

Methodenentwicklung zur Bewertung von siedlungswasser- wirtschaftlichen und wasser- wirtschaftlichen Anlagen hinsichtlich ihres ökologischen Fußabdrucks

Im Auftrag von:





ABSCHLUSSBERICHT

Methodenentwicklung zur Bewertung von siedlungswasser- wirtschaftlichen und wasser- wirtschaftlichen Anlagen hinsichtlich ihres ökologischen Fußabdrucks

Aachen, im Juni 2011
FiW an der RWTH Aachen

Mülheim, im Juni 2011
IWW, Mülheim

Dr.-Ing. F.-W. Bolle

Dr.-Ing. W. Merkel

Projektbearbeitung

Institution

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft
an der RWTH Aachen (FiW) e.V.
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
52056 Aachen

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung
gemeinnützige GmbH
Moritzstr. 26
45476 Mülheim an der Ruhr

Bearbeiter

Dr.-Ing. F.-W. Bolle
Dipl.-Ing. K. Genzowsky

Dr.-Ing W. Merkel
Dipl.-Ing. A. Rohn

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung.....	5
2.1	Hintergründe	5
2.2	Ziele	5
3	Der Carbon Footprint.....	7
3.1	Definition des Carbon Footprint	7
3.2	Der Treibhauseffekt	7
3.3	Treibhausgase	8
3.3.1	Kohlenstoffdioxid	9
3.3.2	Methan.....	10
3.3.3	Distickstoffoxid.....	12
4	Methodische Empfehlungen zur Carbon-Footprint-Bilanzierung	13
4.1	Stand der internationalen Standardisierungsprozesse	13
4.2	Bilanzierungsregeln	13
5	Literaturrecherche zum aktuellen Kenntnisstand der Carbon-Footprint-Bilanzierung in der Wasserwirtschaft.....	17
5.1	Wasserwirtschaft allgemein	17
5.2	Abwasserreinigungsanlagen.....	19
5.2.1	Indirekte Emissionen	19
5.2.2	Bau und Maschinentechnik	20
5.2.3	Direkte Emissionen.....	20
5.2.3.1	CH ₄ Emissionen aus der Abwasserreinigung	20
5.2.3.2	N ₂ O-Emissionen aus der Abwasserreinigung.....	24
5.2.3.3	Klärschlammverbrennung.....	29
5.2.3.4	Klärschlammnutzung in der Landwirtschaft.....	30
5.2.3.5	Ozonung	30
5.3	Trinkwasserversorgung	31
5.4	Sonderbauwerke und Sammler	33
5.4.1	Direkte Emissionen.....	33
5.4.1.1	CH ₄ Emissionen.....	33
5.4.2	N ₂ O Emissionen	35
5.5	Pumpwerke.....	36
5.5.1	Direkte Emissionen.....	36
5.5.2	Indirekte Emissionen	36
5.6	Oberflächengewässer und Talsperren.....	37
5.6.1	Indirekte Emissionen	37

5.6.2	Direkte Emissionen.....	37
6	Bilanzierung von Kläranlagen	40
6.1	Festlegung der Systemgrenzen und des Prozessnetzes	40
6.2	Identifizierung der Energie- und Stoffströme sowie der Emissionsquellen	41
6.2.1	Mechanische Reinigung	41
6.2.2	Biologische Reinigung	44
6.2.3	Schlammfaulung.....	45
6.3	Bilanzierung von Musterkläranlagen.....	46
6.3.1	Carbon Footprint einer kommunalen 10.000 EW Beispielkläranlage ..	47
6.3.2	Carbon Footprint einer kommunalen 100.000 EW Beispielkläranlage	50
7	Bilanzierung der Trinkwasserversorgung	54
7.1	Festlegung der Systemgrenzen und des Prozessnetzes	54
7.2	Emissionsquellen.....	56
7.3	Bilanzierung eines Musterwasserwerkes.....	57
8	Bilanzierung von Pumpwerken.....	61
8.1	Festlegung der Systemgrenzen	61
8.2	Emissionsquellen.....	62
8.2.1	Betrieb	63
8.2.2	Instandhaltung	63
8.3	Bilanzierung von Musterpumpwerken.....	63
8.3.1	Musterabwasserpumpwerk.....	63
8.3.2	Mustergrundwasserhaltungspumpwerk.....	67
9	Bilanzierung von Sonderbauwerken und Sammlern.....	70
9.1	Emissionsquellen.....	71
9.1.1	Betrieb	71
9.1.2	Instandhaltung	72
9.2	Bilanzierung von Musterbauwerken.....	72
9.2.1	Musterregenklärbecken	72
9.2.2	Mustersammler.....	75
10	Bilanzierung von Talsperren.....	79
10.1	Ausgangssituation und Besonderheiten	79
10.2	Festlegung der Systemgrenzen und des Prozessnetzes	79
10.3	Emissionsquellen und funktionelle Einheit.....	81
10.4	Bilanzierung von Musteranlagen	83
11	Bilanzierung von Oberflächengewässern	87
11.1	Ausgangssituation und Besonderheiten	87
11.2	Festlegung der Systemgrenzen und des Prozessnetzes	87

11.3	Emissionsquellen und funktionelle Einheit.....	89
11.4	Musterbilanzierung	91
11.4.1	Gesamtbilanz für Flussgebiete	91
11.4.2	Bilanzierung einer Renaturierungsmaßnahme	94
11.4.3	Bilanzierung einer Sohlschnittmaßnahme	95
11.4.4	Bilanzierung von Hochwasserrückhaltebecken	96
12	Ausblick.....	97
13	Literatur	99
14	Anhang.....	104
14.1	Emissionsfaktoren	104
14.2	Basisdaten für die Musterbilanzierung der Kläranlagen	107
14.2.1	Energieverbräuche	107
14.2.2	Baustoffbedarf	109
14.2.3	Grundlagendaten der 10.000 EW Musterkläranlage	109
14.2.4	Grundlagendaten der 100.000 EW Musterkläranlage	114
14.2.5	Steckbrief für die Datenerhebung an Kläranlagen.....	120
14.3	Basisdaten für die Musterbilanzierung von Pumpwerken	124
14.4	Basisdaten für die Musterbilanzierung von Sonderbauwerken.....	127
14.5	Basisdaten für die Musterbilanzierung der Gewässerbewirtschaftung	129
14.5.1	Flussgebiete	129
14.5.2	Renaturierungsmaßnahme.....	131
14.5.3	Entkrautungsmaßnahme des Niersverbandes	132
14.5.4	Hochwasserrückhaltebecken des WVER	132
14.5.5	Vorlage Kurzsteckbrief für Gewässer	134
14.5.6	Kurzsteckbriefe der Talsperren des WVER.....	135

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1:	Prozessschema für Kläranlagen zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen.....	3
Abbildung 3-1:	Schematische Darstellung des Treibhauseffektes (BHKW-Infozentrum)	8
Abbildung 3-2:	Phasen des anaeroben Abbaus (Mollekopf, Polster <i>et al.</i> , 2006)	10
Abbildung 3-3:	N ₂ O-Quellen in Deutschland nach (Schön, Walz <i>et al.</i> , 1993)	12
Abbildung 4-1:	CO ₂ -Emissionsfaktor deutscher Strommix (Umwelt-Bundesamt, 2010).....	15
Abbildung 5-1:	Schematische Darstellung des Stickstoffkreislaufes nach (Firestone,Davidson, 1989)	24
Abbildung 5-2:	Untersuchungen zur N ₂ O-Bildung in der Abwasserreinigung (Kampschreur, Temmink <i>et al.</i> , 2009).....	25
Abbildung 5-3:	Schematische Darstellung der Nitrifikation nach (Seiler,Conrad, 1981).....	26
Abbildung 5-4:	Reaktionsschema der N ₂ O-Bildung in einem Ozongenerator	31

Abbildung 5-5:	Methanbildung in Abwasserkanälen als Funktion der hydraulischen Verweilzeit und A/V-Verhältnis (Guisasolaa, Sharmaa <i>et al.</i> , 2009)	35
Abbildung 6-1:	Systemgrenzen zur Ermittlung des Carbon Footprint einer kommunalen Kläranlage	41
Abbildung 6-2:	Systemgrenzen der mechanische Reinigung	42
Abbildung 6-3:	Systemgrenzen der biologische Reinigung	44
Abbildung 6-4:	Bilanzierung Klärschlammfaulung	45
Abbildung 6-5:	Bilanz Faulschlammmentsorgung	46
Abbildung 6-6:	Verfahrensfließbild der Modellkläranlage mit aerober Klärschlammstabilisierung (10.000 EW).....	47
Abbildung 6-7:	GWP-Verteilung einer kommunalen Beispiel-Kläranlage (10.000 EW).....	49
Abbildung 6-8:	Verfahrensfließbild der Modellkläranlage mit anaerober Klärschlammstabilisierung (100.000 EW).....	50
Abbildung 6-9:	GWP-Verteilung einer kommunalen Beispiel-Kläranlage (100.000 EW)....	52
Abbildung 6-10:	Vergleich unterschiedlicher N ₂ O-Emissionsfaktoren auf den Carbon Footprint einer kommunalen Modellkläranlage.....	53
Abbildung 7-1:	Systemgrenze Trinkwasserversorgung	54
Abbildung 7-2:	Teilprozesse der Trinkwasserversorgung.....	55
Abbildung 7-3:	Systemgrenzen in der Wasserversorgung	57
Abbildung 7-4:	Prozentuale Verteilung der Treibhausgasemissionen eines Muster-Wasserwerkes	60
Abbildung 8-1:	Systemgrenzen eines Pumpwerkes	62
Abbildung 8-2:	Graphische Darstellung der CF-Bilanz eines Abwasserpumpwerkes	67
Abbildung 8-3:	Graphische Darstellung der CF-Bilanz eines Grundwasserpumpwerkes...	69
Abbildung 9-1:	Systemgrenzen eines Sonderbauwerkes.....	71
Abbildung 9-2:	Verteilung der Treibhausgasemissionen eines Regenklärbeckens.....	75
Abbildung 9-3:	Verteilung des GWP eines Abwassersammlers	78
Abbildung 10-1:	Schematische Darstellung des Systems Talsperre (Merkel, Graf, 2007)...	80
Abbildung 10-2:	Bauwerk orientiertes Prozessschema für Talsperren	81
Abbildung 10-3:	Aufgaben orientiertes Prozessschema für Talsperren	81
Abbildung 10-4:	Emissionsquellen der Talsperrenbewirtschaftung	82
Abbildung 10-5:	Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der Oleftalsperre	85
Abbildung 10-6:	Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der Urfttalsperre	85
Abbildung 10-7:	Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der Wehetalsperre	86
Abbildung 10-8:	Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der Rurtalsperre	86
Abbildung 11-1:	Haupt- und Teilprozesse im Bilanzraum Flussgebietsbewirtschaftung	88
Abbildung 11-2:	Prozesse im Bilanzraum Hochwasserschutz.....	89
Abbildung 11-3:	Emissionsquellen der Flussgebietsbewirtschaftung	90
Abbildung 11-4:	Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF des Erftverbandes.....	92
Abbildung 11-5:	Verteilung der Treibhausgasemissionen beim Erftverband.....	92

Abbildung 11-6: Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der LINEG	93
Abbildung 11-7: Verteilung der Treibhausgasemissionen bei der LINEG	94
Abbildung 11-8: THG-Emissionen bei einer Renaturierungsmaßnahme des Erftverbandes	95
Abbildung 11-9: THG-Emissionen der Teilmaßnahmen bei einer Entkrautung eines 4 km langen Niers-Abschnittes.....	96

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1-1: THG-Emissionen von Musterbilanzierungen	4
Tabelle 3-1: GWP bekannter Treibhausgase (IPCC, 2007)	9
Tabelle 5-1: MKF-Werte für kommunales Abwasser (IPCC, 2006).....	22
Tabelle 5-2: CH ₄ -Emissionfaktoren bei der Klärschlammbehandlung.....	23
Tabelle 6-1: CF-Bilanz einer 10.000 EW Modellkläranlage.....	48
Tabelle 6-2: CF-Bilanz einer 100.000 EW Modellkläranlage.....	51
Tabelle 7-1: Ergebnisse der CF-Bilanzierung für ein Musterwasserwerk.....	59
Tabelle 8-1: Basisdaten des Musterabwasserpumpwerkes	64
Tabelle 8-2: Basisdaten der peripheren Anlagenteile des Abwasserpumpwerkes.....	64
Tabelle 8-3: Basisdaten der Bautechnik des Abwasserpumpwerkes.....	65
Tabelle 8-4: Basisdaten der Instandhaltungsarbeiten eines Abwasserpumpwerkes	65
Tabelle 8-5: Basisdaten der Abfallentsorgung eines Abwasserpumpwerkes.....	65
Tabelle 8-6: CF-Bilanz eines Abwasserpumpwerkes	66
Tabelle 8-7: Basisdaten des Muster-Grundwasserpumpwerkes	67
Tabelle 8-8: Basisdaten der Instandhaltungsarbeiten eines Grundwasserpumpwerkes	68
Tabelle 8-9: Basisdaten der Bautechnik eines Grundwasserpumpwerkes	68
Tabelle 8-10: CF-Bilanz eines Grundwasserpumpwerkes	69
Tabelle 9-1: Berechnungsdaten eines Regenklärbeckens im Dauerstau	73
Tabelle 9-2: Instandhaltungsaufwand eines RKB im Dauerstau	73
Tabelle 9-3: Bautechnische Aufwendungen eines RKB im Dauerstau.....	74
Tabelle 9-4: CF-Bilanz eines Regenklärbeckens im Dauerstau.....	74
Tabelle 9-5: Bemessungslagen des Mustersammlers.....	75
Tabelle 9-6: Wartungs- und Reinigungsaufwand des Modellsammlers	76
Tabelle 9-7: Bautechnischer Aufwand eines Sammlers	76
Tabelle 9-8: Annahmen zur Berechnung der direkten Emissionen eines Sammlers	77
Tabelle 9-9: GWP eines Musterabwassersammlers	77
Tabelle 10-1: Kenngrößen, Verbrauchsmengen und Treibhausgasemissionen von 4 Talsperren des WVER.....	84
Tabelle 14-1: CO ₂ -Emissionsfaktoren ausgewählter Chemikalien in der Abwasserreinigung	104
Tabelle 14-2: CO ₂ -Emissionsfaktoren ausgewählter Brennstoffe.....	105

Tabelle 14-3:	CO ₂ -Emissionsfaktoren ausgewählter Baumaterialien	105
Tabelle 14-4:	CO ₂ -Emissionsfaktoren ausgewählter Baustoffe und Bauprozesse.....	106
Tabelle 14-5:	Energieverbrauch Abwasserreinigung.....	107
Tabelle 14-6:	Energieverbrauch Schlammbehandlung	108
Tabelle 14-7:	Energieverbrauch Verwaltung	108
Tabelle 14-8:	Statistische Auswertung des Baustoffbedarfs von Kläranlagen nach Ausbaugröße	109
Tabelle 14-9:	Zulaufdaten und Frachten	109
Tabelle 14-10:	Rechengutanfall.....	110
Tabelle 14-11:	Sandgutanfall.....	110
Tabelle 14-12:	Klärschlammanfall	110
Tabelle 14-13:	Energiebedarf.....	110
Tabelle 14-14:	Zulauf und Frachten	114
Tabelle 14-15:	Rechengutanfall.....	114
Tabelle 14-16:	Sandgutanfall.....	115
Tabelle 14-17:	Energiebedarf.....	115
Tabelle 14-18:	Stromverbrauch des Erftverbandes und berechnete CO ₂ e-Emissionen ..	129
Tabelle 14-19:	Treibstoffverbrauch des Erftverbandes und berechnete CO ₂ e-Emissionen	130
Tabelle 14-20:	Verbrauch von Gas und Heizöl bei Erftverband und berechnete CO ₂ e- Emissionen	130
Tabelle 14-21:	Stromverbrauch der LINEG und berechnete CO ₂ e-Emissionen.....	130
Tabelle 14-22:	Treibstoffverbrauch der LINEG und berechnete CO ₂ e-Emissionen	131
Tabelle 14-23:	Verbrauchsmengen für eine Renaturierungsmaßnahme des Erftverbandes und berechnete CO ₂ e-Emissionen	131
Tabelle 14-24:	Verbrauchsmengen für eine Sohlschnittmaßnahme des Niersverbandes und berechnete CO ₂ e-Emissionen	132
Tabelle 14-25:	Verbrauchsmengen für zwei Hochwasserrückhaltebecken des WVER und berechnete CO ₂ e-Emissionen	133

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Erläuterung	Einheit
ΔG_0	Freie Gibb'sche Enthalpie	
A	Absetzbare Stoffe	[ml/l]
a	Anno - Jahr	
A/V	Oberfläche zu Volumenverhältnis	[m ² /m ³]
atm	Atmosphäre = 1,0133 bar	[atm]
B ₀	Maximale Methanproduktion in Relation zum CSB	[kgCH ₄ /kgCSB]
BB	Belebungsbecken	
BHKW	Blockheizkraftwerk	
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	[mg/L]
C	Kohlenstoff	
c	Konzentration	[mg/L]
C ₁₃ H ₂₅ O ₇ N ₃ S	Summenformel eines Proteins	
C ₁₆ H ₃₂ O ₂	Summenformel eines Fettes	
C ₆ H ₁₂ O ₆	Summenformel eines Kohlenhydrates	
CF	Carbon Footprint	
CH ₃ COOH	Essigsäure	
CH ₄	Methan	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente	[t] oder [kg]
COD	chemical oxygen demand – Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg/L]
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg/L]

DN	Nenndurchmesser	[mm]
DOC	dissolved organic carbon – gelöster organischer gebundener Kohlenstoff	[mg/L]
e^-	Elektron	
EF	Emissionsfaktor	
EW	Einwohner	
$f(1..n)$	Funktionelle Abhängigkeit von n Parametern	
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe	
$FeCl_3$	Eisenchlorid	
$FeSO_4$	Eisensulfat	
g	Gramm	[g]
GWP	Global Warming Potential	
h	Förderhöhe	[m]
h	Stunde	[h]
H^+	Proton	
H_2	Wasserstoff	
H_2O	Wasser	
H_2S	Schwefelwasserstoff	
HCl	Salzsäure	
HRB	Hochwasserrückhaltebecken	
HRT	hydraulic retention time – hydraulische Verweilzeit	[h]
HS^-	Sulfid	
j	Indizie zur Unterscheidung von Einzelprozessen	
KA	Kläranlage	

kg	Kilogramm	[kg]
KH	Kohlenhydrate	
km	Kilometer	[km]
kW	Kilowatt	[kW]
kWh	Kilowattstunde	[kWh]
LOX	Liquid oxygen – Flüssigsauerstoff	
m	Masse	[kg]
m ²	Quadratmeter	[m ²]
m ³	Kubikmeter	[m ³]
mg	Milligramm	[mg]
MKF	Methankorrekturfaktor	
mm	Millimeter	[mm]
N ₂	Elementarer Stickstoff	
N ₂ O	Distickstoffoxid	
N ₂ O-N	Molenbruch des Stickstoffanteils von N ₂ O	
NaOH	Natriumhydroxid	
NH ₂ OH	Hydroxylamin	
NH ₃	Ammoniak	
NH ₄ ⁺	Ammonium	
NK	Nachklärung	
NO	Stickstoffmonoxid	
NO ₂ ⁻	Nitrit	
NO ₃ ⁻	Nitrat	

NOH	Nitroxyl	
NO _x	Gesamtheit der Stickoxide	
O ⁻	Freies Sauerstoffradikal	
O ₂	Sauerstoff	
O ₃	Ozon	
P	Phosphor	
pH-Wert	Negativer dekadischer Logarithmus der H ⁺ -Ionenkonzentration	
PKW	Personenkraftwagen	
ppm	parts per million	
PSA	pressure swing adsorption – Druckwechseladsorption	
PW	Pumpwerk	
Q _s	Schmutzwasservolumenstrom	[m ³ /d]
Q _t	Volumenstrom bei Teilfüllung	[L/s]
Q _v	Volumenstrom bei Vollfüllung	[L/s]
R	Fraktion der energetisch genutzten Faulgasmenge	
RKB	Regenklärbecken	
RZ	Rezirkulation	
S	CSB-Anteil im Klärschlamm	
SF	Sandfang	
SF ₆	Schwefelhexafluorid	
SO ₄ ²⁻	Sulfat	
t	Tonne	[t]

THG	Treibhausgas	
TJ	Terrajoule	
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen	
TR	Trockenrückstand	
TS	Trockensubstanz	
UV	Ultraviolettes Licht	
VK	Vorklä rung	
Vol.-%	Volumenprozent	
v_t	Fließgeschwindigkeit bei Teilfüllung	[m/s]
v_v	Fließgeschwindigkeit bei Vollfüllung	[m/s]
W	Watt	[W]
Wh	Wattstunde	[Wh]
ζ	Druckverlust	[-]
η	Wirkungsgrad	[-]

1 Zusammenfassung

Der Carbon Footprint (CF) ist ein Maß für die Menge der Treibhausgase, die z.B. durch ein Produkt, eine Dienstleistung oder eine Organisation in einer definierten Zeitspanne verursacht werden. In der Regel umfasst der CF die gesamte Lebensdauer - einschließlich der späteren Verwertung oder Entsorgung. Die Ermittlung des CF erfolgt mittlerweile weltweit für eine Vielzahl von Prozessen und Produkten.

