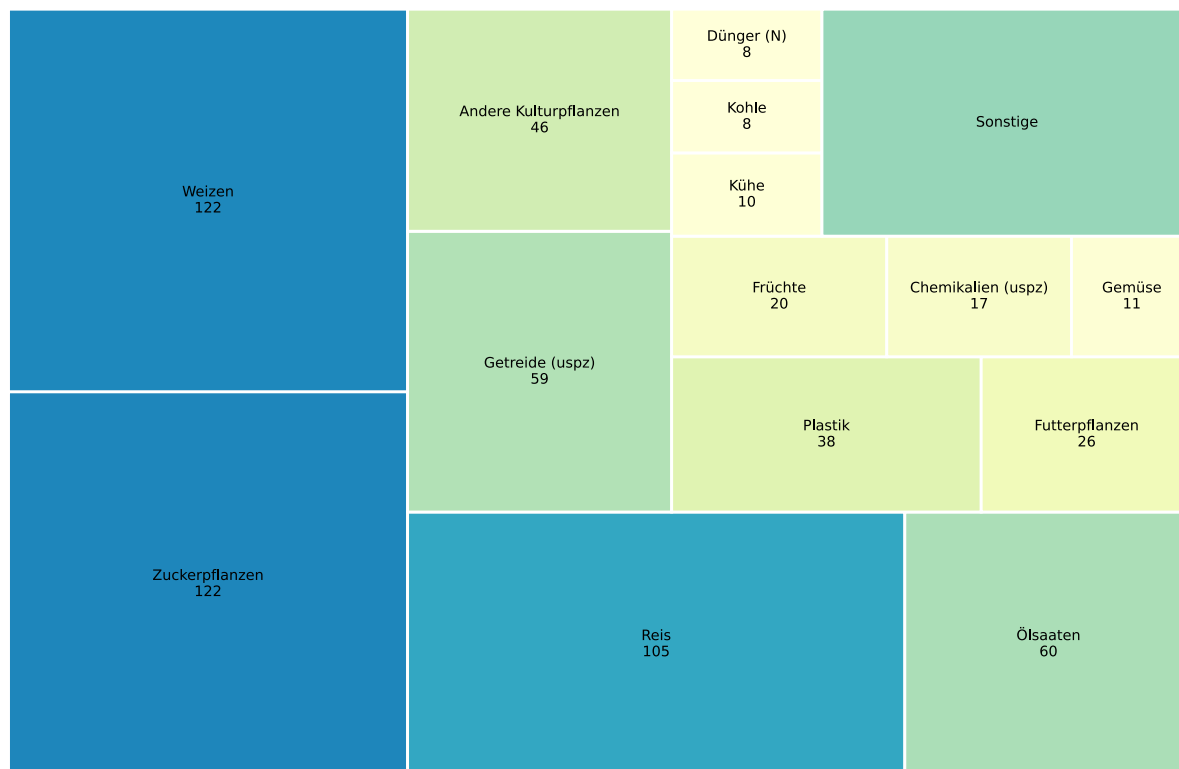
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Kunststoffe (Deutschland).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 53: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Kunststoffe (Deutschland)

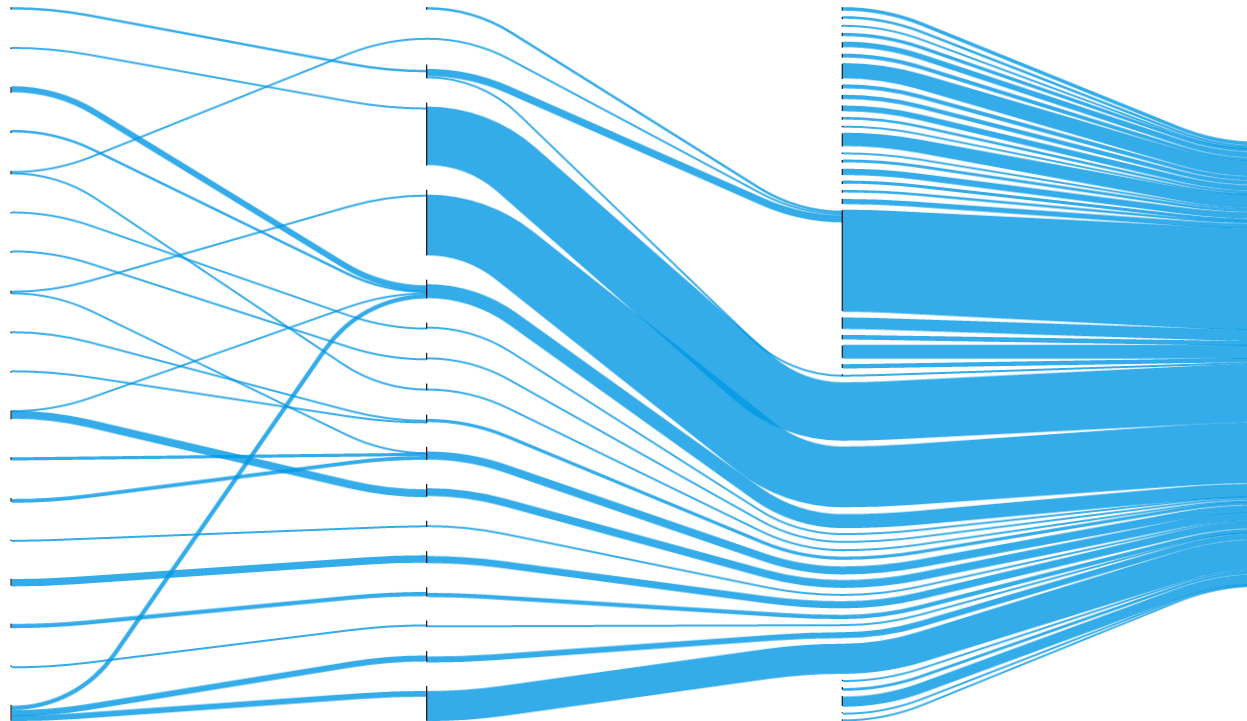
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Kunststoffe (Deutschland) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 54: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Fleischwaren unspezifisch (Deutschland)

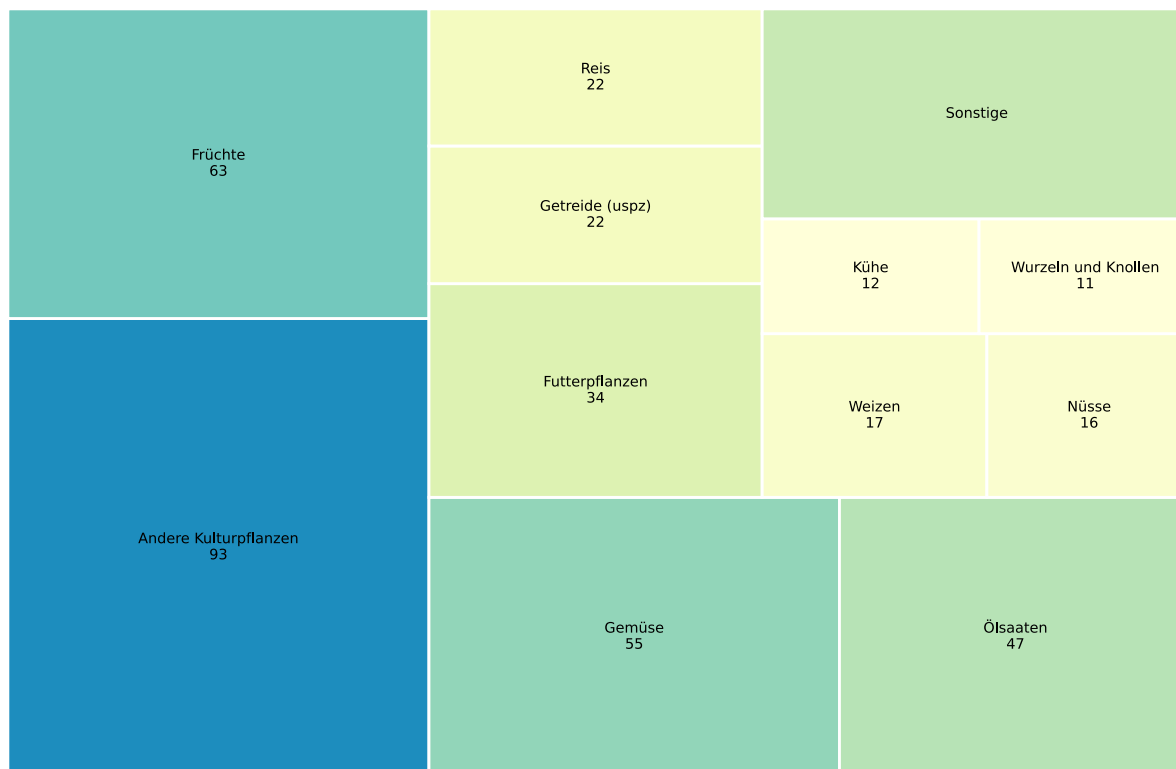
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Fleischwaren unspezifisch (Deutschland).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 55: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Fleischwaren unspezifisch (Deutschland)

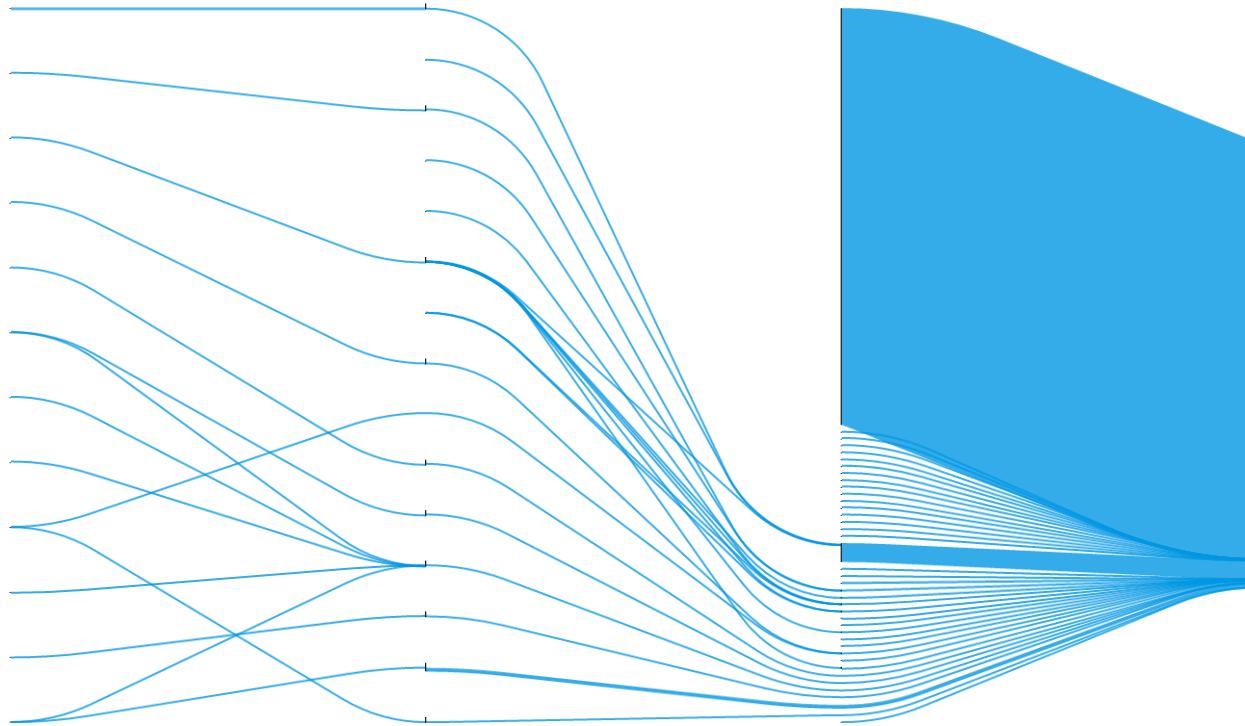
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Fleischwaren unspezifisch (Deutschland) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 56: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Asien und Pazifik, RoW)