Auslöser dieser Bemühungen war der weltweite Klimawandel, der auf den Ausstoß von anthropogenen Treibhausgasen zurückzuführen ist. Im Rahmen des Kyoto-Abkommens wurden deshalb weitgehende Maßnahmen zur Minderung des sogenannten Treibhauseffekts, also der globalen Erwärmung und Klimaveränderung festgelegt.

Auch der Wasser- und Abwassersektor muss sich dieser Aufgabe stellen und steht somit vor der Herausforderung, neue emissionsärmere Anlagen, Prozesse und Betriebsweisen zu suchen. Eine Analyse und Bewertung der Treibhausgasemissionen bei der Aufgabenerfüllung der Wasserwirtschaft wurde bisher nur in Ansätzen vorgenommen. Ein allgemein akzeptierter Ansatz für eine umfassende Bilanzierung des CF fehlt. Dieser ist aber eine Voraussetzung dafür, Klimaverträglichkeit transparent zu machen und Minderungspotentiale aufzuzeigen.

Die linksrheinischen sondergesetzlichen Wasserverbände haben deshalb das Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V. und das IWW mit einem entsprechenden Projekt beauftragt.

In einem ersten Schritt wurde eine Systematik zur Berechnung des Carbon Footprint für folgende wasserwirtschaftliche Systeme bzw. Anlagen entwickelt:

- Kläranlagen
- Wasserwerke (einschließlich Verteilungsnetz)
- Gewässerabschnitte
- Talsperren
- Pumpwerke
- Sonderbauwerke und Sammler

Dies erfolgte auf der Grundlage aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse, die im Rahmen einer intensiven Literaturlauswertung ermittelt wurden. Bisher gibt es noch keinen allgemein verbindlichen Standard zur Ermittlung des Carbon Footprint in der Wasserwirtschaft. In Großbritannien wurde aber bereits eine allgemein gültige Methodik in Form eines Leitfadens (Public Available Specification PAS2050) (BSI, 2008) entwickelt, der eine gute Basis für das Vorgehen bei der Bilanzierung darstellt. Die Ausgestaltung für die verschiedenen Wirtschaftsbranchen bleibt allerdings offen.

Erste Erkenntnisse und Erfahrungen zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen in der Wasserwirtschaft liegen bereits für Kläranlagen und in Ansätzen auch für die Wasserversorgung (in den Niederlanden und in Großbritannien) vor. Das Vorgehen bei der Bilanzierung ist allerdings nicht einheitlich und lässt Fragen offen. Für alle weiteren Aufgabengebiete der Wasserwirtschaft sind bisher keine methodischen Ansätze bekannt.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde gemeinsam mit Vertretern der Auftraggeber für jedes Betrachtungssystem zunächst ein Prozessnetz mit allen zugehörigen Haupt- und Unterprozessen aufgestellt und die Systemgrenzen entsprechend festgelegt. Außerdem erfolgte eine Analyse der Prozesse hinsichtlich der Quellen für Treibhausgasemissionen, wobei sämtliche Stoff- und Energieströme zu berücksichtigen waren, die in das System eingebracht werden und das System verlassen (Input, Verbrauch, Output). Folgende Daten müssen für die CF Bilanzierung für alle Teilprozesse erhoben werden:

Inputs/Outputs	verbrauchte Energie	direkte THG-Emissionen	Transporte
• Material-Input • Produkt-Output • Co-Produkte • Abfälle	• Elektrizität • fossile quellen	CO ₂ -, CH ₄ -, N ₂ O-Emissionen, die direkt in den Prozessen entstehen	• Fahrzeugtypen • Kraftstoffarten • Kraftstoffverbräuche

Ein aggregiertes Prozessschema wurde in Abbildung 1-1 beispielhaft für das System Kläranlage dargestellt. Angestrebt wird die Ermittlung der Treibhausgasemissionen auf der Ebene der Teilprozesse, also im Falle einer Kläranlage für jede Aufbereitungsstufe, um so Reduzierungspotenziale besser sichtbar machen und eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Anlagen gewährleisten zu können.

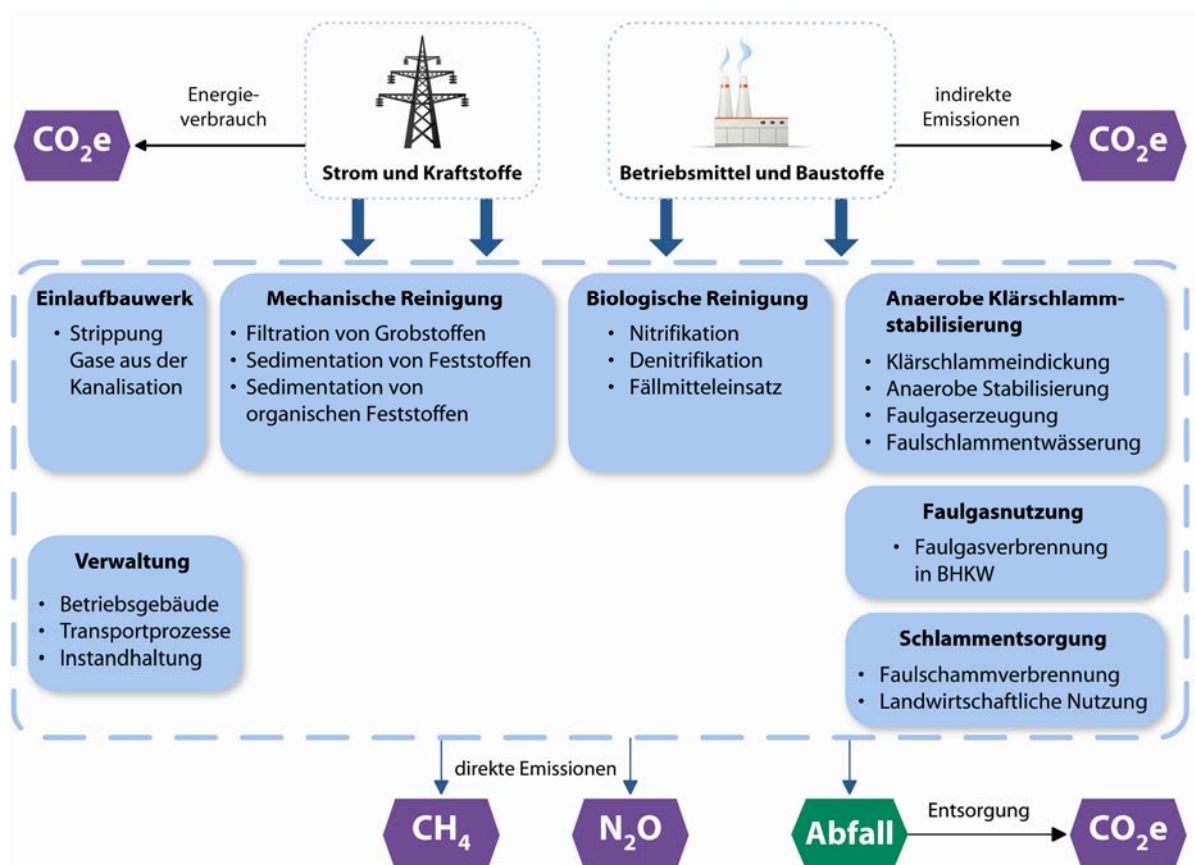


Abbildung 1-1: Prozessschema für Kläranlagen zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen

Eine Besonderheit von Talsperren und Flussgebieten ist deren starke Abhängigkeit von naturräumlichen Gegebenheiten (Morphologie, Geologie, Hydrologie, usw.). Dies macht eine Vergleichbarkeit schwierig, die nur bei ähnlichen Randbedingungen oder auf Teilprozessebene möglich ist. Deshalb ist es notwendig für alle zu bilanzierenden Anlagen bzw. Aufgabengebiete relevante Kontextinformationen mit zu erfassen, um eine richtige Beurteilung und ggf. auch eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Dafür wurden entsprechende Steckbriefe entwickelt.

Die gemeinsam mit den Verbandsvertretern entwickelte Bilanzierungssystematik wurde im Rahmen einer Grobanalyse an Musteranlagen angewendet und überprüft. Die ermittelten THG-Emissionen wurden in Tabelle 1-1 zusammengefasst. Es handelt sich dabei teilweise aber nur um ungefähre Richtwerte, da z. B. Baumaßnahmen und Fremdleistungen noch nicht berücksichtigt wurden.

Tabelle 1-1: THG-Emissionen von Musterbilanzierungen

Anlage / Aufgabe	Beschreibung	THG-Emissionen [t CO₂e /a]
Kläranlage 1	10.0000 EW	705
Kläranlage 2	100.000 EW	6.004
Flussgebiet 1	1.200 km Gewässer	437
Flussgebiet 2	379 km Gewässer	6550
Talsperre 1-4	19 – 195 Mio. m ³ Stauvolumen	111 - 211
Abwasserpumpwerk	1 Mio. m ³ /a 12 m Förderhöhe	35
Grundwasserpumpwerk	8 Mio. m ³ /a 200 m Förderhöhe	7.416
Regenklärbecken	200 m ³ 10 ha Anschlussfläche	2,79
Abwassersammler	SW-Sammler 5 km	56
Wasserversorgung	5.280.000 m ³ /a	1.682

Auf der Basis der entwickelten prozessorientierten Methodik kann der Carbon Footprint für jede wasserwirtschaftliche Aktivität eines verantwortlichen Akteurs, etwa eines Verbandes oder eines Wasserversorgers ermittelt und bewertet werden. Dies kann anschließend für einen gesamten Verband, ein Flussgebiet, ein Bundesland oder für ganz Deutschland zusammengeführt werden. Der Beitrag der Wasserwirtschaft zu den Minderungszielen der deutschen Anpassungsstrategie wird damit messbar und transparent. Gleichzeitig können die beteiligten Verbände ihre Aktivitäten zum Klimaschutz gut darstellen und in der Öffentlichkeit kommunizieren.

2 Einleitung

2.1 Hintergründe

Die Ergebnisberichte des International Panel for Climate Change (IPCC) sehen als wesentliche Auslöser des weltweiten Klimawandels den Ausstoß von anthropogenen Treibhausgasen. Im Rahmen des Kyoto-Abkommens wurden weitgehende Maßnahmen zur Minderung des sogenannten Treibhauseffekts, also der globalen Erwärmung und Klimaveränderung festgelegt.

Vor diesem Hintergrund sind alle Produzenten und Konsumenten dazu aufgefordert, einen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu leisten und ihre CO₂-Bilanz möglichst auszugleichen. Die CO₂-Bilanz (auch „Carbon Footprint“ genannt) – bezeichnet die Bilanz der Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Lebensdauer eines Produktes oder für die gesamte Erbringung einer Dienstleistung.

Auch der Wasser- und Abwassersektor muss sich dieser Aufgabe stellen und steht somit vor der Herausforderung, neue emissionsärmere Anlagen, Prozesse und Betriebsweisen zu suchen. Eine Voraussetzung dafür ist, dass der Carbon Footprint der Produkte und Prozesse bekannt ist. Er kann die diesbezügliche Klimaverträglichkeit transparent machen und als Grundlage dafür dienen, Minderungspotenziale aufzuzeigen und zu erschließen. Da die Aufbereitung vor und nach der Nutzung, die Bereitstellung, und schadlose Ableitung von Wasser für jede Gesellschaft essenziell sind, ist die Frage nach dem notwendigen Carbon Footprint der Wasserwirtschaft ebenso relevant, wie die Identifikation möglicher Minderungsansätze.

Für die deutsche Wasserwirtschaft existiert noch kein allgemein akzeptierter Ansatz zur Berechnung des Carbon Footprint - alle bisherigen Angaben sind vorläufige Hochrechnungen. Deshalb haben die linksrheinischen sondergesetzlichen Wasserverbände das Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V. und das IWW Zentrum Wasser damit beauftragt, eine entsprechende Bilanzierungssystematik zu entwickeln. Mittlerweile hat sich die gesamte Arbeitsgemeinschaft der zehn großen Wasserwirtschaftsverbände in Nordrhein-Westfalen „agw“ dem Projekt angeschlossen. Ziel ist es, Methoden zu entwickeln, die die Verbände bei Entscheidungen zu Neubau- und Modernisierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung des Carbon Footprint nachhaltig und wirtschaftlich unterstützen können

2.2 Ziele

Der CF kann zur Steuerung sowie zur internen und externen Kommunikation einer Klima schonenden Verbandsentwicklung eingesetzt werden. Mit ihm als objektives Ökobilanzierungskriterium wird eine Darstellung von Argumentationen und Berichten in

Verbandsräten oder Aufsichtsgremien unterstützt. So kann der Weg für die Einführung von ressourcen- und energiesparender Technik geebnet sowie die nachhaltige Entwicklung des Verbandes aufgezeigt werden. Die beteiligten Wasserverbände können hier eine Vorreiterrolle im Bundesgebiet einnehmen, möglicherweise mit Eingang in das Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft hinsichtlich des Klimaschutz-Engagements. Die Berücksichtigung des CF bei Entscheidungen zu Neubau- und Modernisierungsmaßnahmen wird die Verbandsentwicklung nachhaltig und wirtschaftlich optimieren.

Ziel des Projektes ist die Vorbereitung von Detailuntersuchungen der einzelnen wasserwirtschaftlichen Prozesse zur Ermittlung eines spezifischen CF, der als Grundlage für die Erstellung eines Maßnahmenkataloges zur nachhaltigen Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Wasserwirtschaft dienen soll.

Konkret wird für folgende Anlagen bzw. wasserwirtschaftliche Aufgabengebiete eine Carbon Footprint -Systematik entwickelt:

- Kläranlagen
- Wasserwerke (einschließlich Verteilungsnetz)
- Gewässerabschnitte
- Talsperren
- Pumpwerke
- Sonderbauwerke und Sammler

Für diese Teilkomponenten werden Bilanzräume festgelegt und zu berücksichtigende Prozesse definiert. Ziel ist ein vollständiges Abbild aller wasserwirtschaftlichen Aufgaben für ein branchenweites CF-Bilanzierungssystem. Anhand der entwickelten Bilanzierungssystematik werden mit Hilfe von Literaturdaten überschlägige Berechnungen für Musteranlagen/-prozesse durchgeführt. Die Ergebnisse werden ausgewertet und hinsichtlich ihrer jeweiligen Beiträge zum Gesamt-CF und dem zu erwartenden Minderungspotential priorisiert.

3 Der Carbon Footprint

3.1 Definition des Carbon Footprint

Die Anforderungen an den Umweltschutz, insbesondere im Bereich der Abwasserreinigung, sind in den letzten Jahren stetig gestiegen. Die aktuelle Diskussion über die Elimination von Spurenstoffen zeigt dies deutlich. Dass aber auch in der Wasserwirtschaft klimaschädliche Treibhausgase entstehen, ist lange Zeit unbeachtet geblieben. Tatsächlich wirkt sich der Betrieb wasserwirtschaftlicher Anlagen nicht nur durch den Verbrauch fossiler Energieträger auf den Klimawandel aus. Verursacht durch biogene Abbauprozesse entstehen ebenfalls deutlich stärker wirkende Klimagase.

In der öffentlichen Wahrnehmung ist seit längerem bekannt, dass durch den Verbrauch fossiler Energieträger in Kraftwerken zur Stromerzeugung, dem Betrieb von Heizungsanlagen und durch immer stärkeres Verkehrsaufkommen weltweit jedes Jahr erhebliche Mengen an CO₂ in die Atmosphäre gelangen. Durch biogene Abbauprozesse, insbesondere auf Kläranlagen, entstehen ebenfalls die Treibhausgase Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄) welche um den Faktor 298 bzw. 25 klimaschädlicher als CO₂ sind. Alle bekannten Treibhausgase werden auf das Treibhausgas CO₂ als Referenzgas normiert. Diese Normierung beschreibt die Klimawirksamkeit eines Gases und wird als Global Warming Potential (GWP) bezeichnet (Solomon, Qin *et al.*, 2007). Danach wird dem Kohlendioxid für das GWP der Wert „1“ zugemessen.

Um diesen normierten CO₂-Ausstoß verursachergerecht zu bilanzieren, wurde der Carbon Footprint (CF) entwickelt. Der CF zeigt hierbei das Treibhauspotential (GWP) eines Landes, eines Unternehmens oder eines einzelnen Produkts während einer festgelegten Zeitspanne auf. In der Regel umfasst der CF die gesamte Lebensdauer - einschließlich der späteren Verwertung oder Entsorgung.

Sehr häufig wird der CF heute von Unternehmen eingesetzt, um die Aktivitäten zum Klimaschutz zu dokumentieren. Der Vergleich des Carbon Footprint verschiedener Aktivitäten ist aber oft vom Produkt abhängig und daher problematisch. Im vorliegenden Fall wird angestrebt, den CF in die Planung zukünftiger Maßnahmen und die Dokumentation der Entwicklung des CF einzelner Anlagen einzubeziehen.

3.2 Der Treibhauseffekt

Der globale Treibhauseffekt bezeichnet die Fähigkeit eines Planeten die Strahlungsenergie der Sonne in Form von Wärmeenergie innerhalb der Atmosphäre zu halten. Kurzwellige Sonnenstrahlung passiert die Atmosphäre und wird auf der Erdoberfläche in langwellige infrarote Wärmestrahlung umgewandelt und reflektiert. Verantwortlich dafür, dass diese Wärmestrahlung nicht wieder in den Weltraum abgestrahlt wird sind sogenannte

Treibhausgase in der Atmosphäre. Diese absorbieren einen Teil der infraroten Wärmestrahlung und halten diese somit in der Atmosphäre (Abbildung 3-1). Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt läge die Temperatur an der Erdoberfläche bei $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

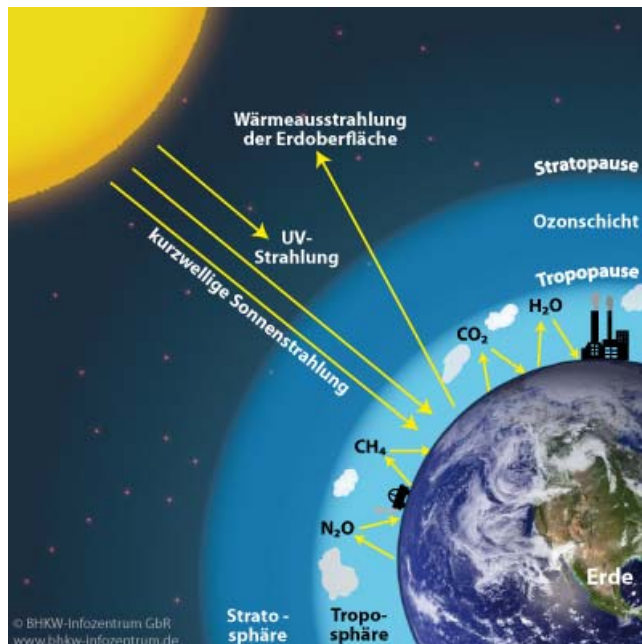


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Treibhauseffektes (BHKW-Infozentrum)

Seit dem Beginn der Industrialisierung werden jedoch durch anthropogene Einflüsse vermehrt Treibhausgase in der Atmosphäre freigesetzt. Hierdurch wird der natürliche Treibhauseffekt verstärkt und somit ein Temperaturanstieg in der Atmosphäre begünstigt.