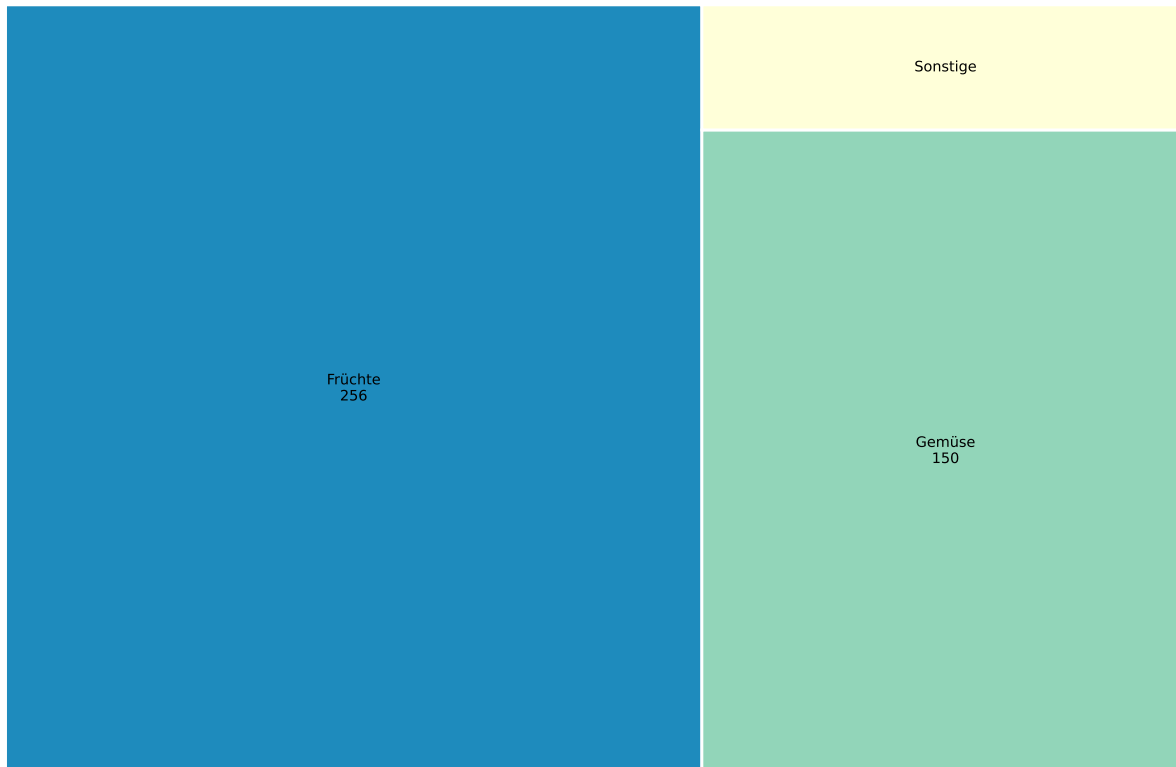
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Asien und Pazifik, RoW).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 57: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Asien und Pazifik, RoW)

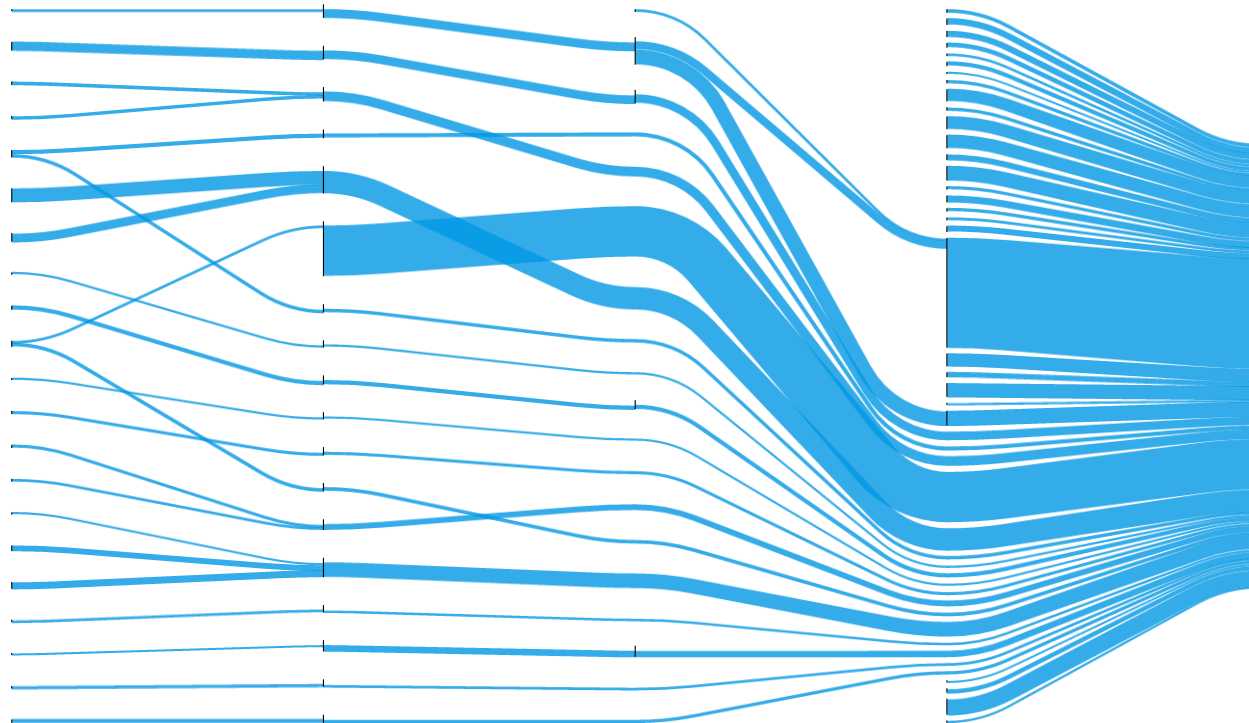
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Gemüse, Früchte, Nüsse (Asien und Pazifik, RoW) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 58: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Hotel und Gaststättengewerbe (Deutschland)

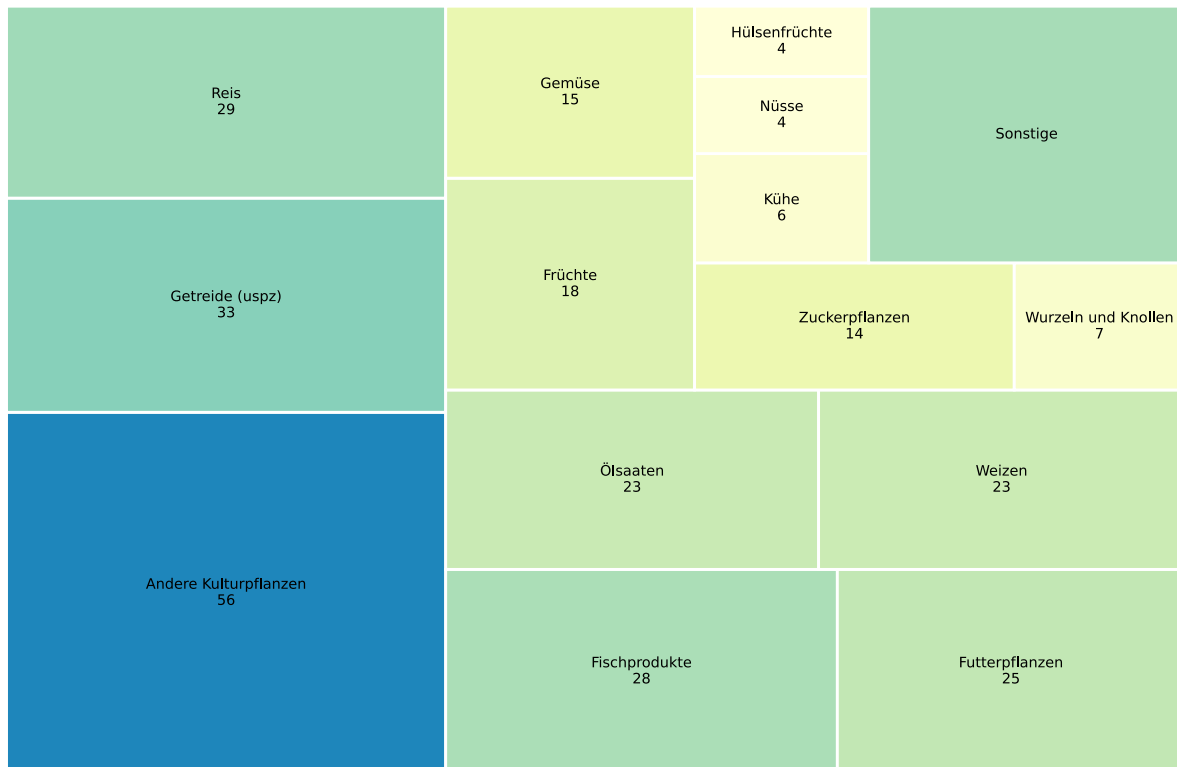
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Hotel und Gaststättengewerbe (Deutschland).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 59: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Hotel und Gaststättengewerbe (Deutschland)

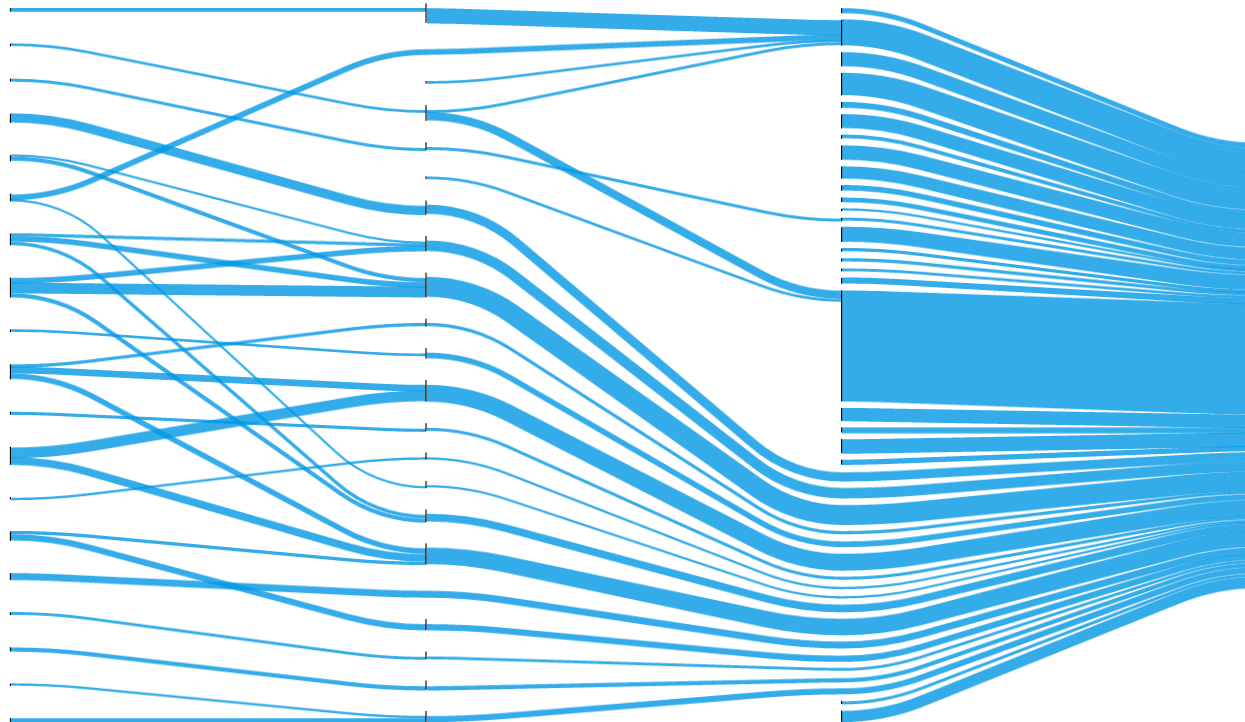
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Hotel und Gaststättengewerbe (Deutschland) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 60: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung (Deutschland)

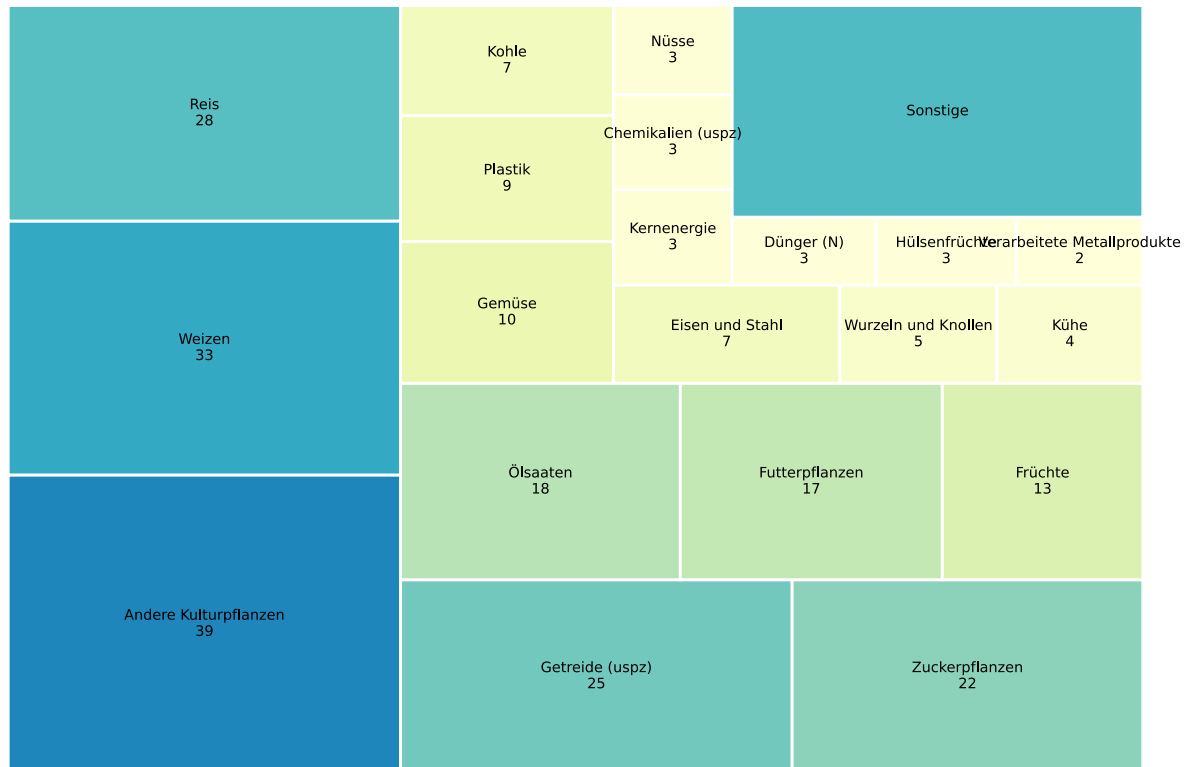
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung (Deutschland).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 61: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung (Deutschland)