3.3 Treibhausgase

Als Treibhausgase werden gasförmige Stoffe bezeichnet, welche sich in der Atmosphäre ansammeln und die Wärmestrahlung von der Erdoberfläche absorbieren. Den größten Einfluss hierbei hat in der Atmosphäre vorhandener Wasserdampf (H_2O). Daneben wird zwischen einer Reihe von Treibhausgasen unterschieden, welche nach Verweildauer in der Atmosphäre und der Fähigkeit Infrarotstrahlung zu absorbieren charakterisiert werden. Alle bekannten Treibhausgase werden auf das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO_2) als Referenzgas normiert. Diese Normierung beschreibt die Klimawirksamkeit eines Gases und wird als Global Warming Potential (GWP) bezeichnet (Tabelle 3-1). Da das GWP auch direkt von der Verweilzeit in der Atmosphäre abhängig ist, werden im IPCC-Standard die Zeithorizonte 20, 100 und 500 Jahre betrachtet. Politisch hat sich der 100 jährige Horizont für die Bewertung als maßgeblich durchgesetzt.

Tabelle 3-1: GWP bekannter Treibhausgase (IPCC, 2007)

Treibhausgas	Verweilzeit	Strahlungs- wirkung [Wm ⁻² ppm ⁻¹]	Global Warming Potential		
			20	100	500
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	*)	1,4x10 ⁻⁵	1	1	1
Methan (CH ₄)	12	3,7x10 ⁻⁴	72	25	7,6
Distickstoffoxid (N ₂ O)	114	3,03x10 ⁻³	289	298	153
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)	1,4-270	0,09-0,28	437- 12.000	124- 14.800	38- 12.200
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	3.200	0,52	16.300	22.800	32.600

3.3.1 Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist durch die allgemeine mediale Berichterstattung das bekannteste Treibhausgas. Als obligates Endprodukt der Oxidation von Kohlenstoffverbindungen entsteht es ubiquitär. CO₂ wird sowohl biochemisch (z.B. menschliche Atmung) als auch bei der thermischen Umsetzung von kohlenstoffhaltigen Verbindungen (Verbrennung) freigesetzt.

Bei der Betrachtung der Auswirkungen auf den Klimawandel ist die Herkunft der C-Quelle entscheidend. Der Abbau oder die Verbrennung von Biomasse kann hierbei als klimaneutral betrachtet werden, da von den Pflanzen zuvor CO₂ aus der Atmosphäre aufgenommen wurde und somit von einem „kurzen“ CO₂-Kreislauf gesprochen wird. Das bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern wie, Kohle, Erdgas oder Erdöl entstehende CO₂ wird hingegen einem „langen“ CO₂-Kreislauf zugeordnet. Diese CO₂-Emissionen haben einen Einfluss auf das heutige Weltklima, da die Speicherung vor Äonen während eines völlig anderen Weltklimas stattfand.

3.3.2 Methan

Methan ist ein Hauptbestandteil des Faul- oder Biogases, welches beim anaeroben Abbau gebildet wird. Der anaerobe Abbau von Biomasse zu Biogas erfolgt in einem vierstufigen Prozess. Dieser wird, wie in der Abbildung 3-2 gezeigt, in Hydrolyse, Versäuerung, Acetogenese und Methanogenese eingeteilt.

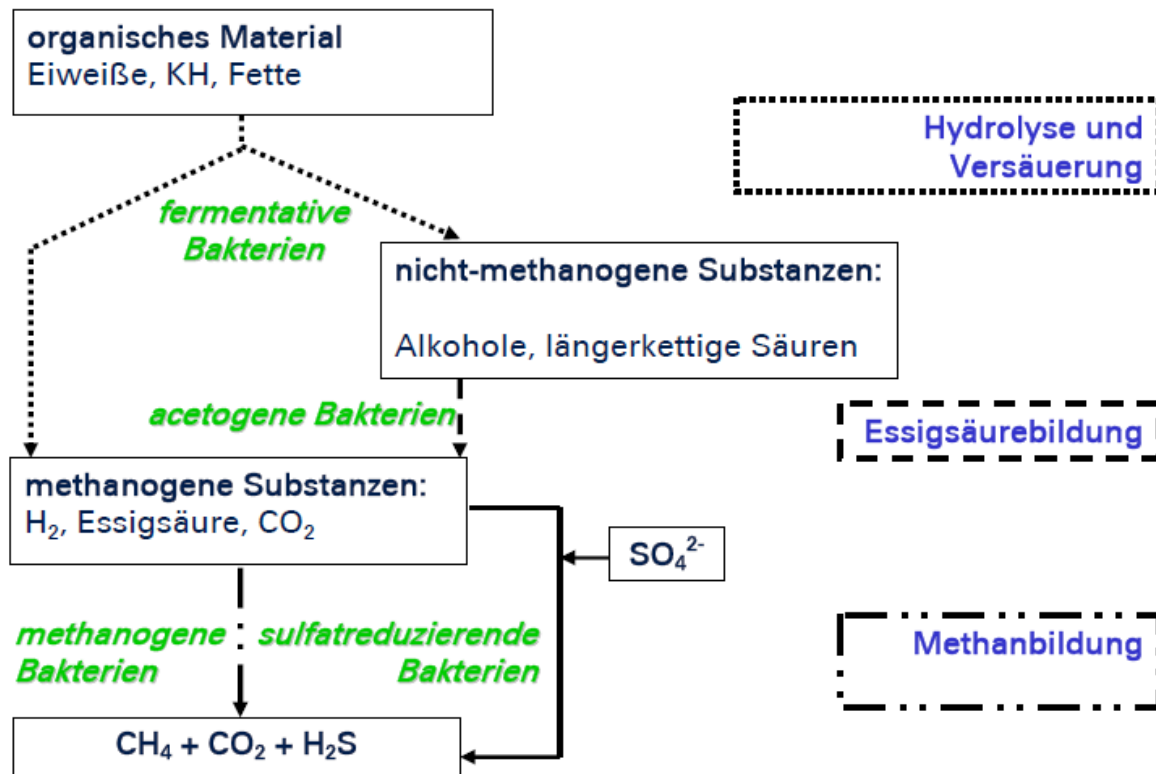


Abbildung 3-2: Phasen des anaeroben Abbaus (Mollekopf, Polster et al., 2006)

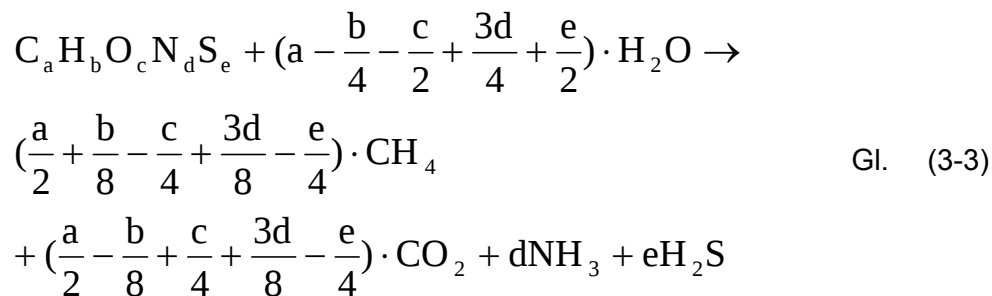
Im ersten Schritt der Hydrolyse werden organische Polymere (Proteine, Kohlenhydrate, Fette) durch Mikroorganismen in niedermolekulare Komponenten (Aminosäuren, Zucker, Fettsäuren) zersetzt. Die Produkte dieser enzymatischen Spaltung sind wasserlöslich.

Bei der Versäuerung (Acitogenese) werden die Produkte der Hydrolyse zu organischen Säuren, Acetat, Alkoholen, Wasser, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid abgebaut. Während der Acetogenese werden organische Säuren und Alkohole weiter zu Essigsäure umgewandelt.

Am Ende des Abbauprozesses steht die Methanogenese. Obligat anaerobe methanogene Bakterien erzeugen aus den Abbauprodukten Acetat, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid Methan. Etwa 70 % des gebildeten Methans entsteht bei der Decarboxilierung durch acetogenotrophe Methanbakterien unter der Verwendung von Essigsäure (Gl.(3-2)). Hydrogenotrophe Bakterien metabolisieren aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid etwa 30 % des Methanendgehalts (Gl.(3-1)).

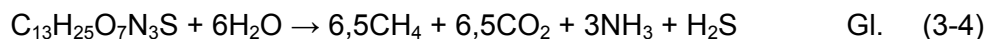


Die Produktion, der Biogaskomponenten ist stark vom eingesetzten Substrat abhängig. Ist die chemische Struktur des Substrats bekannt, kann mittels der erweiterten Umsatzformel nach Buswell und Boyle die Biogaszusammensetzung rechnerisch ermittelt werden (Buswell, 1936), (Boyle, 1977).

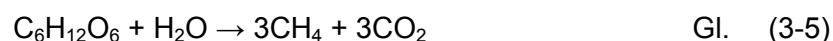


Ausgangsprodukt für die Vergärung sind Fette, Kohlenhydrate und Proteine im Substrat. Ausgehend von einer mittleren Zusammensetzung der Stoffe ergeben sich folgende Summenformeln und Umsätze:

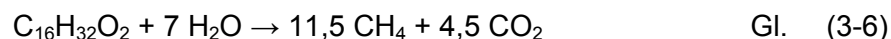
Proteine ($\text{C}_{13}\text{H}_{25}\text{O}_7\text{N}_3\text{S}$) (Linke, Mähnert *et al.*, 2006)



Kohlenhydrate ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) (Linke, Mähnert *et al.*, 2006)



Fette ($\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$) (Linke, Mähnert *et al.*, 2006)



3.3.3 Distickstoffoxid

Distickstoffoxid (N_2O) ist ein Gas aus der Gruppe der Stickoxide, auch bekannt unter dem Trivialnamen Lachgas. Bedingt durch das Strahlungsabsorptionsverhalten und die durchschnittliche Verweilzeit von 114 Jahren weist N_2O ein relativ hohes GWP auf. Als natürliches Intermediat des Stickstoffkreislaufes wird es durch biologische Prozesse in Gewässern, Feuchtgebieten und Böden freigesetzt. Neben der biochemischen Bildung entsteht N_2O ebenfalls bei der thermischen Oxidation von Stickstoffverbindungen bei Verbrennungsprozessen z.B. in Kraftwerken, Industriebetrieben und Verbrennungsmotoren. Abbildung 3-3 zeigt die N_2O -Emissionen für Deutschland aus einer Untersuchung des Umweltbundesamtes im Jahr 1993.

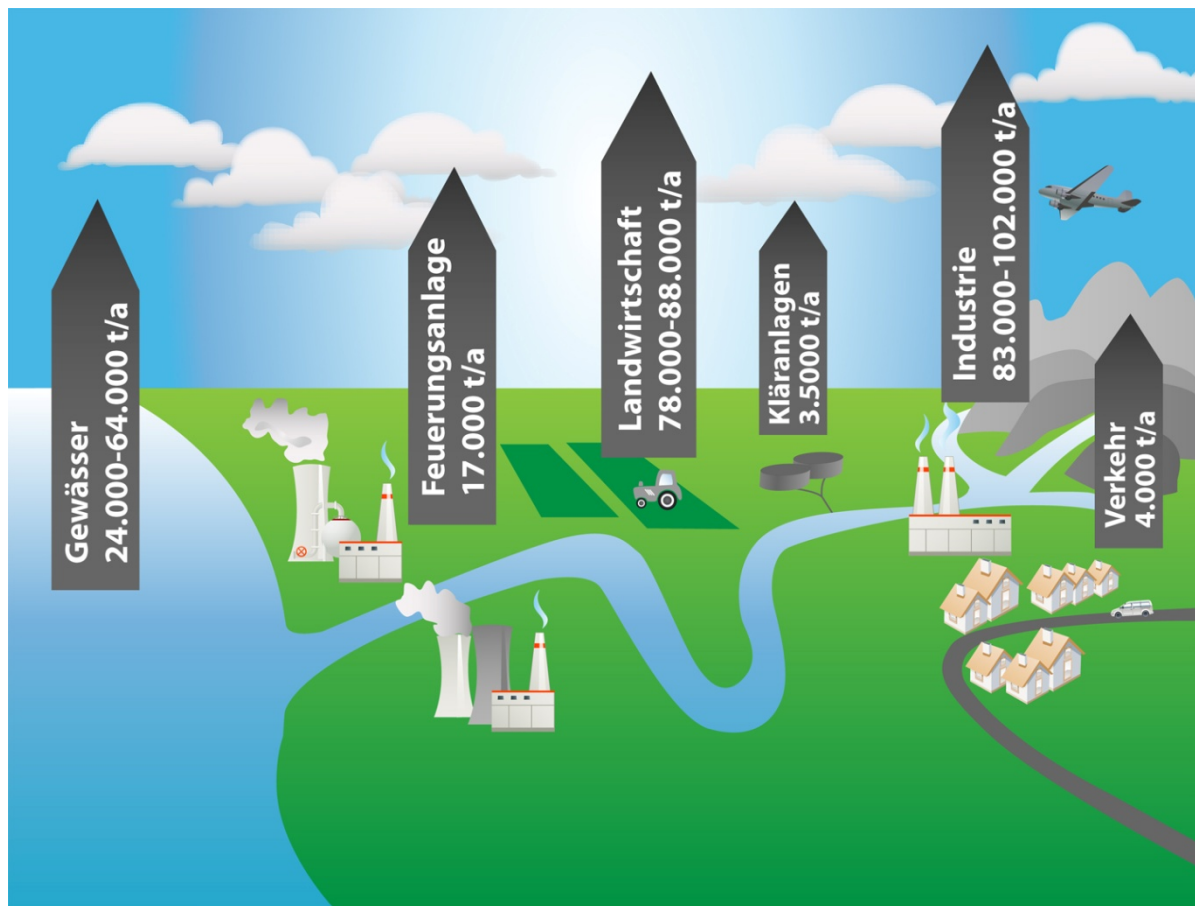


Abbildung 3-3: N_2O -Quellen in Deutschland nach (Schön, Walz et al., 1993)

4 Methodische Empfehlungen zur Carbon-Footprint-Bilanzierung

4.1 Stand der internationalen Standardisierungsprozesse

Zur Bilanzierung des Carbon Footprint existieren bislang keine international verbindlichen Standards. Um diesen Bedarf zu decken, wurde auf der Ebene der ISO ein Prozess zur Erarbeitung eines Standards für den „Carbon Footprint of Products“ initiiert. Wichtige Grundlagen dafür sind die ISO-Normen 14040 ff. zur Ökobilanzierung, welche durch konsequente Forschung und Anwendung verschiedener Stakeholder kontinuierlich weiter entwickelt werden.

Üblicherweise wird zur Berechnung des CF die sogenannte „Life cycle Assessment (LCA)-Methode“ verwendet (BIS, 2008). Eine der ersten Aktivitäten zur Erarbeitung dieser Methodik für die CF-Bilanzierung wurde in Großbritannien von BSI British Standards Solutions angestoßen. Im Oktober 2008 wurde das Ergebnis in Form einer Empfehlung unterhalb eines britischen Standards veröffentlicht (PAS 2050 Public Available Specification, „Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services“). Diese wurde in zwei internationalen Runden analysiert und diskutiert mit dem Fazit, dass nicht alle offenen Fragen zur Methodik ausreichend beantwortet werden. Insbesondere die Ausgestaltung für die verschiedenen Wirtschaftsbranchen bleibt an einigen Stellen offen. Eine wesentliche Frage, an deren Beantwortung noch gearbeitet wird, ist die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen von eingekauften Produkten und Dienstleistungen, insbesondere vor dem Hintergrund globalisierter Netzwerke. Auch die Bilanzierung von „grünem Strom“ und Abfallprozessen stellt sich schwierig dar. Es wird daran gearbeitet, Datenlücken mit fundierten Standardwerten zu füllen, deren Herleitung aber eine Herausforderung ist. (Bundesumweltministerium, 2009)

Es wird deshalb empfohlen, bei allen CF-Bilanzierungen die Vorgehensweise und insbesondere die verwendeten Daten einschließlich der Quellen genau zu dokumentieren, um zu einem späteren Zeitpunkt ggf. Nachbesserungen vornehmen zu können.

4.2 Bilanzierungsregeln

Um die o.g. Leitlinie (PAS2050) als Grundlage für eine Bilanzierungssystematik in der Wasserwirtschaft anwenden zu können, müssen zunächst Systemgrenzen festgelegt und die zu betrachtenden Einzelprozesse bestimmt werden. Die verfügbaren Daten und Informationen zu den Einzelprozessen sind häufig unterschiedler Art und Qualität und müssen deshalb für eine Kalkulation des CF in eine einheitliche Form gebracht werden. (Strutt, Wilson *et al.*, 2008)

Äußerst wichtig für die CF-Bilanzierung ist eine klare Festlegung des Bilanzraumes mit den relevanten Prozessen. Dies ist häufig sehr schwierig und demotivierend, aber für einen

aussagekräftigen CF, der mit zukünftigen Werten sowie mit anderen Anlagen verglichen werden kann, unerlässlich. Dieser Arbeitsschritt sollte deshalb sehr sorgfältig durchgeführt werden (Strutt *et al.*, 2008).

Folgende Daten müssen für die CF-Bilanzierung für alle Teilprozesse erhoben werden:

Inputs/Outputs	verbrauchte Energie	direkte THG-Emissionen	Transporte
• Material-Input • Produkt-Output • Co-Produkte • Abfälle	• Elektrizität • fossile quellen	CO₂-, CH₄ -, N₂O-Emissionen, die direkt in den Prozessen entstehen	• Fahrzeugtypen • Kraftstoffarten • Kraftstoffverbräuche

Als indirekt werden Emissionen bezeichnet, die bei den Herstellungsprozessen der verwendeten Rohstoffe/Materialien und bei der Erzeugung der verbrauchten Energie entstehen. Dazu zählen auch die Emissionen bei der Verbrennung der Kraftstoffe in Fahrzeugen. Direkte Emissionen entstehen in den betrachteten Prozessen selbst.

Der Anteil des Treibhauseffektes durch den Verbrauch von elektrischer Energie resultiert aus der Nutzung fossiler Brennstoffe zur Stromerzeugung. Da in Deutschland neben fossilen Quellen auch regenerative sowie nukleare Energiequellen zur Stromerzeugung genutzt werden, gibt es einen statistischen Emissionsfaktor für den CO₂-Ausstoß pro verbrauchter kWh. Abbildung 4-1 zeigt den Jahresstromverbrauch sowie den äquivalenten CO₂-Ausstoß für die Jahre 1990 bis 2009 in Deutschland.