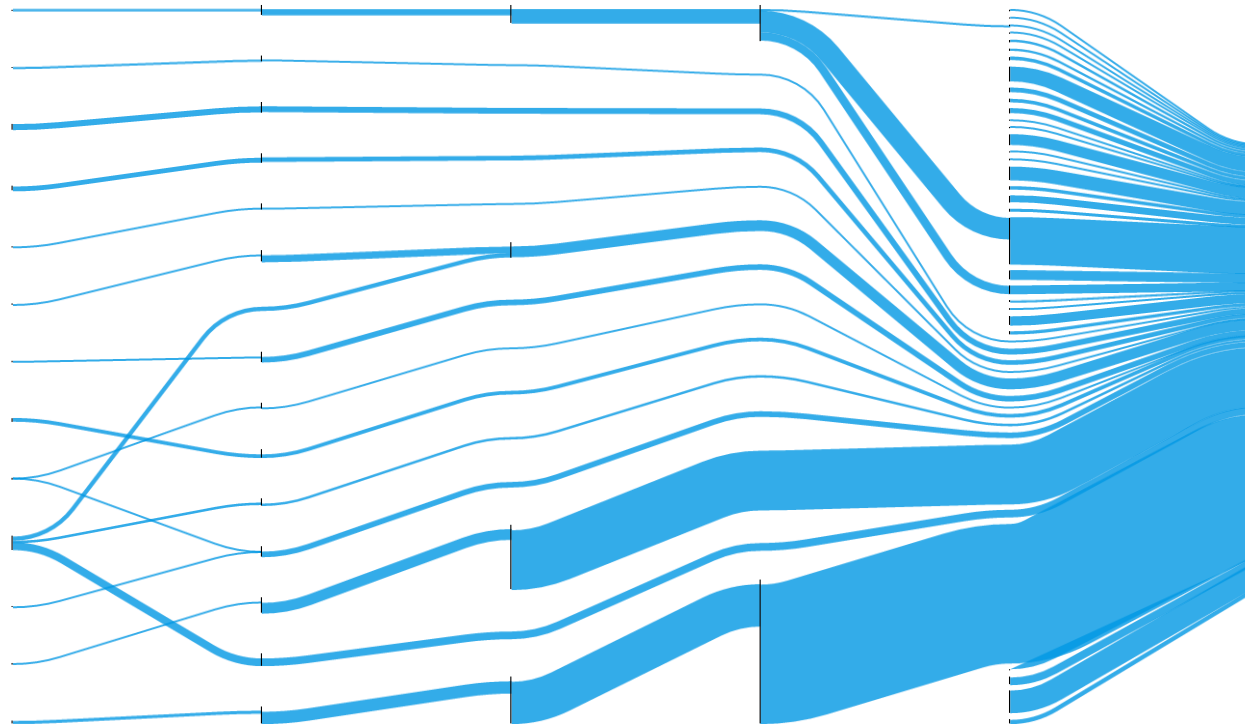
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung (Deutschland) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 62: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Chemikalien unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW)

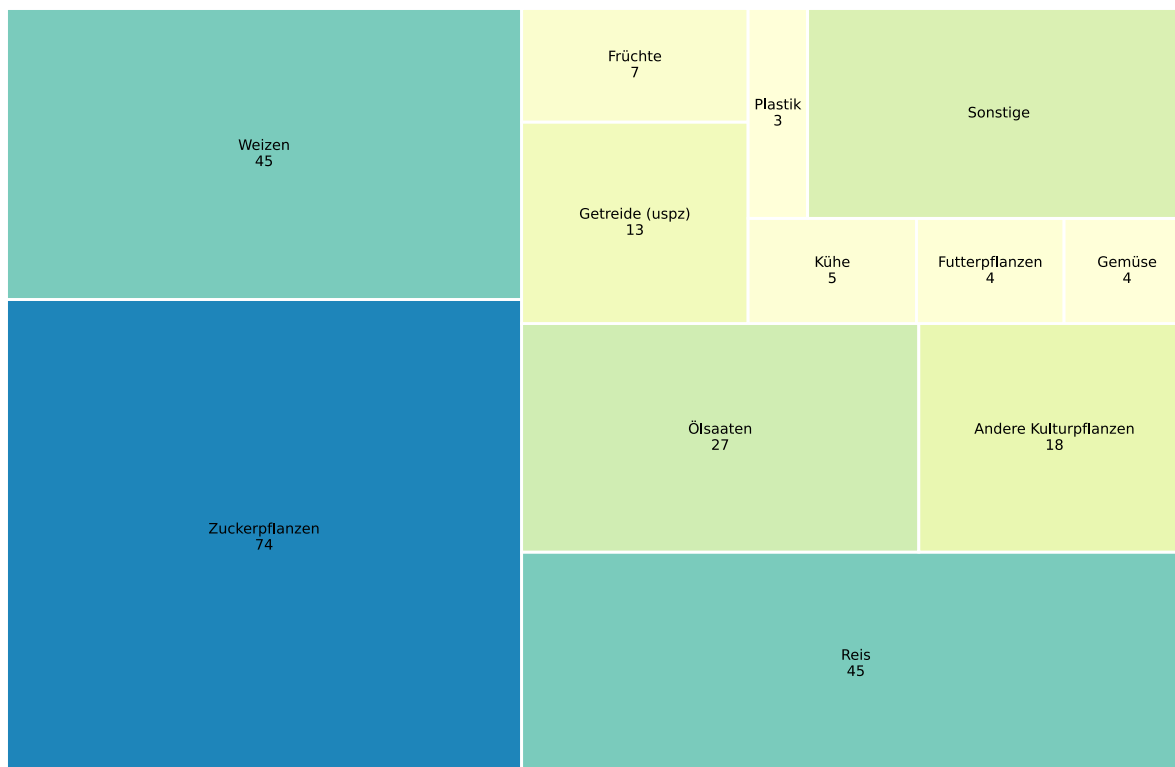
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Chemikalien unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 63: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Chemikalien unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW)