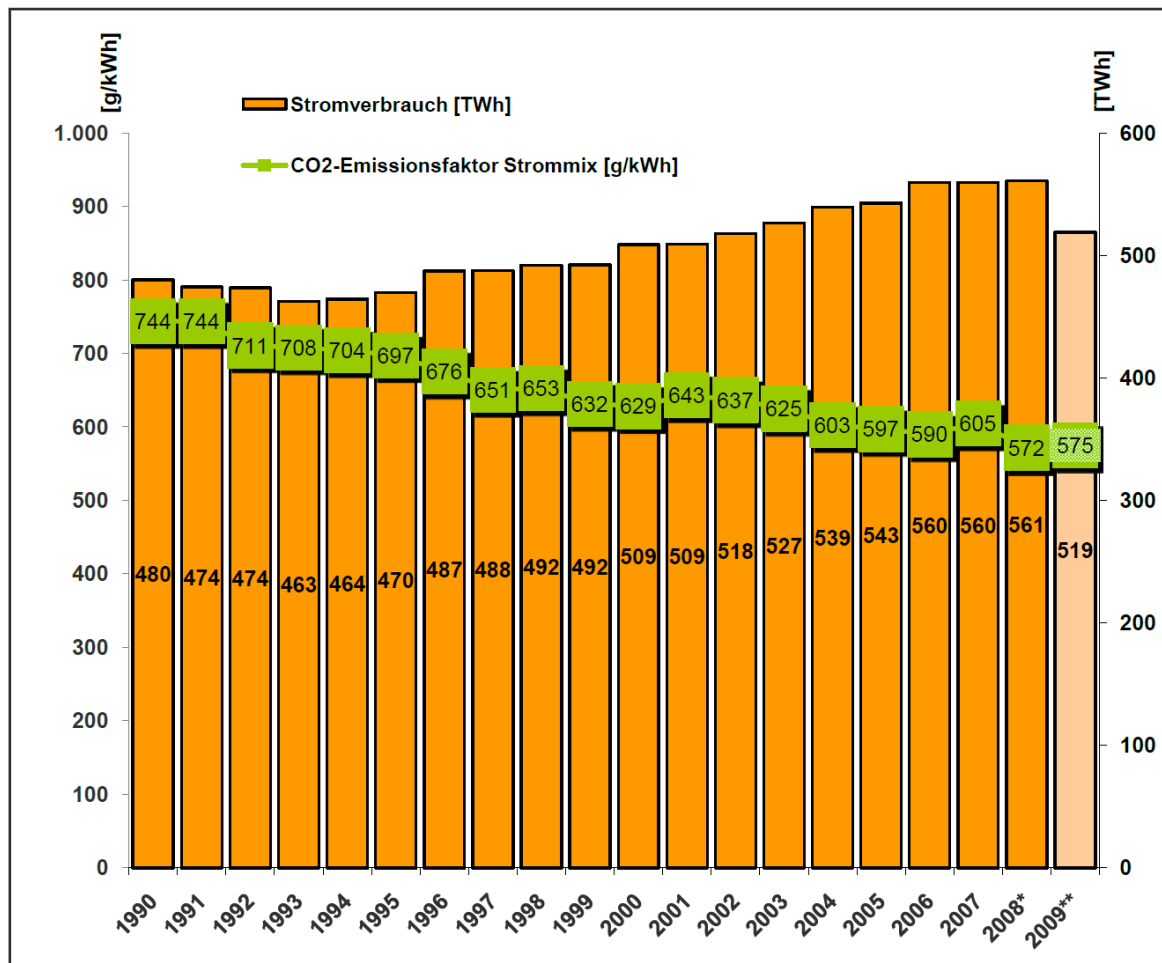


Abbildung 4-1: CO₂-Emissionsfaktor deutscher Strommix (Umwelt-Bundesamt, 2010)

Alle Material- und Energiemengen, die in den betrachteten Produkten / Prozessen enthalten sind, bezeichnet man als Aktivitätszahlen (AZ). Mit den Emissionsfaktoren (EF) werden diese Mengen in resultierende THG-Emissionen überführt. Die Menge an THG wird ausgedrückt als CO₂ - Äquivalente (CO₂e) und relativ zu einer funktionellen Einheit, z.B. CO₂e pro m³ Wasser angegeben. Der Carbon Footprint entspricht der Summe aller AZ multipliziert mit den entsprechenden EF:

$$CF = \sum AZ_i \times EF_i \quad \text{Gl. (4-1)}$$

Grundsätzlich sollte versucht werden, alle Emissionen mitzuerfassen, die einen Anteil am Gesamtergebnis von mindestens 1 % haben.

Die Aktivitätsdaten können von primären und von sekundären Datenquellen kommen.

- Primärdaten stammen aus direkten Messungen im Rahmen der untersuchten Prozesse.
- Sekundärdaten beziehen sich auf externe Messungen, außerhalb des untersuchten Bilanzraumes. Sie sind weniger spezifisch und stammen aus vergleichbaren Prozessen oder stellen Durchschnittswerte dar.

Immer dann, wenn keine Primärdaten zur Verfügung stehen oder deren Qualität nicht gut ist, können Sekundärdaten aus anderen Quellen verwendet werden. Typischerweise werden dafür folgende Datenbasen genutzt:

- frei zugängliche oder kommerziell vertriebene Ökobilanzdatenbanken
- sektorspezifische Datenbanken (Chemikalien, Baustoffe und Bauprozesse)
- Durchschnittsdaten aus der jeweiligen Branche (Wasserverbände)
- länderspezifische Datenbanken (z. B. Umweltbundesamt)

Wichtig ist, die Herkunft und die Qualität der Daten zu dokumentieren.

Eine Zusammenstellung von Emissionsfaktoren, die in den genannten Quellen gefunden wurden und für die Wasserwirtschaft relevant sind, ist in Anhang 14.1 enthalten.

Die Kompensation von Treibhausgasemissionen, z. B. durch Energieerzeugung, die nicht selber genutzt wird, ist getrennt auszuweisen, weil sie sonst die tatsächlichen Emissionen eines Produktes oder einer Dienstleistung verfälschen würde. (BDI, 2010)

5 Literaturrecherche zum aktuellen Kenntnisstand der Carbon-Footprint-Bilanzierung in der Wasserwirtschaft

5.1 Wasserwirtschaft allgemein

In Deutschland existiert für die Wasserwirtschaft noch kein allgemein akzeptierter Ansatz zur Berechnung des Carbon Footprint. Es gibt bereits vereinzelt Erfahrungen zur Bilanzierung von Kläranlagen, auch in Deutschland, und in Ansätzen auch für die Wasserversorgung (Großbritannien, USA, Niederlande). In Großbritannien wurde von UK WIR (UK Water Industry Research) ein Berechnungs-Tool für betriebsbedingte Treibhausgasemissionen bei der Abwasserentsorgung und der Trinkwasserversorgung entwickelt. Es handelt sich dabei um eine Excel-Arbeitsmappe und eine Datenbank mit Emissions- und Umrechnungsfaktoren, wobei folgende Prozesse berücksichtigt wurden (UKWIR, 2010):

- Trinkwasseraufbereitung und -förderung
- Abwasserbehandlung und -förderung
- Schlammbehandlung und -entsorgung
- Administrative Prozesse
- Transportprozesse

Für die verschiedenen Emissionen, die bei der Erzeugung der verbrauchten Energie und bei der Verbrennung der verbrauchten Kraftstoffe in den o.g. Prozessen entstehen, werden Berechnungsansätze dargestellt (jeweils unterteilt nach Energieträgern und Kraftstoffart). Dabei werden auch die Bilanzierung der Energie aus erneuerbaren Quellen, die Energieerzeugung im Prozess und die Kraft-Wärme-Kopplung berücksichtigt. Es wird also vorrangig die Hauptemissionsquelle – der Energieverbrauch - in der Wasserwirtschaft detailliert analysiert.

Zu den Emissionen in den einzelnen Aufbereitungsprozessen gibt es nur sehr begrenzte Informationen. Lediglich für direkte Emissionen bei der Ozonung und der Schlammentsorgung (Deponien, Landwirtschaft, Teiche) werden Emissionsfaktoren und Berechnungsansätze angegeben. Die Berechnungen erfolgen jeweils auf Hauptprozessebene, d.h. z.B. für die Trinkwasseraufbereitung insgesamt und nicht für die einzelnen Teilprozesse (Aufbereitungsschritte). Der CF der in den Prozessen verbrauchten Materialien bleibt allerdings unberücksichtigt.

In Großbritannien entspricht der Anteil des Wasser- und Abwassersektors an den Treibhausgasemissionen dem Anteil der durch sämtliche Busse auf allen britischen Straßen verursacht wird. Er liegt bei gut einem Prozent aller Treibhausgasemissionen in UK. Davon entfallen zwei Drittel auf den Betrieb von Wasserbehandlungsanlagen, der Rest indirekt auf den Bau der Anlagen und auf den Austausch von Rohren. 85 % der betriebsbedingten

Emissionen werden durch den Energieverbrauch bei der Aufbereitung und für den Transport von Wasser und Abwasser verursacht. Der betriebsbedingte Treibhausgasausstoß hat sich seit Mitte der 1990er Jahre in Großbritannien stark erhöht aufgrund eines gestiegenen Energiebedarfs und der Privatisierung des Sektors. Strengere Umweltauflagen und eine gestiegene Nachfrage nach Wasseraufbereitungsleistungen werden dafür als Ursache gesehen. (EUWID, 2010)

In den USA entfallen 3 % des nationalen Energieverbrauchs auf die Wasser- und Abwasserwirtschaft, woraus 45 Mio. Tonnen Treibhausgase resultieren, die jährlich in die Atmosphäre emittieren. (Boulos, Bros; 2010)

In den Niederlanden wurde in den letzten Jahren ein leichter Anstieg des Energieverbrauchs im Trinkwassersektor um 2 % und im Abwassersektor um 3 % festgestellt. Als Ursache dafür wird die erweiterte Aufbereitungstechnologie vor dem Hintergrund der Spurenstoffproblematik gesehen oder auch die Einführung einer zentralen Enthärtungsstufe. (Frijns, Mulder *et al.*, 2008)

Ein niederländisches Benchmarking-Projekt zum Energieverbrauch der Wasserproduktion und der Abwasserbeseitigung wurde auf die Bilanzierung des Carbon Footprint ausgeweitet. In Übereinstimmung mit anderen Publikationen weisen auch (Frijns, Mulder *et al.*, 2008) darauf hin, dass es für den Wassersektor noch keine allgemein gültige Methode gibt. Bereits entwickelte Leitfäden zur Bilanzierung des CF sind nicht für den Wassersektor standardisiert, und es gibt verschiedene Ansätze sowohl in einzelnen Unternehmen als auch in unterschiedlichen Ländern.

In der niederländischen Methode wurden die Trinkwasser- und die Abwasserbehandlung sowie die Niederschlags- und Schlammbehandlung einbezogen und nur der häusliche Wasserkreislauf betrachtet. Die Wassernutzung in den Haushalten blieb unberücksichtigt. Neben dem CO₂-Ausstoß infolge des Energieverbrauchs flossen auch die Methan- und Lachgas-Emissionen in Wasseraufbereitungsprozessen in die Bilanzierung ein.

Allein für den Energieverbrauch des niederländischen Wassersektors wurden Treibhausgasemissionen von 934.840 t CO₂e pro Jahr ermittelt (56 % der Gesamtemissionen). Auf die direkten Emissionen von Methan und Lachgas entfallen jährlich 610.345 t CO₂e (36 %). Methan-Emissionen entstehen bei der Belüftung von Grundwasser und bei der Behandlung von Abwasser und Schlamm, Lachgasemissionen auch bei der Abwasserbehandlung und -entsorgung sowie bei der Ozonung in der Trinkwasseraufbereitung. Indirekte Emissionen durch Herstellungsprozesse von verwendeten Chemikalien und Materialien tragen im Mittel nur mit 3 % zum Gesamt-CF bei, wobei auch hier deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Versorgungsunternehmen festzustellen waren.

Der größte Teil der Treibhausgase im Wassersektor entsteht bei der Abwasserreinigung. Er liegt in den Niederlanden bei 67 %, während die Abwasserableitung (Kanalisation) nur 7 % und die Trinkwasserversorgung 26 % verursacht. (Frijns, Mulder *et al.*, 2008)

Unterschiedliche Meinungen gibt es in der Literatur zur Berücksichtigung der Bauphase der Anlagen des Wassersektors bei die Bilanzierung des CF. Man kann sie mit einbeziehen, wobei es allerdings häufig schwierig sein wird, für bestehende Anlagen noch die notwendigen Daten (eingeflossene Materialmengen, Transportwege usw.) zu ermitteln. Am einfachsten wäre dies für eine neu gebaute Anlage durchführbar. Man kann grundsätzlich zwei Typen einer CF-Bilanzierung unterscheiden: einen jährlichen für den normalen Betrieb der Anlagen und einen zusätzlichen für nicht wiederkehrende Aktivitäten (z.B. Bauprojekte) (Strutt *et al.*, 2008). (Frijns, Mulder *et al.*, 2008) weisen auch darauf hin, dass der CF für die Auswahl der Materialien zum Bau der Anlagen von großer Bedeutung sein kann. Aber bei einer CF-Bilanzierung über die gesamte Lebensdauer von Anlagen des Wassersektors spielt dieser nur eine sehr geringe Rolle im Vergleich zum Energiebedarf bei den Betriebsprozessen. Es wird deshalb empfohlen, den CF des Baus von Kläranlagen und Wasserversorgungsanlagen zu vernachlässigen.

5.2 Abwasserreinigungsanlagen

5.2.1 Indirekte Emissionen

Bei der Abwasserreinigung entstehen indirekte Emissionen in Form von CO₂-Äquivalenten bei dem Verbrauch von Hilfsstoffen und Materialien, welche für den Prozess benötigt werden. Der Einsatz dieser Stoffe auf der Kläranlage verursacht keine Treibhausgase unmittelbar vor Ort. Herstellungsprozess und Transport hingegen verursachen relevante Treibhausgasemissionen und müssen in der CF-Bilanz der Abwasserreinigung berücksichtigt werden. Zu diesen Betriebsmitteln zählen insbesondere Chemikalien zur Fällung von Abwasserinhaltsstoffen sowie zur pH-Wert Regulierung. Stoffe, für welche in der Literatur CO₂-äquivalente Umsatzfaktoren bestimmt worden sind, befinden sich im Anhang dieses Berichtes.

Zu den indirekten Emissionen zählt ebenfalls der Verbrauch an elektrischer Energie. Alle elektrischen Energieverbräuche wurden für die Bilanzierung chronologisch zum Prozessfluss erfasst und mit den Energieverbrauchskenngrößen des Energiehandbuchs NRW versehen (Müller, Kobel *et al.*, 1999). Die genaue Auflistung dieser Kenngrößen befindet sich im Anhang des Berichtes.

Der aus Betrieb und Verwaltung resultierende CF ergibt sich primär aus dem Verbrauch an Heizenergie sowie elektrischer Energie der Dienstgebäude als auch dem Treibstoffverbrauch

der Betriebsfahrzeuge. Hierzu können die Emissionsfaktoren für Brennstoffe angesetzt werden (Anhang 14.1).

5.2.2 Bau und Maschinentechnik

Nach aktuellem Regelwerk zur Ermittlung des CF werden als unterer Schwellenwert nur Prozesse berücksichtigt, die mit mehr als 1 % im Bezug auf die Treibhausgasemissionen pro untersuchte funktionelle Einheit zum Ergebnis beitragen (BSI, 2008). Die Maschinen- und Bautechnik mit Nutzungszeiträumen zwischen 20 und 50 Jahren weist bezogen auf die funktionelle Einheit m³ Abwasser vermutlich nur einen sehr geringen Anteil am gesamt CF auf. Erschwerend für Bilanzierung der Bau- und Maschinentechnik kommt hinzu, dass die Baumaßnahmen zum Teil schon vor einem nicht unerheblichen Zeitraum durchgeführt wurden. Aktuelle Emissionskennzahlen sind daher kaum geeignet diese Maßnahmen nachträglich zu bewerten. Bei Neubau- und Umbaumaßnahmen kann die Bilanzierung des Bauwerkes auf Basis von Emissionsfaktoren (z. B. (Eyerer, Reinhardt, 2000)) als geeignetes Entscheidungswerkzeug genutzt werden.

5.2.3 Direkte Emissionen

Direkte Emissionen bezeichnen Treibhausgasemissionen, welche unmittelbar auf der KA (im Bilanzierungsraum) an die Atmosphäre abgegeben werden. Bei der Abwasserreinigung bzw. Kohlenstoffelimination wird CO₂ freigesetzt. Da dieses CO₂ nicht fossilen Ursprungs ist wird es im Carbon Footprint des Wasserkreislaufes nicht berücksichtigt. Die Emissionen von Methan (CH₄) und Lachgas / Distickstoffmonoxid (N₂O), welche ebenfalls auf der KA gebildet werden, haben jedoch auf Grund des GWP einen direkten Effekt auf den Treibhauseffekt. Flourhaltige Gase spielen im Wasserkreislauf keine Rolle.

5.2.3.1 CH₄ Emissionen aus der Abwasserreinigung

Potentielle Emissionsquellen des Faulgases CH₄ in der Abwasserreinigung sind überall dort gegeben, wo ein anaerober Abbau organischer Kohlenstoffverbindungen stattfindet. Milieubedingungen zur Methanogenese sind während der Vorklärung, der biologische Phosphorelimination und der anaerobe Schlammstabilisierung gegeben.

Substrat für die Methanogenese im Abwasserreinigungsprozess ist die Kohlenstofffracht im Abwasser definiert über die Summenparameter biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB₅) bzw. chemischer Sauerstoffbedarf (CSB). Da diese Parameter über die zur Oxidation der Verbindungen benötigte Sauerstoffmenge definiert sind erfolgt die Bestimmung der maximal möglichen CH₄-Bildung mittels chemischer Umrechnung. Für die Oxidation von Methan gilt:



Demnach werden für die Oxidation von einem Mol CH_4 zwei Mol O_2 benötigt. Mittels der molaren Massen von $\text{CH}_4 = 16 \text{ g/mol}$ und $\text{O}_2 = 32 \text{ g/mol}$ ergibt sich somit ein Bedarf von 4 g O_2 zur Oxidation von 1 g CH_4 . Da der CSB das Sauerstoffäquivalent zur Oxidation der Kohlenstoffverbindung ist, kann dieser für das gleiche Massenverhältnis zur CH_4 -Bildung herangezogen werden. Für dieses Verhältnis gilt nun, dass pro Gramm CSB maximal 0,25 CH_4 gebildet werden können.

Für die leicht abbaubare Fraktion des Kohlenstoffs im Abwasser (BSB_5) wird nach der erweiterten Umsatzformel für die Biogasproduktion ein maximaler Umsatzfaktor von 0,6 kg CH_4 / kg BSB_5 angesetzt.

Bemessungsansätze

Eine allgemein gültige Formel zur Beschreibung der CH_4 -Emissionen auf kommunalen Kläranlagen zu formulieren, ist aufgrund der multikausalen Zusammenhänge wie Zusammensetzung der Schmutzfracht, Prozessparameter und Behandlungsstufen kaum möglich. Bisherige Untersuchungen haben versucht, für verschiedene Prozessstufen der Abwasserreinigung mögliche Emissionsfaktoren aufzustellen.