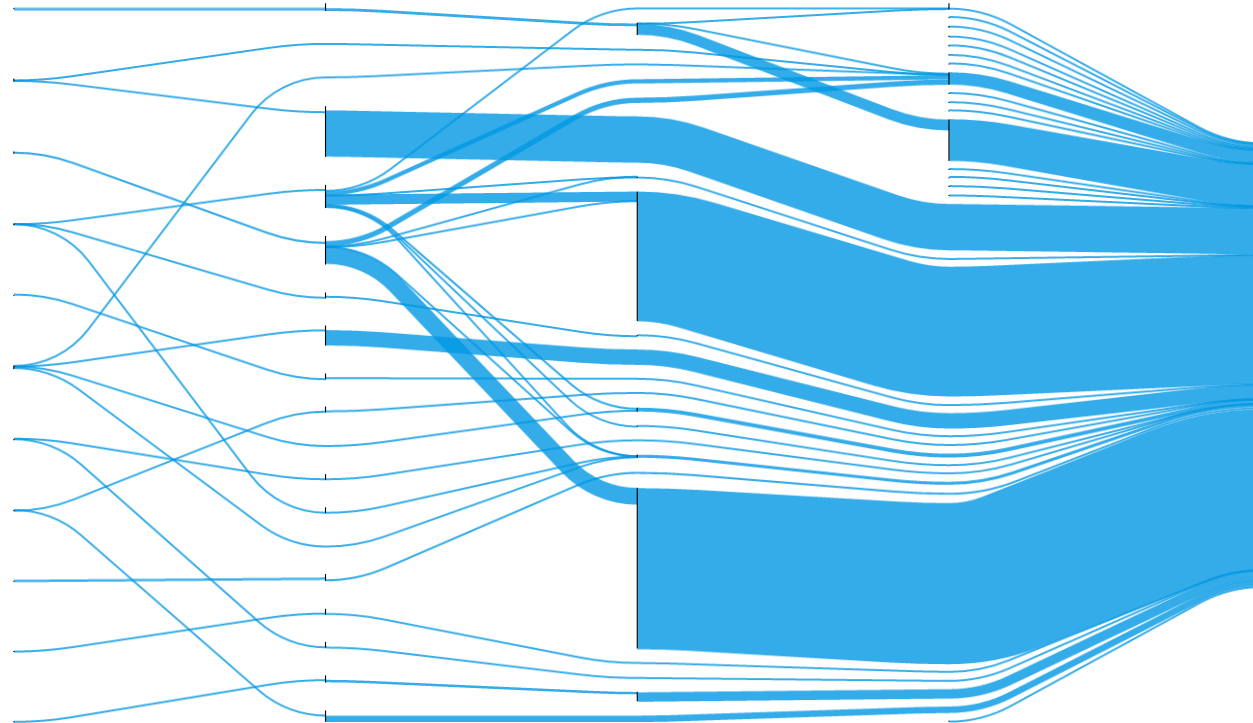
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Chemikalien unspezifisch (Asien und Pazifik, RoW) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 64: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Mittlerer Osten, RoW)

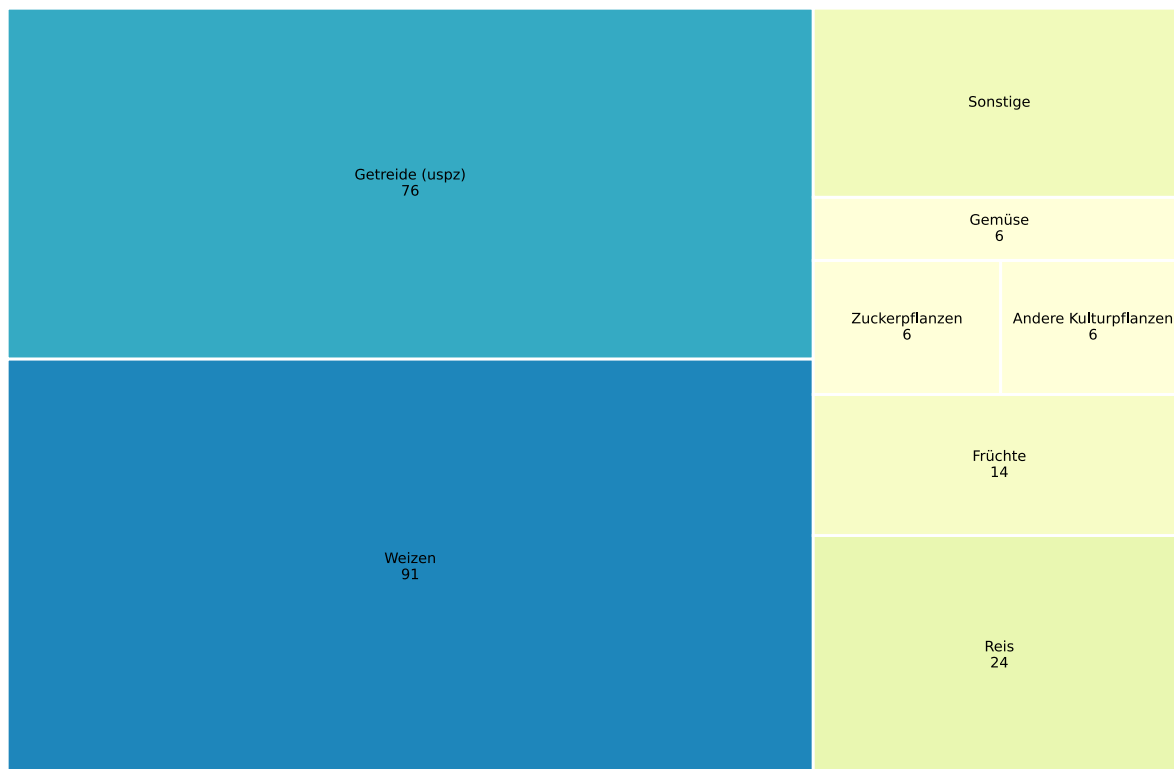
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Mittlerer Osten, RoW).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 65: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Mittlerer Osten, RoW)

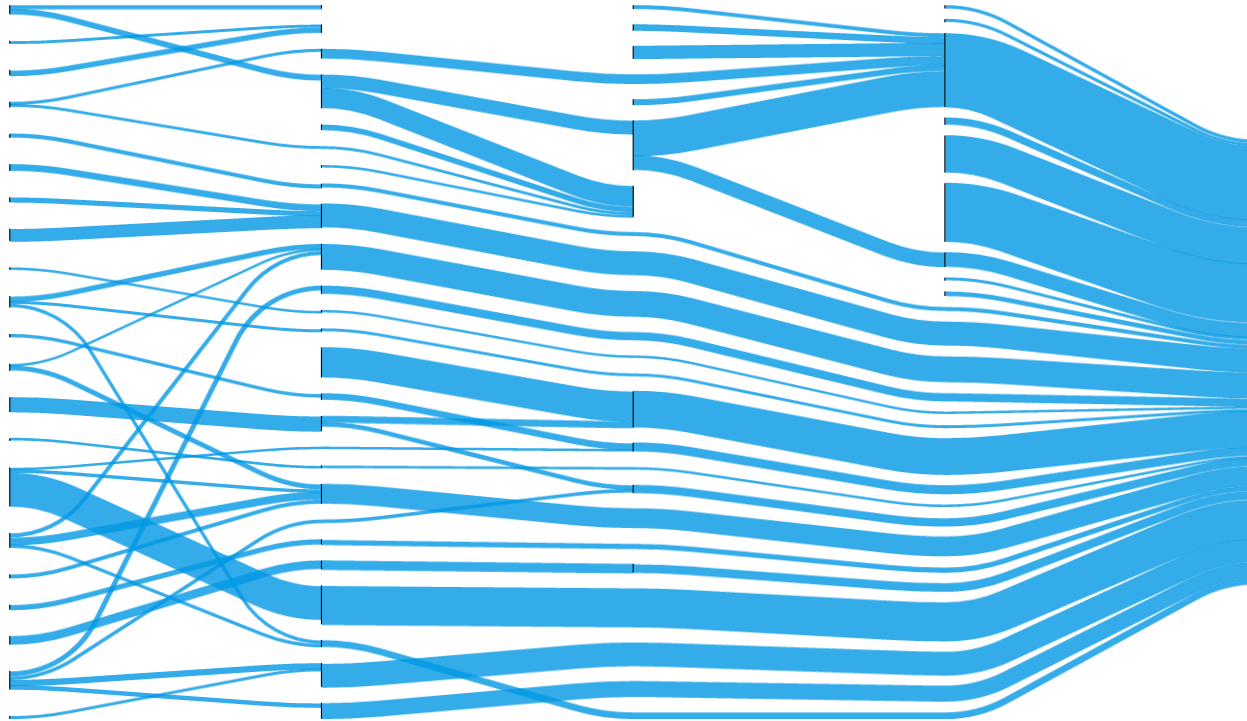
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Mittlerer Osten, RoW) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 66: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger (Deutschland)

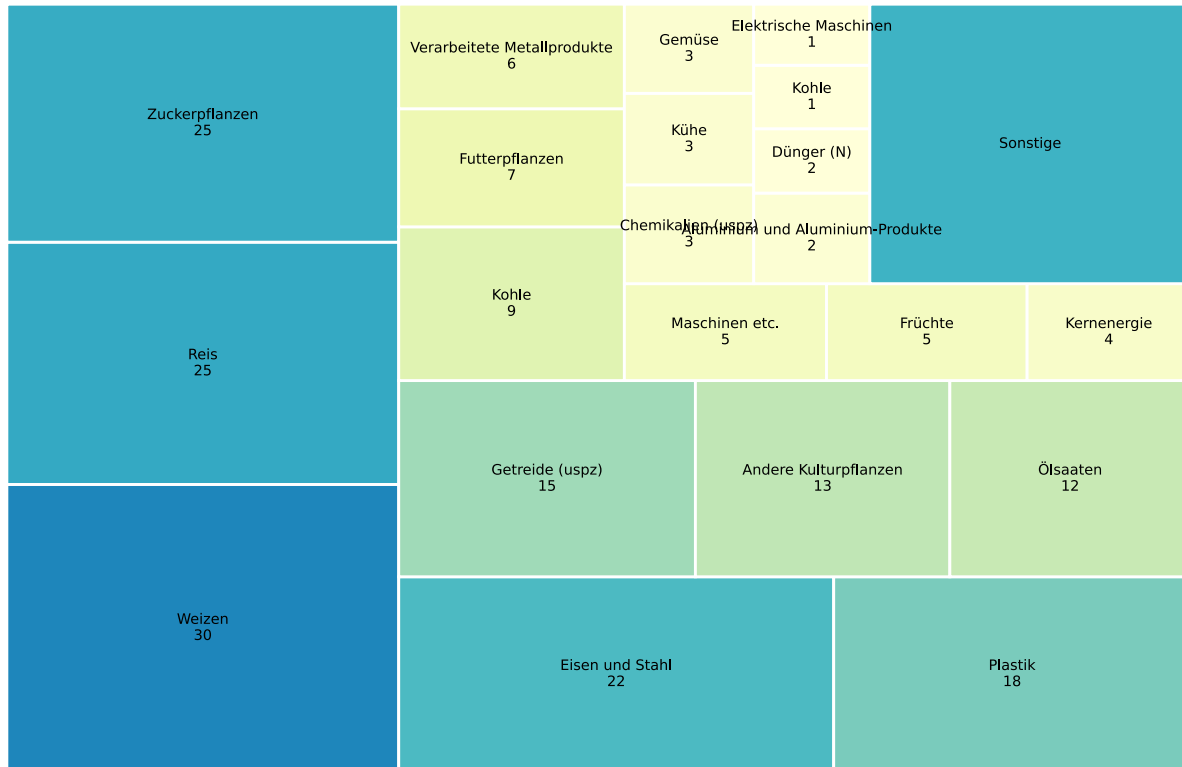
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger (Deutschland).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 67: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger (Deutschland)

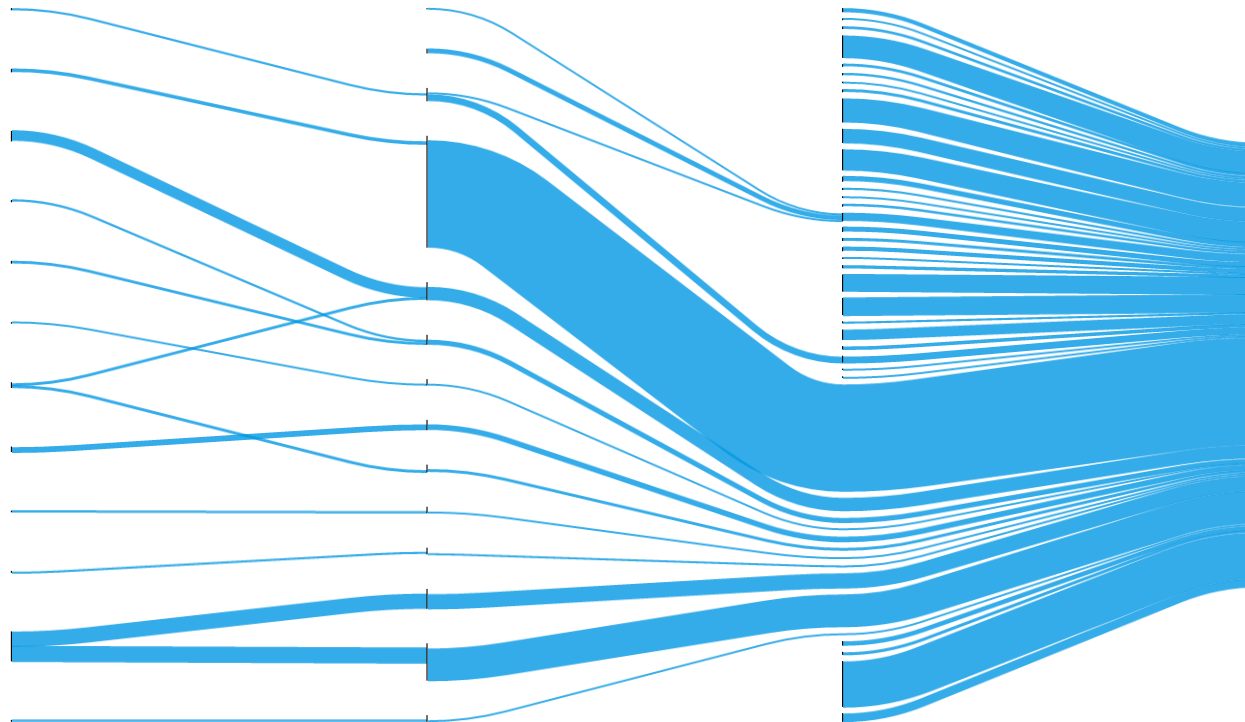
Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Kraftfahrzeuge, Anhänger und Sattelanhänger (Deutschland) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 68: Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Niederlande)