Im Leitfaden des Niederländischen Umweltministeriums wird als Eingangsgröße zur Berechnung der CH_4 -Emissionen lediglich die CSB-Fracht gewählt (VROM, 2008).

$$CH_{4,KA} = CH_{4,Abwasser} + CH_{4,Faulung} = 0,0085 \cdot CSB_{Zulauf} \quad \text{Gl. (5-2)}$$

Mit: $\text{CH}_{4,KA}$: CH_4 Gesamtemissionen [kg CH_4/a]

$\text{CH}_{4,Abwasser}$: CH_4 -Emissionen aus der Abwasserreinigung [kg CH_4/a]

$\text{CH}_{4,Faulung}$: CH_4 -Emissionen aus der Klärschlammfaulung [kg CH_4/a]

Hierbei werden die Emissionen aus dem Abwasser wie folgt berechnet:

$$CH_{4,Abwasser} = EF_{Abwasser} \cdot CSB_{Zulauf} \quad \text{Gl. (5-3)}$$

mit: EF: Emissionsfaktor [kg CH_4 / kg CSB]

$$EF_{Abwasser} = B_0 \cdot MCF_{KA} \cdot \eta_{DOC} \quad \text{Gl. (5-4)}$$

mit: B_0 : max. CH_4 -Bildung durch anaeroben DOC-Umsatz [kg CH_4 / kg CSB]

η_{DOC} : DOC-Umsatz in gasförmige Verbindungen [-]

MCF_{KA} : Anteil des DOC, welcher auf einer KA anaerob umgesetzt wird

Der Emissionsfaktor für die Abwasserbehandlung wird hierbei wie folgt hergeleitet:

$$EF_{Abwasser} = 0,25 \frac{g}{g} \cdot 0,035 \frac{g}{g} \cdot 0,8 \frac{g}{g} = 0,007 \text{ kg} \frac{kgCH_4}{kgCSB} \quad \text{Gl. (5-5)}$$

Parallel hierzu gilt für die Faulung folgender Ansatz:

$$CH_{4,Faulung} = EF_{Faulung} \cdot DOC_{Schlamm} \cdot (1 - R) \quad \text{Gl. (5-6)}$$

mit: $CH_{4,Faulung}$: CH_4 -Emissionen aus der Klärschlammfäulung [kg CH_4 /a]
 $EF_{Faulung}$ = Emissionsfaktor Faulung [kg CH_4 / kg CSB]
 $DOC_{Schlamm}$ = organischer Anteil im Schlamm = 0,37 CSB_{Zulauf}
 R = CH_4 -Anteil, welcher gewonnen und genutzt wird = 0,94

Der Emissionsfaktor für die Faulung wird hierbei wie folgt hergeleitet:

$$EF_{Faulung} = 0,25 \frac{g}{g} \cdot 0,54 \frac{g}{g} \cdot 0,42 \frac{g}{g} = 0,0567 \text{ kg} \frac{kgCH_4}{kgCSB} \quad \text{Gl. (5-7)}$$

Somit ergibt sich für die Faulung:

$$CH_{4,Faulung} = 0,0567 \cdot 0,37 CSB_{Zulauf} \cdot (1 - 0,94) = 0,0015 \cdot CSB_{Zulauf} \quad \text{Gl. (5-8)}$$

Die Größenordnung dieser Abschätzung konnte durch Messungen an drei unterschiedlichen Kläranlagen zwischen 40.000 und 36.000 EW verifiziert werden (STOWA, 2010).

Das IPCC schlägt für die Bilanzierung von CH_4 -Emissionen in der Abwasserreinigung den Gebrauch von Methan-Korrektur-Faktoren (MKF) vor (IPCC, 2006).

Tabelle 5-1: MKF-Werte für kommunales Abwasser (IPCC, 2006)

Behandlungsschritt	Kommentar	MKF	Schwankungsbereich
Gewässer	Gewässer mit hoher organischer Belastung (Eutrophierung)	0,1	0,1-0,2
Zentrale Kläranlage (aerob)	optimale Prozessführung	0	0-0,1
Zentrale Kläranlage (aerob)	überlastet	0,3	0,2-0,4
Anaerobe Klärschlammstabilisierung	Klärgasgewinnung wird nicht berücksichtigt	0,8	0,8-1,0
Flacher Faulteich	weniger als 2 m Tiefe	0,2	0-0,3
Tiefer Faulteich	mehr als 2 m Tiefe	0,8	0,8-1,0

Mittels des ausgewählten MKF und dem theoretisch maximalen CH₄-Bildungspotential kann ein systemspezifischer Emissionsfaktor ermittelt werden.

$$EF_j = B_0 \cdot MKF_j \quad \text{Gl. (5-9)}$$

mit: EF_j : Emissionsfaktor [kg CH₄ / kg CSB]
 j : Behandlungsschritt / System
 B_0 : max. CH₄ Produktionskapazität [kg CH₄ / kg CSB]

Für die CH₄-Emissionen ergibt sich nun folgender Ansatz:

$$CH_4 \text{ Emissionen} = EF_j (CSB - S) - R \quad \text{Gl. (5-10)}$$

mit: CH₄: CH₄-Emissionen im Betrachtungsjahr [kg CH₄/a]
 CSB: CSB-Fracht im Zulauf [kg CSB/a]
 S: CSB-Anteil im Klärschlamm [kg CSB/a]
 R: Klärgasproduktion im Betrachtungszeitraum [kg CH₄/a]

Weiterhin werden für die CH₄-Emissionen während der Schlammbehandlung empirische Emissionsfaktoren angesetzt, welche in Tabelle 5-2 dargestellt sind.

Tabelle 5-2: CH₄-Emissionfaktoren bei der Klärschlammbehandlung

Verfahrensstufe	EmissionsfaktorCH ₄	Quelle
Schwerkrafteindicker	1 kg/t _{TS}	(IPCC, 2001)
Temporäres Rohschlammager	1 kg/t _{TS}	(IPCC, 2001)
Rohschlammager (3 Monate)	36 kg/t _{TS}	(IPCC, 2001)
Mesophil anaerobe Stabilisierung	21,5 kg/t _{TS}	(IPCC, 2001)
Gasverluste am Fermenter (gesamt)	8,5 %	(Watt, 1994)
Diffusion	5,0 %	
Ringräume / Muffen	3,5 %	
Methanschlupf BHKW	1,5 %	(Watt, 1994)
	5 kg/TJ	(VROM, 2008)
Mechanische Roh/Faulschlammmentwässerung	1 kg/t _{TS}	(IPCC, 2001)
Schlammager (entwässert)	0 kg/t _{TS}	(IPCC, 2001)

5.2.3.2 N₂O-Emissionen aus der Abwasserreinigung

N₂O wird in der Abwasserreinigung primär bei der Stickstoffelimination gebildet. Bisherige Erkenntnisse gehen davon aus, dass sowohl während der Nitrifikation als auch bei der Denitrifikation unter bestimmten Prozessbedingungen vermehrt N₂O gebildet wird. N₂O hat jedoch eine relativ hohe Löslichkeit in Wasser (0,024 molL⁻¹atm⁻¹ im Vergleich zu Sauerstoff 0,0013 molL⁻¹atm⁻¹) (Dean, 1992) und strippt nur sehr langsam aus. N₂O-Emissionen treten daher nicht zwangsläufig unmittelbar am Entstehungsort auf. Insbesondere in den belüfteten Bereichen der Belebung kann N₂O ausgestrippt werden. Möglich ist aber auch noch eine gelöste N₂O-Fracht im Ablauf der KA.

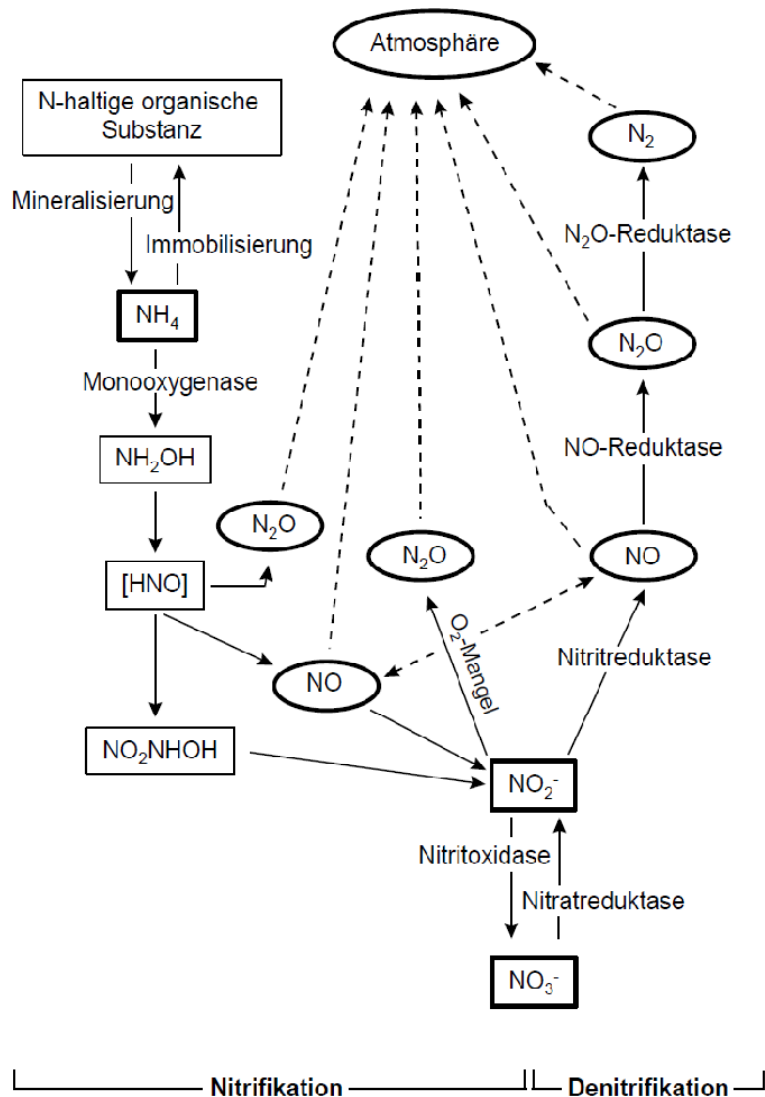


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Stickstoffkreislaufes nach (Firestone, Davidson, 1989)

Weitere bisher identifizierte N₂O-Emissionsquellen in der Abwasserreinigung sind die Klärschlammverbrennung und in geringem Maß die Spurenstoffelimination mittels Ozon (O₃).

Table 1 – N₂O emission (% of load) in lab-scale and full-scale WWTPs.

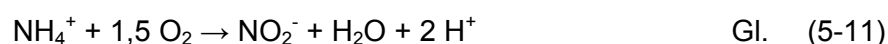
Reference	N ₂ O emission (% of N-load)	Type of WWTP	Sample frequency	Remarks
Full-scale				
Czepiel et al. (1995)	0.035% ^a	Activated sludge (11,000 p.e.)	Weekly grab sample (vented chamber) during 15 weeks	
Wicht and Beier (1995)	0-14.6% (0.6% average)	25 activated sludge plants	Single grab samples per WWTP	N ₂ O emission increased with increasing nitrogen load
Sümer et al. (1995)	0.001%	Activated sludge plant (60,000 p.e.)	2-weekly grab samples over 1 year	N ₂ O emission increased with nitrite + nitrate concentrations
Sommer et al. (1998)	0.02%	Activated sludge plant (60,000 p.e.)	1 or 2-weekly grab samples during 1.5 years	
Kimochi et al. (1998)	0.01-0.08%	Activated sludge plant (1000 p.e.)	On-line measurements during 4 aeration cycles (2 h)	N ₂ O emission decreased with proportionally shorter aeration periods
Kampschreur et al. (2008b)	2.3% ^b	Nitrification – anammox sludge water treatment	On-line measurements during 4 days	N ₂ O emission increased with decrease in oxygen concentration (aerated stage) and increase of nitrite concentration (anoxic stage)
Kampschreur et al. (2008b)	4%	Nitrification stage (nitrogen removal stage) of activated sludge plant (620,000 p.e.)	3 grab samples during one day	
Lab-scale				
Hanaki et al. (1992)	0-8%	Continuous and batch tests denitrifying activated sludge – artificial wastewater	Grab samples	N ₂ O emission increased with decrease of COD/N and increasing nitrite concentration
Zheng et al. (1994)	2.3-16%	Continuous nitrifying activated sludge-artificial wastewater	Daily grab samples	N ₂ O emission increased with decreasing oxygen concentration and SRT
Schulthess et al. (1994)	0-6%	Batch test (10 h) denitrifying activated sludge – real wastewater	On-line measurement	N ₂ O emission increased with increasing oxygen concentration
Osada et al. (1995)	1-35%	Continuous oxic-anoxic SBR activated sludge – real high-strength wastewater (>50 days)	Grab samples	N ₂ O emission higher with longer aeration period in one SBR cycle, probably linked to increased nitrite levels
Thoern and Soerensson (1996)	1.2%	Batch tests denitrifying activated sludge – real wastewater	Grab samples	N ₂ O emission increased with decrease of pH
van Benthum et al. (1998)	5-95%	Continuous oxic-anoxic SBR activated sludge – artificial wastewater (380 days)	Grab samples	N ₂ O emission decreased over time – increased N ₂ O emission possibly a start-up phenomenon
Chung and Chung (2000)	0.005-0.5%	Batch tests denitrifying activated sludge – artificial wastewater	Grab samples	N ₂ O emission increased with decrease of COD/N
Park et al. (2000)	0.2-4.5%	Continuous nitrifying and denitrifying activated sludge – real wastewater	Grab samples	N ₂ O emission decreased upon methanol addition for higher COD/N ratio
Itokawa et al. (2001)	0.5->20%	Continuous oxic-anoxic SBR activated sludge – artificial high-strength wastewater	On-line measurement	N ₂ O emission increased with decrease of COD/N
Burgess et al. (2002a)	0.08-1.17%	Continuous nitrifying activated sludge – artificial wastewater	On-line measurement	N ₂ O emission increased with increasing ammonia shock loads and nitrite concentration
Noda et al. (2003)	0.2-1.5%	Continuous activated sludge – real wastewater (50 days)	Weekly grab samples	N ₂ O emission increased with decreasing oxygen concentration and decreasing SRT
Zeng et al. (2003b)	90%	Continuous anaerobic-anoxic SBR activated sludge – artificial wastewater	On-line measurement	N ₂ O emission increased with increasing nitrite concentration – N ₂ O might be major product of denitrification by GAO ^c
Lemaire et al. (2006)	>50%	Continuous oxic-anoxic SBR activated sludge – artificial wastewater	On-line measurement	High N ₂ O emission (during oxic stage) was hypothesized to be caused by low diversity of population due to single carbon source

Abbildung 5-2: Untersuchungen zur N₂O-Bildung in der Abwasserreinigung (Kampschreur, Temmink *et al.*, 2009)

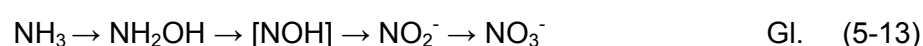
Nitrifikation

Die Nitrifikation beschreibt die Oxidation von im Abwasser enthaltenen Ammoniumstickstoff (NH₄⁺) zu Nitratstickstoff (NO₃⁻). Drei unterschiedliche Gruppen von Mikroorganismen sind für die Nitrifikation verantwortlich. Ammonium oxidierende Bakterien (AOB) und Ammonium oxidierende Archaeen (AOA) wandeln Ammonium zu Nitrit um. Nitrit oxidierende Bakterien (NOB) wandeln das gebildete Nitrit weiter zu Nitrat um.

Folgende Reaktionsgleichungen beschreiben den Prozess:



Nitrosomonas bilden bei der Oxidation des Ammoniaks (NH₃) zunächst das Intermediat Hydroxylamin (NH₂OH). Zur Energiegewinnung wird NH₂OH weiter zu NO₂⁻ oxidiert. Es wird vermutet, dass hierbei das unbeständige Zwischenprodukt Nitroxyl (NOH) gebildet wird. Der vollständige Stoffwechselweg ergibt sich somit zu:



Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass Nitrifikanten unter bestimmten Betriebsbedingungen auch in der Lage sind reduktiv N_2O aus dem vorhandenen NO_2^- zu bilden.

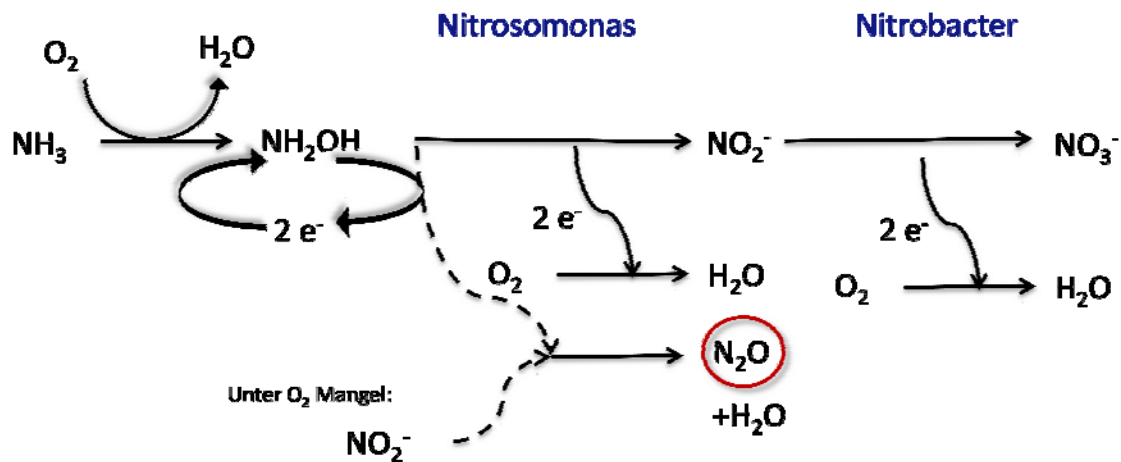


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Nitrifikation nach (Seiler, Conrad, 1981)

- Sauerstoffmangel

Die nitrifizierenden Bakterien beziehen ihre Energie aus der Bildung der Intermediäre unter obligat aeroben Bedingungen. Steht nicht ausreichend Sauerstoff für sämtliche Oxidationsschritte der Nitrifikation zur Verfügung, wird der vorhandene Sauerstoff zur Bildung von NH_2OH gespart. Vorhandenes Nitrit kann in diesem Fall als finaler Elektronenakzeptor verwendet und zu N_2O umgesetzt werden.

Bisheriger Erkenntnisstand

$\text{O}_2 \leq 1 \text{ mg/L}$: $0,1 \text{ kg N}_2\text{O-N} / \text{kg N}$ (Goreau, Kaplan *et al.*, 1980)

- hohe Nitritkonzentration

Nitrit ist für die nitrifizierenden Bakterien in zu hohen Konzentrationen toxisch. In Stresssituationen sind diese Bakterien in der Lage, das Nitrit zu N_2O zu reduzieren und somit die Nitritkonzentration zu reduzieren. Dies tritt insbesondere dann ein, wenn nicht genügend Sauerstoff für die Nitratbildung zur Verfügung steht.

Bisheriger Erkenntnisstand

$\text{NO}_2^- \geq 10 \text{ mg/L}$: abhängig vom gelösten O_2 4-8 fache N_2O -Bildung (Tallec, Garnier *et al.*, 2006)

- Hohe organische Fracht

In Kläranlagen mit niedrigen O_2 -Konzentrationen und hohem Schlammalter wurden ammoniumoxidierende Archaeen nachgewiesen (Park, Wells *et al.*, 2006). Diese Bakterien nutzen Ammonium als Energiequelle sowie CO_2 als Kohlenstoffquelle wobei über den Stoffwechselweg vermehrt N_2O gebildet wird. Dieser Stoffwechsel

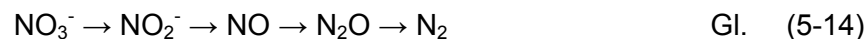
läuft zwar 100-1.000-mal langsamer als die heterotrophe Ammoniumoxidation ab, bei hohen organischen Frachten ($\text{CSB/N} > 10$) und niedrigen O_2 -Konzentrationen können diese Stämme die Nitrifikation jedoch dominieren (van Niel, Arts *et al.*, 1993).

- Betriebsschwankungen

Die biochemische Reaktion der Mikroorganismen wird durch Enzyme katalysiert, welche von den Organismen synthetisiert werden. Da diese Synthese mit einem Energieverbrauch verbunden ist, werden nur Enzyme synthetisiert, die unter den gegebenen Milieubedingungen benötigt werden. Wechseln diese Milieubedingungen kurzfristig, muss sich die Biozönose den neuen Bedingungen anpassen. In dieser Phase kann es vermehrt zu unerwünschten Biochemischen Prozessen wie der N_2O Bildung kommen.

Denitrifikation

Die Denitrifikation beschreibt die Reduktion von NO_3^- über Zwischenprodukte zu elementarem Stickstoff (N_2). Aus der Reduktionskette wird ersichtlich, dass N_2O hierbei ein obligates Zwischenprodukt ist.



Mögliche N_2O -Emissionen sind somit ausschließlich von der Bildungs- sowie Reduktionsgeschwindigkeit abhängig. Einfluss auf die Reduktionsrate der Denitrifikationsschritte haben die Konzentration der Elektronenakzeptoren und -donatoren, vorhandene Hemmstoffe, Temperatur, pH-Wert sowie die Zusammensetzung der Biomasse.

- Sauerstoffkonzentration

Die an der Reduktionskette der Denitrifikation beteiligten Enzyme werden durch im Abwasser gelösten Sauerstoff gehemmt. Die N_2O -Reduktion reagiert hierbei besonders empfindlich auf den Hemmstoff Sauerstoff. Dies führt dazu, dass die Nitratreduktion lediglich bis zum N_2O abläuft und dort gehemmt wird (Otte, Grobbsen *et al.*, 1996).

- Schlammalter

Bei unzureichendem Schlammalter kann es zu einer Nitrit-Akkumulation kommen, da die Denitrifikation nicht ausreichend abläuft.

- CSB/N-Verhältnis

Organischer Kohlenstoff wird während der Denitrifikation als Elektronendonator der biochemischen Reduktionsschritte genutzt. Ein Mangel an biologisch abbaubarem Kohlenstoff während der Nitrifikation führt zu einer Steigerung der N_2O -Emissionen,

da die vollständige Reduktion zu N_2 nicht erreicht werden kann.
 $CSB/N = 1,5 \Rightarrow 10\% N_2O$ vom TKN (Itokawa, Hanaki *et al.*, 2001)

$CSB/N = 2,4-3,5 \Rightarrow 20-30\% N_2O$ vom TKN (Itokawa, Hanaki *et al.*, 2001)

$CSB/N = 5-5,5 \Rightarrow 1\% N_2O$ vom TKN (Itokawa, Hanaki *et al.*, 2001)

Laboruntersuchungen: 32-64 % des TKN $\Rightarrow N_2O$

- Hemmstoffe

Hemmstoffe im Abwasser können die NO- bzw. N_2O -Reduktase blockieren, so dass keine weitere Reduktion zu N_2 erfolgt. (z.B. Cyanid, 2,4-Dinitrophenol, Natriumazid, Kupfersulfat, Kohlenstoffmonoxid, Schwefelwasserstoff, Thiocyanat, Monoiodoacetat, Acetylen)

- Zusammensetzung der Biomasse

In kommunalen Belebtschlammanlagen handelt es sich bei der Biomasse in der Regel um Mischbiozönosen. Diese setzt sich aus Spezies mit unterschiedlichen Stoffwechselwegen und Reaktionsgeschwindigkeiten zusammen. Bestimmte Milieu- bzw. Prozessbedingungen können dazu führen, dass sich vorwiegend oder ausschließlich Mikroorganismen in der Anlage ansiedeln, welche Enzyme zur Nitrit / Nitrat-Reduktase besitzen. Hat sich solch eine Kultur etabliert, wird N_2O nur in geringen Mengen reduziert und vermehrt emittiert.

Untersuchungen von 26 isolierten Nitrat-reduzierenden Stämmen einer kommunalen Kläranlage zeigten, dass lediglich sieben Stämme zur vollständigen Reduktion (N_2) neigten. Die restlichen 19 Stämme bildeten vornehmlich Nitrit oder N_2O als Stoffwechselendprodukt (Schön, Walz *et al.*, 1993).

- pH-Wert

Das pH-Optimum der Denitrifikanten liegt im neutralen bis leicht alkalischen Milieu (Delwiche, Bryan, 1976). Untersuchungen der pH-Wert abhängigen N_2O -Bildung anhand der Reinkultur *Pseudomonas dentrificans* im Bereich von pH 6 bis 8 haben gezeigt, dass Denitrifikationsgeschwindigkeit und N_2O/N_2 -Verhältnis in der Abluft konstant bleiben (Matsubara, Mori, 1968).

Bei Untersuchungen von Belebtschlammproben mit pH 6,5 wurde eine deutlich gesteigerte N_2O -Bildung im Vergleich zu Proben mit pH 7,2 und pH 8,0 beobachtet (Geywitz-Hetz, Bußmann *et al.*, 1993).

- Betriebsschwankungen

Die biochemische Reaktion der Mikroorganismen wird durch Enzyme katalysiert, welche von den Organismen synthetisiert werden. Da diese Synthese mit einem Energieverbrauch verbunden ist, werden nur Enzyme synthetisiert, die unter den

gegebenen Milieubedingungen benötigt werden. Im Fall von betrieblichen Schwankungen kann es im Anpassungszeitraum der Bakterien zu N_2O -Spitzen kommen.

Chemische Reaktionen

Das Zwischenprodukt NH_2OH der Nitrifikation kann mit Nitrit chemisch zu NO und N_2O reagieren (Van Cleemput, 1998). Da es sich bei den Edukten jedoch um Stoffwechselprodukte der biologischen Stickstoffelimination handelt, ist in technischen Anlagen eine genaue Unterscheidung zwischen chemisch und biochemisch gebildetem N_2O sehr schwer.

Bemessungsansätze

Alle aktuellen Bemessungsansätze zur Bestimmung der N_2O Emissionen aus Kläranlagen beziehen sich auf die Stickstofffracht im Zulauf als Eingangsgröße.

Berechnungsansatz für die Abwasserbehandlung (IPCC, 2006)

$$N_2O_{Emissionen} = N_{Zulauf} \cdot EF \cdot \frac{44}{28} \quad \text{Gl. (5-15)}$$

Mit: $N_2O_{Emissionen}$: N_2O Emissionen im Betrachtungszeitraum [kg N_2O/a]

N_{Zulauf} : Stickstofffracht im Zulauf [kg N/a]

EF: Emissionsfaktor für die N_2O -Bildung [kg N_2O-N/kg N]

44/28: Molarer Umrechnungsfaktor von kg N_2O-N zu kg N_2O

Von der IPCC wird als Standartwert ein Emissionsfaktor von $EF = 0,005$ (Schwankungsbereich 0,0005-0,25) bzw. ein spezifischer Emissionsfaktor von 3,2 g $N_2O/E/a$ (Schwankungsbereich 2-8) angesetzt.

Die niederländische Richtlinie des Umweltministeriums setzt die gleiche Berechnungsformel an, allerdings wird ein höherer Emissionsfaktor von $EF = 0,01$ für die N_2O -Bildung angesetzt (VROM, 2008).

Bisherige Erkenntnisse zeigen jedoch, dass ein solcher pauschaler Emissionsansatz die realen Verhältnisse nur sehr ungenau abbilden kann (vgl. Abbildung 5-2).

5.2.3.3 Klärschlammverbrennung

Die Emissionen bei der Klärschlammverbrennung sind stark von der Zusammensetzung des Klärschlammes, aber auch von dem eingesetzten Verbrennungsverfahren sowie den Verfahren zur Abgasreinigung wie der katalytischen NO_x -Reduktion abhängig. Nach aktuellem Forschungsstand wird für die Verbrennung von Klärschlamm in einem

Wirbelschichtofen ein Emissionswert von 0,99 kg N₂O pro Tonne Trockenmasse angesetzt (Johnke, 2003). Dieser Emissionswert wurde ebenfalls von den IPCC-Richtlinien übernommen (IPCC, 2006). Weiterhin wird auch davon ausgegangen, dass Methan in geringen Mengen freigesetzt wird (0,19 kg CH₄ pro Tonne Klärschlamm) (IPCC, 2006). Auswirkungen auf die Emissionshöhe hat ebenfalls das gewählte Verbrennungsverfahren. Bei einer Vergleichsrechnung zwischen den Verfahren Monoverbrennung mit Trocknung, Monoverbrennung mit Kohle, Mitverbrennung Müllverbrennungsanlage, Mitverbrennung Braunkohlekraftwerk, Mitverbrennung Steinkohlekraftwerk wurden Emissionskennzahlen abhängig von der Substitution oder dem Bedarf fossiler Brennstoffe ermittelt (Friedrich, Fehrenbach *et al.*, 2010).

5.2.3.4 Klärschlammnutzung in der Landwirtschaft

Im Jahr 2003 wurden bundesweit über 56 % aller Klärschlammte einer landwirtschaftlichen Nutzung zugeführt (Durth, Hartmann *et al.*, 2005). Seit langem werden hierbei mögliche Gefahren aus der Belastung der Klärschlammte mit Schwermetallen, endokrinen Disruptoren (Hormonen) oder Medikamentenrückständen diskutiert. Unabhängig von diesen anthropogenen Bodenbelastungen führen biochemische Abbauvorgänge des Klärschlammes auf den landwirtschaftlichen Flächen auch vermehrt zur Emission von N₂O. Untersuchungen mit verschiedenen Klärschlammten haben gezeigt, dass im Rohschlamm durchschnittlich 30 g/m³ N₂O freigesetzt wurden. Mesophil ausgefauter Klärschlamm emittierte im Vergleich noch 15 g N₂O/m³ (Hospido, Carballa *et al.*, 2010). Als Vergleichsgröße hierzu gibt das IPCC bei der landwirtschaftlichen Stickstoffdüngung einen Emissionsfaktor von 0,01 kg N₂O-N/ kg N an (Eggleston, Buendia *et al.*, 2006). Bei einem durchschnittlichen Stickstoffgehalt von 38 g/kg_{TS} Faulschlamm lägen die Emissionen bei 597 g N₂O/ t_{TS} bzw. 0,18 g/m³ (TS 30%).

5.2.3.5 Ozonung

Bei der Ozonung von Abwasser wird das Oxidationspotential des O₃ genutzt, um insbesondere persistente Abwasserspurenstoffe aufzuoxidierten. Da O₃ sehr instabil ist, erfolgt die Erzeugung unmittelbar am Einsatzort. Hierzu werden zumeist Ozongeneratoren nach dem Verfahren der stillen elektrischen Entladung eingesetzt. Vereinfacht dargestellt, werden bei diesem Prinzip O₂-Moleküle durch das Aufbringen einer elektrischen Spannung in freie O[•] Radikale gespalten. Ein Teil dieser freien O[•] Radikale reagiert mit den vorhandenen O₂-Molekülen zu O₃. Abhängig von dem Bereitstellungspfad des eingesetzten Sauerstoffs in Form von Flüssigsauerstoff (LOX) oder mittels Druckwechseladsorption (PSA) aufgereinigtem Luftsauerstoff befindet sich ebenfalls ein gewisser Anteil Stickstoffmoleküle (N₂) im Generatorraum. Die erzeugten O[•] Radikale reagieren hierbei ebenfalls mit N₂ zu Stickoxiden, insbesondere relevant zu N₂O. Abbildung 5-4 zeigt vereinfacht die schematische Darstellung.

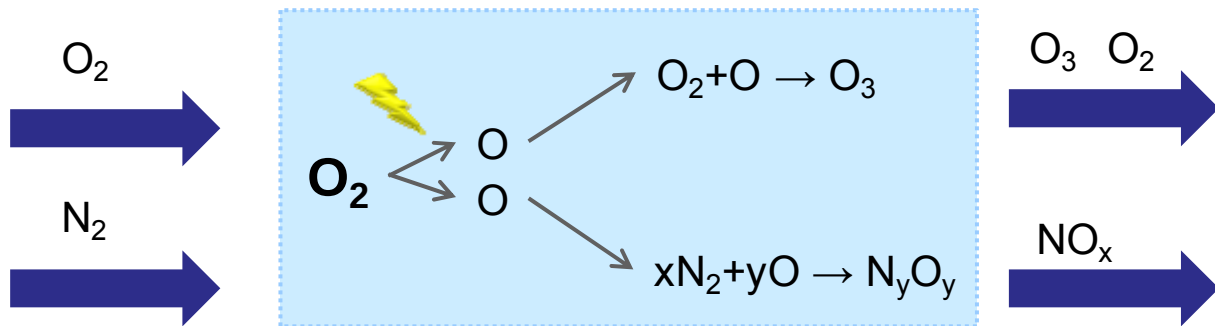


Abbildung 5-4: Reaktionsschema der N_2O -Bildung in einem Ozongenerator

Da die N_2O -Bildung im Ozongenerator stark betriebsabhängig ist, sind genaue Aussagen über die Quantität nur schwer möglich. Nach einem Ansatz von (Kogelschatz, Baessler, 1987) wird für die Ozonung von Trinkwasser ein Emissionsfaktor von $0,11 \text{ g } N_2O/m^3$ vorgeschlagen (Galletti, Kowalski *et al.*, 2010). Darin berücksichtigt sind jedoch keine möglichen Reaktionsprozesse des Ozons mit Stickstoffverbindungen, welche im Abwasser vorliegen können.

5.3 Trinkwasserversorgung

Der größte Anteil der Treibhausgasemissionen in der Wasserversorgung entfällt auf den Energieverbrauch. Im Jahr 2007 lag der Verbrauch elektrischer Energie in der deutschen Wasserversorgung bei 2400 Mio. kWh (DVGW, 2010). Mit dem Emissionsfaktor für den deutschen Strommix im Jahr 2007 von $605 \text{ g } CO_2/kWh$ (Umwelt-Bundesamt, 2010) entsprach das insgesamt einer Emission von 1,45 Mio. Tonnen CO_2 . Entscheidender Energieverbraucher sind die Pumpen zur Wasserförderung von den Gewinnungsanlagen über die Aufbereitung in das Verteilungsnetz bis zum Verbraucher. Allein in diesem Bereich geht der DVGW (2010) von einem Einsparungspotential von bis zu 16 % aus. Bei Annahme einer Reduzierung um 5 % könnte eine CO_2 -Einsparung von 72500 t erreicht werden.

Für die niederländische Trinkwasserproduktion und -verteilung wurde ein mittlerer Energiebedarf von $0,47 \text{ kWh}/m^3$ angegeben. Dabei gibt es große Unterschiede zwischen den einzelnen Wasserversorgungsunternehmen, abhängig von der genutzten Wasserressource, der aufbereiteten Wassermenge, der Anzahl der Aufbereitungsschritte sowie der Topografie und den Entfernungen im Verteilungsnetz. (Frijns, Mulder *et al.*, 2008)

In den USA entfallen 80 bis 90 % des CF in der Wasserversorgung auf den Verbrauch an elektrischer Energie. Davon werden in Grundwasserwerken 99 % und in Oberflächenwasserwerken 91 % allein von den Pumpen zur Wasserförderung verbraucht. 90 % der Treibhausgasemissionen werden durch die Wasserförderung erzeugt. (Boulos, Bros; 2010)

Aber auch bei der Wasseraufbereitung gibt es einige Verfahren, die sehr energieintensiv sind. Dazu gehören die Membranverfahren, die Ozonung, die UV-Bestrahlung und auch die Belüftung. Insbesondere vor dem Hintergrund immer höherer Anforderungen an die Qualität des Trinkwassers, müssen die damit unter Umständen verbundenen höheren Treibhausgasemissionen aufgrund umfangreicherer oder energieintensiverer Aufbereitungsverfahren berücksichtigt werden (Griffiths-Sattenspiel, Wilson, 2009).

Für die Erstellung einer Energiebilanz in Wasserversorgungsunternehmen wurde vom DVGW ein Handbuch entwickelt (DVGW, 2010). Es handelt sich dabei um eine Handlungsempfehlung zur Identifizierung von Einsparpotentialen, wobei nur die Verbrauchswerte von elektrischer Energie und ggf. deren Erzeugung im Betrieb erfasst und bilanziert werden. Für die Bilanzierung des CF kann dieses Handbuch zumindest als Leitfaden dafür dienen, wo die Systemgrenze bei Wasserversorgungsunternehmen zu ziehen ist, welche Prozesse mindestens berücksichtigt werden müssen und wie deren Energieverbrauch berechnet wird. Außerdem finden sich darin viele Hinweise zu Einsparpotenzialen. Auch Strutt *et al.* (2008) weisen darauf hin, dass ein Energie-Audit ein effektives Werkzeug zur Reduzierung des CF in der Wasserversorgung ist.

Zur Bilanzierung des Carbon Footprint für die Trinkwasserversorgung wurden in den Niederlanden und in Großbritannien bereits vereinzelt Berechnungen und Abschätzungen vorgenommen (Frijns, Mulder *et al.*, 2008, UKWIR, 2008).

Neben dem elektrischen Energieverbrauch für alle Pumpen, Aufbereitungsprozesse und administrative Aufgaben müssen bei der Bilanzierung des CF der Trinkwasserversorgung folgende Komponenten berücksichtigt werden:

- Verbrauch an erneuerbarer Energie
- Verbrauch von fossilen Brennstoffen
- Transportprozesse
- Herstellungsprozesse der verbrauchten Betriebsmittel
- Abfall-/Schlammbehandlung und –entsorgung
- direkte Emissionen in den Prozessen (Belüftung, Ozonung)

Die direkten Emissionen fallen in der Trinkwasserversorgung vergleichsweise gering aus und sollten ggf. bei folgenden Prozessen beachtet werden:

- CO₂- und Methan-Emissionen in Grundwassergewinnungsanlagen
- CO₂- und Methan-Emissionen in Belüftungsanlagen
- Lachgas-Emissionen in Ozonierungsanlagen

Ob die CO₂-Emissionen aus Grundwasser in die Bilanzierung mit einfließen müssen, ist fraglich, vor dem Hintergrund, dass man diese auch dem natürlichen Kuzzeit-CO₂-Kreislauf zuordnen könnte (siehe Kapitel 3.3.1), und sie somit klimaneutral wären. In den Niederlanden wurden Sie abgeschätzt und in die CF-Bilanzierung mit einbezogen. UKWIR (2008) hat sie für die britische Methode ausgeschlossen.

Für die Lachgas-Emissionen bei der Ozonung wird in der Literatur ein Emissionsfaktor von 0,11 g N₂O/m³ ozoniertes Wasser angegeben (UKWIR, 2008). Dieser Wert gilt aber streng genommen nur für den Fall einer Ozonung mit Luft und nicht bei Verwendung von reinem Sauerstoff (Frijns, Mulder *et al.*, 2008).

Fällt bei der Wasseraufbereitung Schlamm an, der entsorgt werden muss und nicht einer Wiederverwendung zugeführt wird, müssen die bei der Entsorgung entstehenden Emissionen (z.B. Kraftstoffe, Energie) ebenfalls in die Bilanzierung einfließen.

Für indirekte Emissionen, die bei der Herstellung eingesetzter Chemikalien und Materialien entstehen, sind in der Literatur vereinzelt Angaben zu finden. Sie sind in Anhang 14.1 enthalten.

5.4 Sonderbauwerke und Sammler

5.4.1 Direkte Emissionen

Im Gegensatz zur Schwefelwasserstoff (H₂S)-Bildung wurde die Bildung von weiteren Gasen wie N₂O und CH₄ in Abwasserkanälen bisher kaum untersucht. Im aktuellen Handbuch der IPCC zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen wird für Kanalsysteme sogar pauschal angenommen, dass keine relevanten Emissionen anzusetzen sind (IPCC, 2006). Dies ist jedoch zu hinterfragen, da sowohl bei Untersuchungen im Kanal (Clemes, Haas, 1997), (Guisasola, de Haas *et al.*, 2008) als auch bei Messungen an Einlaufbauwerken von Kläranlagen (STOWA, 2010) deutliche Emissionen nachgewiesen werden konnten.

5.4.1.1 CH₄ Emissionen

Das unter anaeroben Bedingungen gebildete Treibhausgas CH₄ ist in der Abwasserableitung bisher weitestgehend unbeachtet geblieben. Dahingegen ist die Schwefelwasserstoff(H₂S)-Bildung in Abwasserkanälen auf Grund der Geruchs- und Korrosionsproblematik ein seit langem bekanntes und untersuchtes Phänomen. H₂S ist das Endprodukt der anaeroben Desulfurikation. Hierbei wird Sulfat (SO₄²⁻) von Schwefelbakterien zu Sulfid (HS⁻) bzw. H₂S reduziert. Insbesondere bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit zum Teil hohen Schwefelanteilen im Substrat kann es zu einer vermehrten H₂S-Bildung kommen. Da die anaerobe Sulfatreduktion und die Methanogenese bedingt durch die Milieubedingungen

parallel laufen, ist davon auszugehen, dass in Abwasserkanälen mit H_2S -Problematik ebenfalls vermehrt CH_4 gebildet wird. Diese unkontrollierte Methanogenese ist jedoch neben der klimatischen Relevanz hinsichtlich weiterer Gesichtspunkte als kritisch zu bewerten:

- Es entsteht ein potentiell Sicherheitsrisiko durch die Bildung eines explosiven Gasgemisches im Kanalsystem (untere Explosionsgrenze CH_4 : 4,4 Vol.-%)
- eine erhöhte CSB-Zehrung im Kanal kann ungünstige Auswirkungen auf den Prozess der Kläranlage haben (Stickstoffelimination)

Umfassende Untersuchungen zur Methanogenese in Abwasserkanälen sind bis heute jedoch noch nicht erfolgt. Erste Ansätze zur Beschreibung und mathematischen Modellierung des Prozesses wurden für Druckentwässerungssysteme in Australien durchgeführt (Guisasola, de Haas *et al.*, 2008; Guisasola, Sharma *et al.*, 2009). Auf die deutsche Wasserwirtschaft sind die Ergebnisse jedoch bedingt durch die klimatischen Verhältnisse (Abwassertemperaturen zwischen 26,6 bis 28,4°C) und dem untersuchten Entwässerungssystem nur begrenzt übertragbar. Da es jedoch der einzige bekannte Ansatz zur Methanbildung in Abwasserkanälen ist soll er an dieser Stelle trotzdem dargelegt werden.