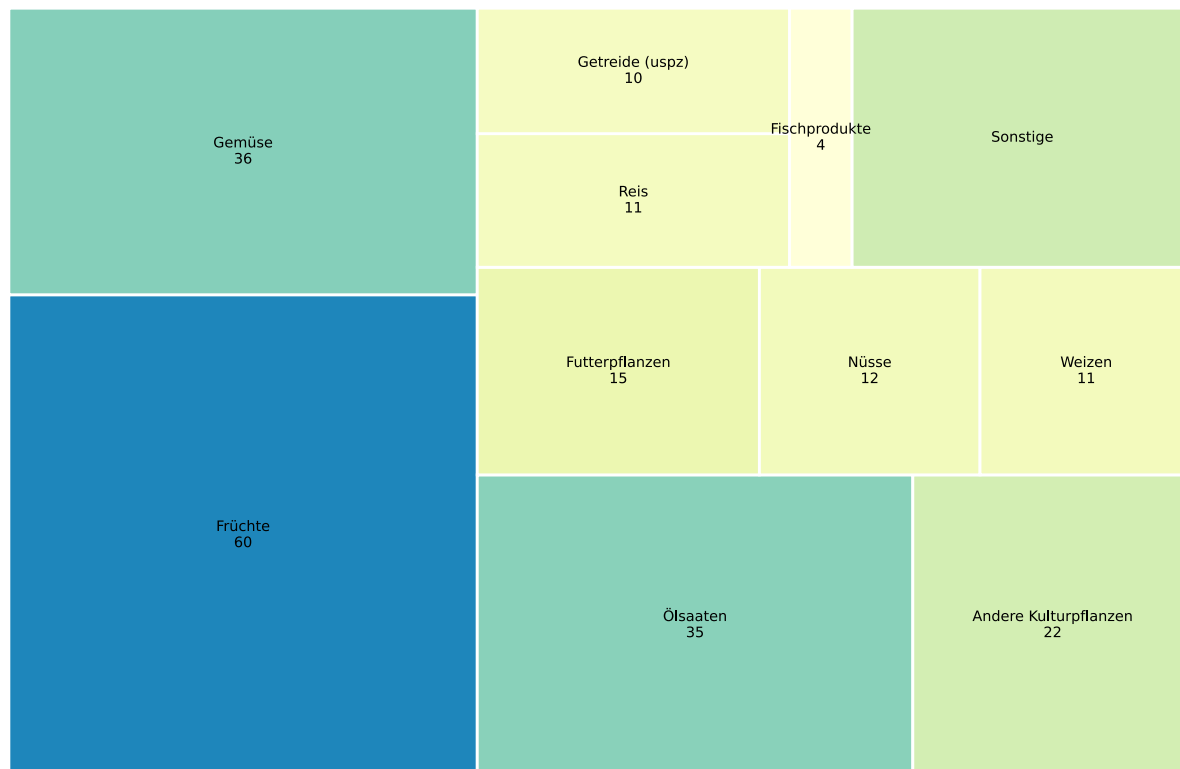
Die Abbildung zeigt die höchsten Beiträge zum blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Niederlande).



Quelle: Exiobase-Datenbank

Abbildung 69: Spezifischer konsumbasierter blauer Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Niederlande)

Die Abbildung zeigt die höchsten spezifischen Beiträge zum konsumbasierten blauen Wasserverbrauch des Sektors Nahrungsmittel unspezifisch (Niederlande) in Mm3.



Quelle: Exiobase-Datenbank

C Verifizierung der Ergebnisse

Ein Teil der berichteten Ergebnisse können mit dem nachfolgenden Python-Code und der Exiobase 3.8.1 (Stadler et al. 2021) verifiziert werden. Der Code berechnet beispielhaft die produktionsbasierte Sachbilanz der Endnachfrage von Deutschland. Die Summe der Ergebnisse aller Indikatoren ergibt den gesamten konsuminduzierten blauen und grünen Wasserverbrauch Deutschlands.

```
# Sources:
# https://pymrio.readthedocs.io/en/latest/
# https://pymrio.readthedocs.io/en/latest/notebooks/working_with_exiobase.html
# https://pymrio.readthedocs.io/en/latest/notebooks/buildflowmatrix.html

import pymrio
import pandas as pd

# %% Import Exiobase

exio3_path = '/IOT_2021_pxp'

exio3 = pymrio.parse_exiobase3(path=exio3_path)

# Production matrix F (see: https://pymrio.readthedocs.io/en/latest/math.html)
production_matrix_F = exio3.satellite.F

# %% Determine satellites

# Get blue water satellites
water_satellites_blue = production_matrix_F.index[
    production_matrix_F.index.str.contains('Water Consumption Blue')
]

# Get green water satellites
water_satellites_green = production_matrix_F.index[
    production_matrix_F.index.str.contains('Water Consumption Green')
]

# %% Calculate the green and blue water footprint of Germany

wf_results_consumption_based = {}

# For all green and blue water satellites

for i, satellite in enumerate(
    list(water_satellites_green)
    + list(water_satellites_blue)
):

    print(
        '\nProcessing satellite {} of {}: \n{}'.format(
            i+1,
            len(
                list(water_satellites_green)
                + list(water_satellites_blue)
            ),
            satellite
        )
    )

    etl_diag = exio3.satellite.diag_stressor(
        (satellite),
        name = satellite
    )
```

```
# Connect back to the system
exio3.etl_diag = etl_diag

# Calculate all the stressor accounts
exio3.calc_all()

# The consumption-based grouped footprint of a region
wf_results_consumption_based[satellite] = exio3.etl_diag.D_cba.sum(
    axis=0
).DE

# %% Turn into DF and save

consumption_based_footprint_DE = pd.DataFrame.from_dict(
    wf_results_consumption_based
)

consumption_based_footprint_DE.to_excel(
    'consumption_based_footprint_DE.xlsx'
)
```

D Zusatzmaterial

Auf den externen Anhang kann über folgende Webadresse zugegriffen werden:

<https://wf-tools.see.tu-berlin.de/der-wasserfussabdruck-von-deutschland/>