Eingangsgrößen der Kanalhydraulik im Modell sind das Verhältnis von benetzter Oberfläche zum Abwasservolumen und die hydraulische Verweilzeit des Abwassers im Kanal. Die benetzte Oberfläche beschreibt hierbei die Fläche, welche von Bakterien zur Biofilmbildung genutzt werden kann (vgl. Sielhaut). Das Verhältnis dieser Oberfläche zum Abwasservolumen beschreibt hierbei die Stoffaustauschfläche zu verfügbarem Substrat (CSB). Kleine Nenndurchmesser begünstigen hierbei, bedingt durch das höhere Oberflächen zu Volumenverhältnis den Stofftransport und damit die Methanogenese. Lange hydraulische Verweilzeiten begünstigen den langsam ablaufenden anaeroben Katabolismus weiter. Abbildung 5-5 zeigt die Methanogenese in Druckentwässerungssystemen als Funktion von hydraulischer Verweilzeit und A/V-Verhältnis. Die Methanproduktion ist in g CSB-Äquivalent pro m^3 Abwasser angegeben (1g CSB = 0,25 g CH_4).

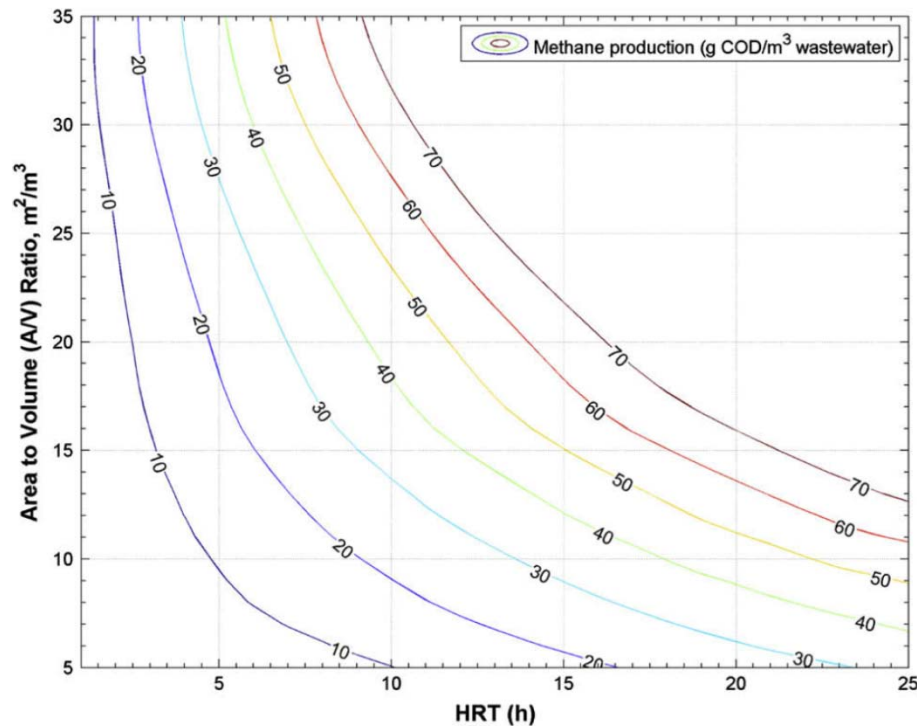


Abbildung 5-5: Methanbildung in Abwasserkanälen als Funktion der hydraulischen Verweilzeit und A/V-Verhältnis (Guisasolaa, Sharmaa et al., 2009)

Ein Großteil des in der Kanalisation gebildeten CH_4 wird vermutlich erst in den Kläranlagen ausgestrippt. Bei Messreihen auf kommunalen Kläranlagen in den Niederlanden konnten im Einlaufbauwerk bis zu $2 \text{ g CH}_4/\text{m}^3$ nachgewiesen werden. Zur Abgrenzung der Bilanzierungsräume und genaueren Unterscheidung der Emissionsquellen ergibt sich hier noch weiterer Forschungsbedarf.

5.4.2 N_2O Emissionen

Nitrifizierende sowie denitrifizierende Prozesse finden analog zu den Vorgängen auf einer Kläranlage auch in der Kanalisation statt und können zu Freisetzung von N_2O führen. Ähnlich wie die Methanbildung in öffentlichen Abwasserkanälen wurde die N_2O -Bildung bisher jedoch ebenfalls kaum untersucht. Ein Versuch zur Quantifizierung der N_2O -Emissionen aus der Mischwasserkanalisation wurde Mitte der 90er anhand von Messungen in der Stadt Bayreuth durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass vermutlich ein Großteil des Stickstoffstoffwechsels in gebildeten Biofilmen abläuft. Bedingt durch die schwankenden Abwasserfüllstände und damit variierender O_2 -Verfügbarkeit konnte keine genaue Aussage darüber getroffen werden, ob die N_2O -Bildung aus der Nitrifikation oder Denitrifikation resultiert. Abhängig von der Abwasserhöhe und der Biofilmfläche wurden jedoch Emissionsraten zwischen $0,11$ bis $3,8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ gemessen. Diese Werte wurden auf einen angeschlossenen Einwohnerjahreswert von $3,2 \text{ g N}_2\text{O}/\text{E}/\text{a}$ hochgerechnet (Clemes, Haas, 1997). Bedingt durch die stichpunktartige Messung kann dieser Wert jedoch nicht als

repräsentativ angesehen werden, zeigt aber dass N_2O -Bildung im Kanal stattfindet und weiter untersucht werden sollte.

5.5 Pumpwerke

Pumpwerke finden dort Einsatz, wo einem inkompressiblen Fluid Bewegungsenergie zugeführt werden soll. In der Wasserwirtschaft finden Pumpwerke zur Förderung und Transport von Wasser und Abwasser ein weites Anwendungsfeld. Unterschieden wird hierbei nach Fördermedium zwischen Schmutz-, Regen-, Misch- und Grundwasserpumpwerken. Allgemeine Bilanzierungsregeln und Kennwerte zum Emissionsverhalten von Pumpwerken sind nach aktuellem Kenntnisstand jedoch noch nicht erhoben worden. Für die CF-Bilanz eines Pumpwerkes relevante Emissionsquellen resultieren in erster Linie aus dem Energieverbrauch während des Betriebs und sekundär aus dem Wartungs- und Instandhaltungsaufwand. Falls dem Pumpwerk Reinigungsanlagen wie Rechen oder Sandfang vorgeschaltet sind, ergeben sich weitere Emissionen aus der Entsorgung der Abfallstoffe.

5.5.1 Direkte Emissionen

Direkte Emissionen wie CH_4 und N_2O -Bildung wurden bisher in Pumpwerken nicht nachgewiesen. Daher wird an dieser Stelle angesetzt, dass in Pumpwerken keine biogenen Treibhausgase gebildet werden.

5.5.2 Indirekte Emissionen

Da es sich bei Pumpen meist um motorgetriebene Anlagen zur Wasserförderung handelt resultieren die ökologischen Auswirkungen in erster Linie aus dem Energieverbrauch zum Betrieb des Motors. Der Energieverbrauch und die energetischen Optimierungspotentiale von Pumpwerken wurden bereits in einem Energiehandbuch zusammengestellt (Kilchmann, Kamm *et al.*, 2004) und Kennwerte erarbeitet. Der Energiebedarf ist jedoch im Einzelfall von den eingesetzten Pumpen sowie peripherer Anlagentechnik (Rechen, Sandfang, Heizung, MSRT, etc.) abhängig. Weiterhin sind Emissionen, welche durch Wartung und Instandhaltung (Anfahrt, Reinigung, Betriebsmitteleinsatz, Materialeinsatz, etc.) entstehen, zu berücksichtigen. Der quantitative Input ist jedoch ebenfalls eine Einzelfallbetrachtung, welcher mittels literarischer Emissionsfaktoren qualifiziert wird.

5.6 Oberflächengewässer und Talsperren

5.6.1 Indirekte Emissionen

Für die Bilanzierung des CF von Oberflächengewässern und Talsperren sind bisher kaum Ansätze bekannt. Lediglich In Großbritannien wurde der CF für eine Standard-Talsperre mit einer Nutzungsdauer von 20 Jahren beispielhaft ermittelt (Strutt *et al.*, 2008). In diese Bilanzierung flossen alle Materialien, die für den Bau der Talsperre angeliefert und abtransportiert wurden, ein. Es wurden zwei Szenarien angenommen und jeweils der CF über die gesamte Nutzungsdauer der Talsperre berechnet:

- ein tatsächlicher CF, bei Verwendung von Sekundär- bzw. Recycling-Materialien für den Bau
- ein theoretischer Wert, ohne die Verwendung von recycelten Rohstoffen.

Neben allen Rohmaterial- und Treibstoffmengen sind in die Bilanzierung die produzierten Abfallmengen und das verbrauchte Wasser für die Inbetriebnahme der Talsperre eingeflossen. Die Emissionen, die mit der Herstellung der Rohmaterialien verbunden sind, wurden einem Materialverzeichnis für Baumaterialien, welches von der University of Bath in England entwickelt wurde, entnommen. Das Ergebnis zeigte, dass 83 % des CF durch die Herstellung der Baumaterialien (vorwiegend Beton) verursacht wurden. Die Emissionen beim Betrieb und bei der Instandhaltung machen nur etwa 17 % aus. Die Verwendung von Sekundärrohstoffen (Beton, Stahl, duktiles Eisen) führte zu einer Reduzierung um 25 % des CF.

5.6.2 Direkte Emissionen

Direkte Emissionen spielen bei allen Oberflächengewässern eine Rolle, allerdings sind dazu kaum wissenschaftlichen Ergebnisse verfügbar. Lediglich in Brasilien, Kanada, Französisch Guyana und Finnland hat es dazu schon umfangreichere Messungen gegeben, aber nicht in mediterranen Gebieten (Neumann-Silkow, 2006; Huttunen *et al.*, 2003).

Biochemische Prozesse in Oberflächengewässern, die zu Treibhausgas-Emissionen führen, sind direkt abhängig vom Ökosystem der unmittelbaren Umgebung. In Stauseen entstehen sie zum einen in anaeroben Bereichen bei der Zersetzung von Pflanzen, wobei es zur Bildung von Methan kommt. Zum anderen wird an der Wasseroberfläche durch die Verrottung von Pflanzen CO₂ freigesetzt. Das Ausmaß hängt von der überschwemmten Vegetation, eingetragenen Pflanzenresten und Nährstoffeintragen ab. Ein zunehmender Nährstoffgehalt führt zur Vermehrung der Biomasse verbunden mit einer steigenden Sauerstoffzehrung. Dies fördert anaerobe Abbauvorgänge in Sedimenten bei denen es zu CH₄ – Ausgasungen kommt. Die zur Methanbildung führenden Abbauprozesse werden entscheidend durch die Temperatur und den Sauerstoffgehalt beeinflusst. Nährstoffe und

Kohlenstoff werden durch Bäche/Flüsse, mit dem Grundwasser und durch Oberflächenabflüsse eingetragen.

Besonders künstliche Stauseen in tropischen Regionen liefern signifikante CO₂ und CH₄ - Beiträge zu den Treibhausgas-Emissionen. Diese werden verursacht durch die Überschwemmung tropischer Wälder (Guérin, Abril *et al.*, 2007). Weltweit emittieren 7% des anthropogenen Treibhausgases Methan aus künstlich angelegten Stauseen. Die Berechnung der Methanbildung ist sehr schwierig, weil letztlich vier Emissionspfade berücksichtigt werden müssen: Das im Sediment gebildete Methan steigt in Form von Blasen auf. Sobald Sauerstoffhaltige Wasserschichten erreicht werden, wird ein Teil durch Methan oxidierende Bakterien umgesetzt. Der größte Anteil des Methans erreicht aber die Wasseroberfläche und wird über Diffusionsprozesse an die Luft abgegeben. Wie intensiv diese Prozesse wiederum ablaufen, hängt zum einen von der Konzentrationsdifferenz zwischen Wasser und Luft ab und zum anderen von physikalischen Austauschvorgängen infolge von Turbulenzen (z.B. durch Wind). Die vierte Komponente wird beeinflusst durch die Vegetationscharakteristik in der Uferzone und die Oxidationsprozesse in den Sedimenten. Mit Hilfe statistischer Methoden wurden in einer amerikanischen Studie die wesentlichsten Indikatoren ermittelt, anhand derer die Methan-Emissionen abgeschätzt werden können: Die Methan-Emissionen sind direkt proportional zum Gesamtphosphorgehalt und indirekt proportional zum DOC. Weiterhin sind die Stärke der anoxischen Schicht und die Gewässertiefe insgesamt wesentliche Einflussfaktoren. Die indirekte Abhängigkeit vom DOC könnte man u.a. damit erklären, dass ein hoher DOC meist ein Kennzeichen für oligotrophe Gewässer ist. (Bastviken *et al.*, 2004)

N₂O-Emissionen sind grundsätzlich in Ufer nahen Bereichen größer als in Ufer fernen Bereichen eines Sees. Bei Untersuchungen in Finnland konnten keine N₂O –Emissionen in Ufer fernen Bereichen festgestellt werden, weil die Ufer nahe Zone wohl als ein Puffer für Nitrateinträge fungiert. Dort können auch N₂O –Emissionen gemessen werden. (Huttunen, Alm *et al.*, 2003)

CO₂ –Emissionen sind höher aus Stauseen und Seen, in deren Einzugsgebieten sich Torflandschaften, Moore oder Forstwirtschaft befinden. In einer finnischen Studie wurden die Emissionen an Seen gemessen. Dabei handelte es sich vorwiegend um eutrophe und mesotrophe Seen. Die Einzugsgebiete waren gekennzeichnet durch Torflandschaften und Hochwälder. Es wurden CH₄-Emissionen von 1 bis 190 mg/m² d und CO₂-Emissionen von 170 bis 3200 mg/m² d gemessen (Huttunen *et al.*, 2003). N₂O-Emissionen sind in diesen Gebieten vernachlässigbar gering.

Bei der Abschätzung der Treibhausgasemissionen aus einer Talsperre müsste man – streng genommen - vom Gesamtbetrag der Emissionen die Emissionen vor der Überflutung sowie die Emissionen die durch den Abbau neu entstandener und eingespülter Biomasse

entstehen, abziehen. Letztere sind klimaneutral, weil die Zersetzung von Biomasse im Gleichgewicht mit der Bildung neuer Biomasse steht. (Neumann-Silkow, 2006)

6 Bilanzierung von Kläranlagen

6.1 Festlegung der Systemgrenzen und des Prozessnetzes

In dieser Untersuchung werden kommunale Kläranlagen zur Behandlung von häuslichem Schmutzwasser bilanziert. Industrielle Einleiter werden lediglich durch entsprechende Einwohnergleichwerte berücksichtigt.

Die Systemgrenzen zur CF-Bilanzierung einer kommunalen Kläranlage werden eindeutig auf die ökologisch-klimatischen Auswirkungen der Abwasserreinigung festgelegt. Soziale sowie ökonomische Aspekte werden hierbei nicht berücksichtigt. In Abbildung 6-1 sind die Systemgrenzen schematisch dargestellt. Eingangspunkt der Bilanzhülle ist die Übernahme des Wassers einschließlich aller enthaltenen Frachten am Zulaufbauwerk. Grenze der Bilanzhülle bezüglich des Wasserpfades ist die Übergabe des Wassers im Ablauf an den Vorfluter. Emissionen außerhalb dieser Übergabepunkte (Kanalisation, Gewässer) werden für den Bilanzraum Kläranlage nicht berücksichtigt. Alle Prozesse innerhalb des Bilanzraumes werden gewichtet und in der CF-Bilanz berücksichtigt. Hierzu zählen alle direkten Emissionen aus den Reinigungsstufen und der Schlammbehandlung sowie der Klärgasverbrennung und Faulschlamm Entsorgung. Weiterhin werden als indirekte Emissionen der Verbrauch an fossilen Energieträgern in Form von elektrischer Energie sowie Primärenergieträgern berücksichtigt. Ebenfalls zu den indirekten Emissionen wird der Verbrauch an Betriebsmitteln wie Fäll- und Flockungsmitteln sowie weiterer Verbrauchsmaterialien berücksichtigt.

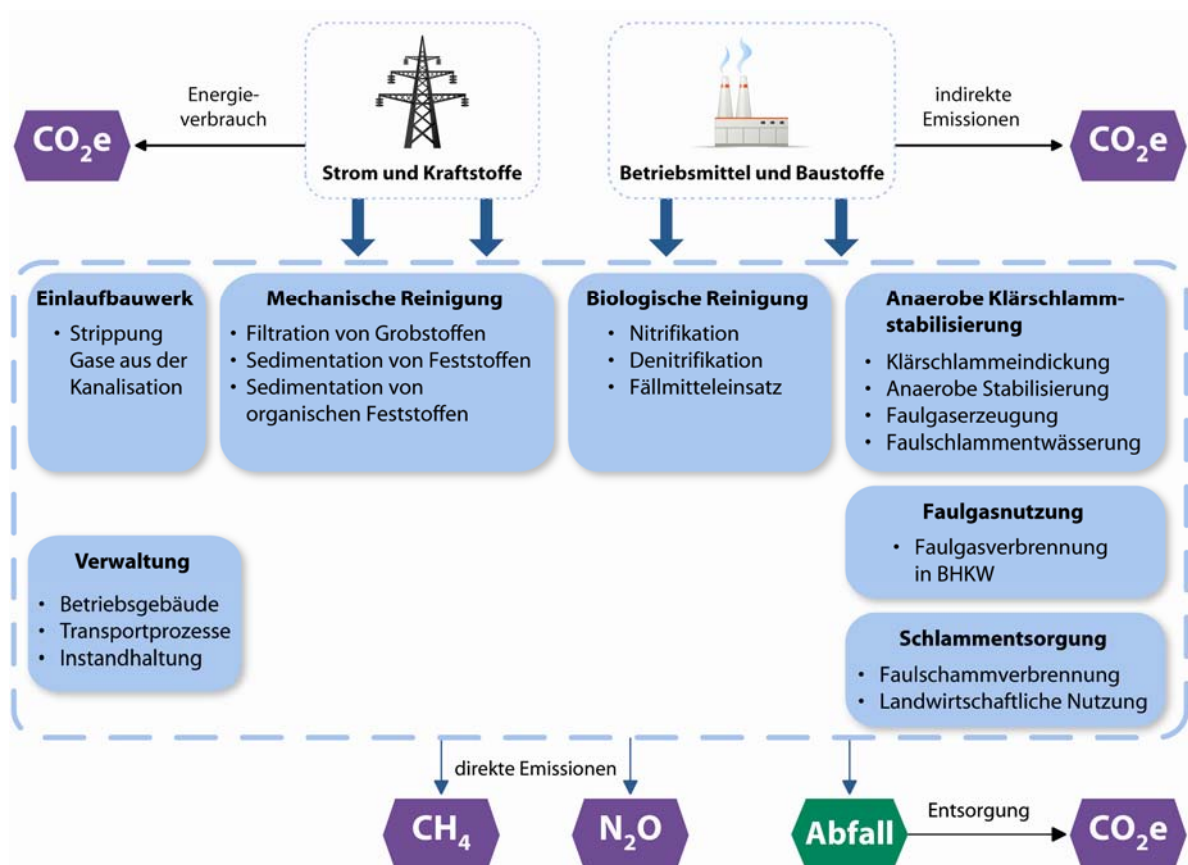


Abbildung 6-1: Systemgrenzen zur Ermittlung des Carbon Footprint einer kommunalen Kläranlage

6.2 Identifizierung der Energie- und Stoffströme sowie der Emissionsquellen

6.2.1 Mechanische Reinigung

Das Einlaufbauwerk ist die Übernahmestelle des Abwassers an der Systemgrenze der Kläranlage. Der CF des Einlaufbauwerkes setzt sich aus dem Stromverbrauch eingesetzter Pumpwerke, zumeist Schneckenpumpen, sowie ausstrippenden Gasen zusammen. Bei den Treibhausgasen handelt es sich um CH_4 und N_2O welche durch biologische Prozesse bereits in der Kanalisation gebildet wurden und durch vorherrschende Strömungsverhältnisse an die Atmosphäre abgegeben werden.

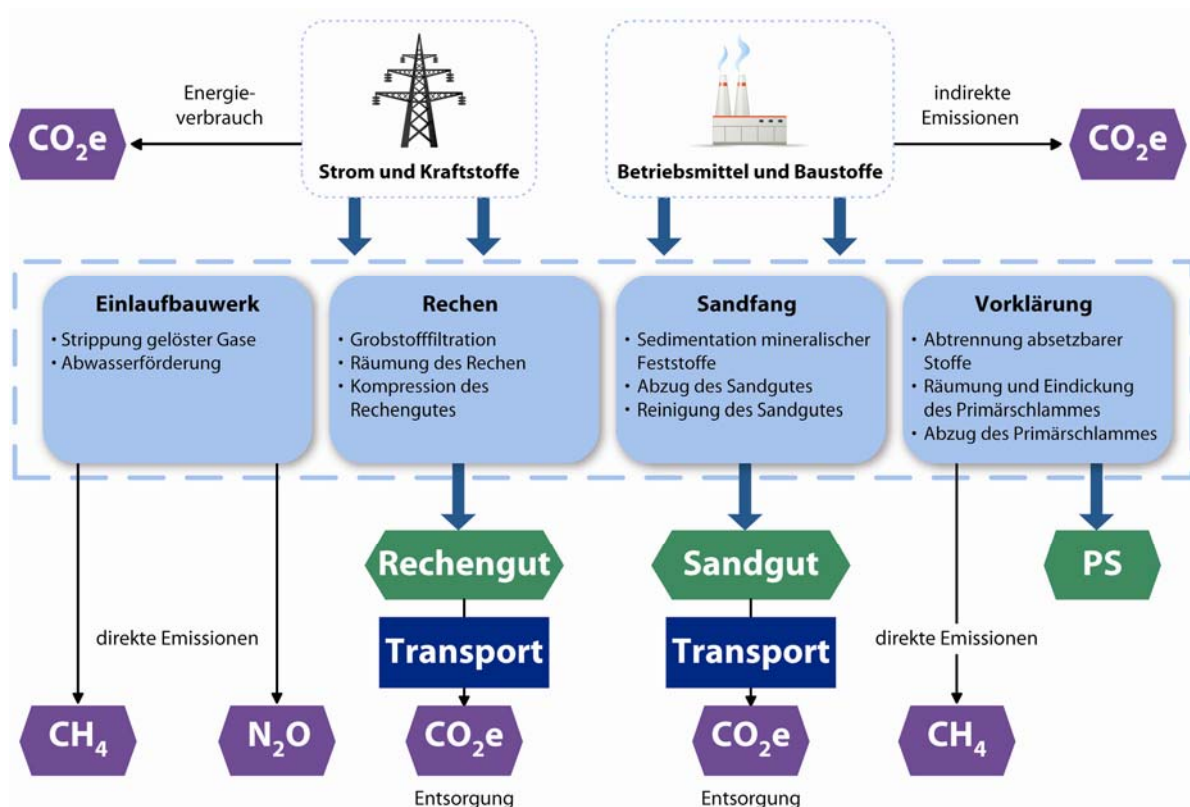


Abbildung 6-2: Systemgrenzen der mechanische Reinigung

Die allgemeine CF-Bilanz des Einlaufbauwerkes ist in Gl. (6-1) gezeigt.

$$CF_{EB} = \text{Energie} \cdot EF(\text{Strom}) + E_{\text{CH}_4} f(Q_s, c_{\text{CH}_4}) + E_{\text{N}_2\text{O}} f(Q_s, c_{\text{N}_2\text{O}}) \quad \text{Gl. (6-1)}$$

mit:

- Energie:** Energieverbrauch im Prozessabschnitt [kWh]
- EF(Strom):** Emissionsfaktor Strom [$\text{kg CO}_2 / \text{kWh}$]
- E_{Gas} :** Gas-Emissionen [kg]
- $f(1..n)$:** Funktionelle Abhängigkeit von n Parametern
- Q_s :** Schmutzwasservolumenstrom [m^3/d]
- c_{Gas} :** Gaskonzentration im Zulauf [g/m^3]

Rechen

In der Verfahrensstufe des Rechens werden die groben Abwasserinhaltsstoffe mittels Filtration abgeschieden. In der CF-Bilanz werden die zum Betrieb des Rechens benötigte elektrische Energie sowie die Entsorgung des anfallenden Rechengutes berücksichtigt. Bei der Entsorgung entstehende Emissionen setzen sich aus dem Transport des Rechengutes von der Kläranlage zur Verbrennungsanlage sowie der Verbrennung zusammen (s. Gl. (6-2)).

$$\begin{aligned}
CF_R = & \text{Energie} \cdot EF(\text{Strom}) \\
& + \text{Transport } f(m_{RG}, km, LKW) EF(\text{Treibstoff}) \\
& + E_{CH_4} f(m_{RG}, \text{Zusammensetzung}) \\
& + E_{N_2O} f(m_{RG}, \text{Zusammensetzung}) \\
& + E_{CO_2} f(m_{RG}, \text{Zusammensetzung})
\end{aligned}
\quad \text{Gl. (6-2)}$$

mit:

Energie: Energieverbrauch im Prozessabschnitt [kWh]

EF(Strom): Emissionsfaktor Strom [kg CO₂ /kWh]

Transport: CO₂-Emissionen aus Transport [kg]

m_{RG}: Masse des Rechengutes [kg]

km: Fahrleistung Transport [km]

LKW: LKW-Typ

EF(Treibstoff): Emissionsfaktor Treibstoff [kg CO₂/L]

f(1..n): Funktionelle Abhängigkeit von n Parametern

Zusammensetzung: Zusammensetzung des Rechengutes

Sandfang

In der Behandlung des Abwassers im Sandfang werden partikuläre Substanzen des Abwassers sedimentiert. In der CF-Bilanz wird die benötigte Energie für den Betrieb des Sandfangs und anschließende Behandlung sowie der Transport des Sandgutes berücksichtigt s. Gl. (6-3).

$$\begin{aligned}
CF_{SF} = & \text{Energie} \cdot EF(\text{Strom}) \\
& + \text{Transport } f(m_{RG}, km, LKW) EF(\text{Treibstoff})
\end{aligned}
\quad \text{Gl. (6-3)}$$

Vorklärung

Während der Behandlung des Abwassers in der Vorklärung werden die absetzbaren organischen Substanzen des Abwassers sedimentiert. In der CF-Bilanz wird die benötigte Energie für den Betrieb der Vorklärung und der Förderung des Primärschlammes berücksichtigt. Weiterhin können bedingt durch die organischen Frachten und das anoxische Milieu direkte Emissionen in Form von CH₄ gebildet werden. s. Gl. (6-4).

$$CF_{VK} = \text{Energie} \cdot EF(\text{Strom}) + E_{CH_4} f(Q_S, c_{CSB}, \text{BetriebVK}) \quad \text{Gl. (6-4)}$$

Mit: c_{CSB} : CSB-Konzentration [mg/L]

Betrieb VK: Betriebsweise der Vorklärung

6.2.2 Biologische Reinigung

Bei der Bilanzierung der biologischen Reinigung wird der elektrische Energiebedarf der zugeordneten Aggregate berücksichtigt. Ebenfalls berücksichtigt werden Betriebsmittel wie beispielsweise Fällmittel zur Phosphorelimination. Abhängig von den Betriebsbedingungen können direkte Emissionen durch die Bildung von N_2O entstehen und werden in der CF Bilanz des Belebungsbeckens berücksichtigt.

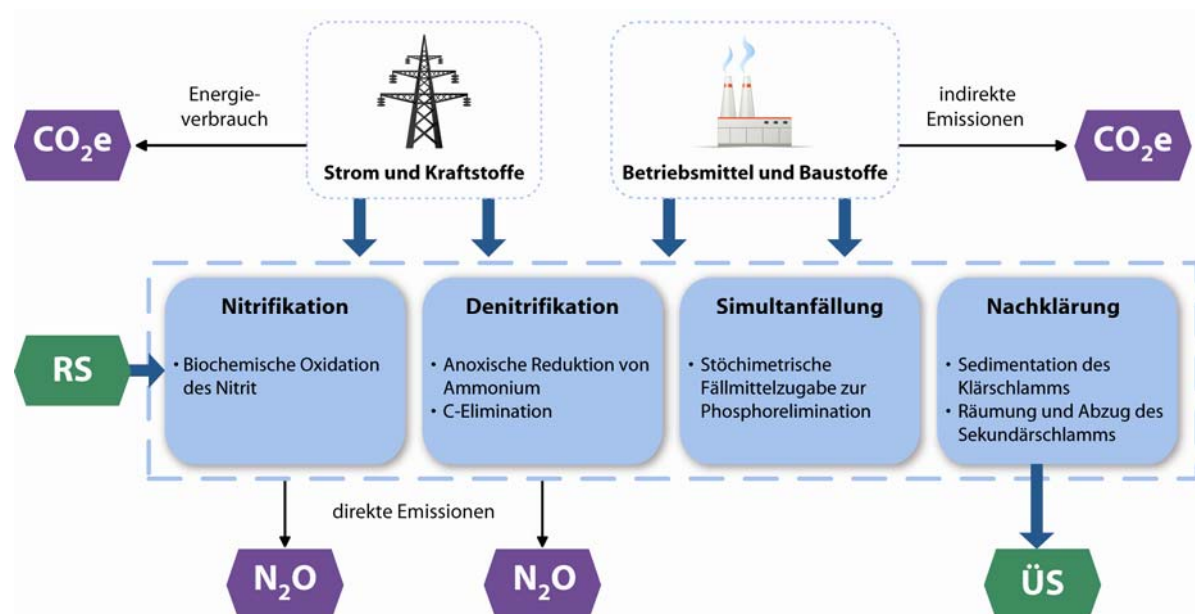


Abbildung 6-3: Systemgrenzen der biologische Reinigung

$$CF_{BB} = \text{Energie} \cdot EF(\text{Strom}) + \text{Chemikalien} \cdot f(P) \cdot EF(\text{Chemikalien}) + E_{N_2O, deni} f(Q_S, c_N, c_{CSB}, c_{O_2}, c_{Inh} \text{BetriebBB}) + E_{N_2O, ntri} f(Q_S, c_N, c_{CSB}, c_{O_2}, c_{Inh} \text{BetriebBB}) \quad \text{Gl. (6-5)}$$

Mit: P: Phosphormassenstrom [kg/d]

c_N : Stickstoffkonzentration [mg/L]

c_{O_2} : Sauerstoffkonzentration [mg/L]

c_{Inh} : Konzentration von Inhibitoren (z.B. Sulfid) [mg/L]

Betrieb BB: Betriebsweise der der Belebung

Nachklärbecken

Es wird angesetzt, dass das gereinigte Abwasser in der Nachklärung keine direkten Emissionen mehr verursacht. Daher ergibt sich für diese Prozessstufe der CF aus dem Verbrauch an elektrischer Energie.

$$CF_{NK} = \text{Energie} \cdot EF(\text{Strom}) \quad \text{Gl. (6-6)}$$

6.2.3 Schlammfäulung

Bei der anaeroben Klärschlammstabilisierung ist insbesondere die Emission von CH_4 kritisch zu bewerten. Bilanzielle Quellen sind offen ausgeführte Eindicker, Faulgasverluste während der Fermentation sowie in geringem Maße bei der Entwässerung. Indirekte Emissionen werden durch den elektrischen Energiebedarf sowie den Einsatz von Konditionierungsmitteln zur Schlammmentwässerung erfasst.

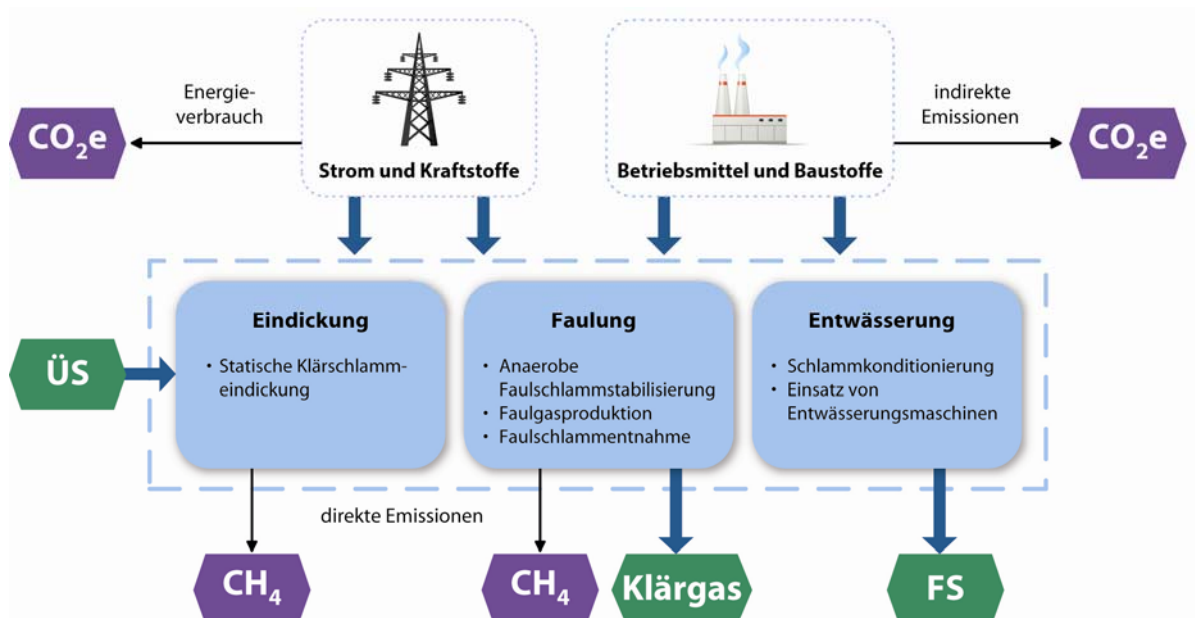


Abbildung 6-4: Bilanzierung Klärschlammfäulung

$$CF_{SF} = \text{Energie} \cdot EF(\text{Strom}, \text{Gas}) + \text{Chemikalien} \cdot f(Q_{\text{Schlamm}}, TS) \cdot EF(\text{Chemikalien}) + E_{\text{CH}_4, \text{ED}} f(Q_{\text{Schlamm}}, TS, t) \quad \text{Gl. (6-7)}$$

Faulgasnutzung

Bei der energetischen Nutzung des Faulgases im BHKW kann es zu einem Methanschlußpf kommen. Hierbei verlässt ein Teil des CH_4 das BHKW im Abgasstrom und gelangt so in die Atmosphäre.

$$CF_{KG} = \text{Energie} \cdot EF(\text{Strom}) + E_{\text{CH}_4} f(\dot{m}_{\text{Gas}}, c_{\text{CH}_4}) \quad \text{Gl. (6-8)}$$

Faulschlamm Entsorgung

Sowohl bei der landwirtschaftlichen als auch bei der thermischen Entsorgung entstehen Emissionen, welche in der CF-Bilanz berücksichtigt werden müssen. Hierzu gehören die transportbedingten Emissionen sowie direkte Emissionen bedingt durch die Nutzung (vgl. Kapitel 5.2.3.4 und 5.2.3.3).

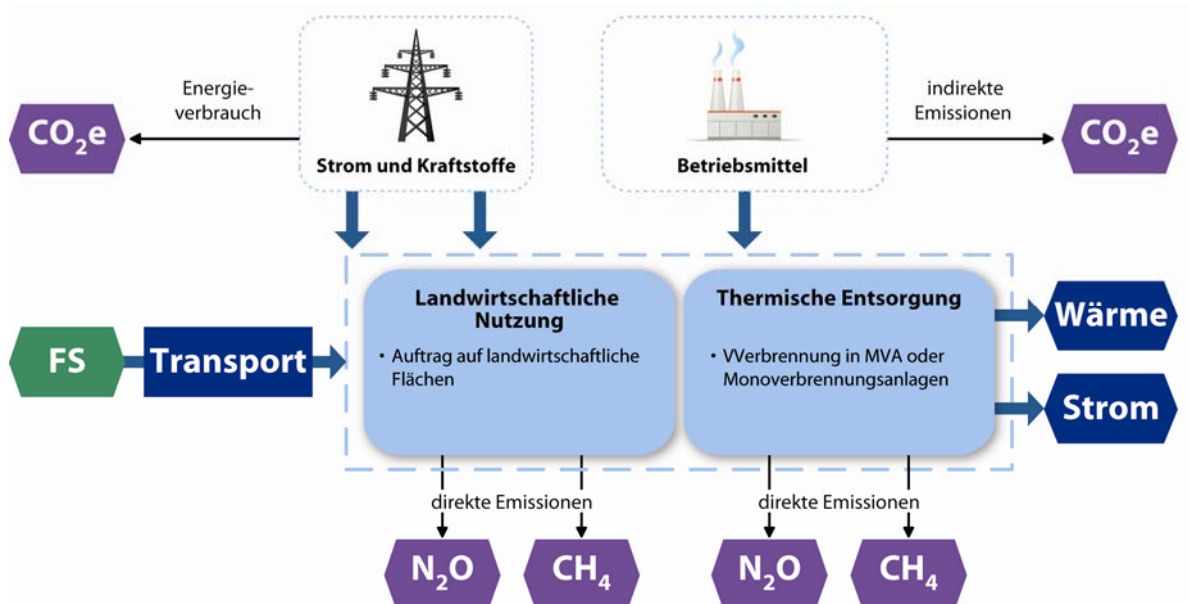


Abbildung 6-5: Bilanz Faulschlamm Entsorgung

6.3 Bilanzierung von Musterkläranlagen

Zur Abschätzung des Einflusses einzelner Prozessstufen auf den CF wurden modellhaft Musterkläranlagen berechnet. Hierzu wurden eine Kläranlage mit simultan aerober Schlammstabilisierung (10.000 EW) sowie eine Kläranlage mit anaerober Klärschlammstabilisierung (100.000 EW) nach den Bemessungsrichtlinien des DWA-Arbeitsblattes A-131 (ATV-DVWK, 2000) berechnet. Für die Bestimmung des theoretischen Energiebedarfes der einzelnen Anlagenkomponenten wurde auf die energetischen Werte des Energiehandbuchs NRW (Müller, Kobel *et al.*, 1999) zurückgegriffen. Die Bewertung aller erfassten Prozesse in der CF-Bilanz erfolgte anhand der, in Kapitel 5.2 dargestellten, Emissionsfaktoren aus der Literatur.

6.3.1 Carbon Footprint einer kommunalen 10.000 EW Beispielkläranlage

Das Verfahrensfließbild der kommunalen Beispielkläranlage mit dem Reinigungsziel der simultan aeroben Schlammstabilisierung ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Über eine Schneckenpumpe wird das Abwasser aus dem Zulauf in die mechanische Reinigungsstufe (Rechen, Sand- und Fettfang) gefördert. Die Belebungsstufe wurde mit vorgeschalteter Denitrifikation berechnet. Der aerob stabilisierte Überschussschlamm wird voreingedickt und in einem Dekanter entwässert. Die detaillierte Bemessungsberechnung der Modellanlage befindet sich im Anhang dieses Berichtes.

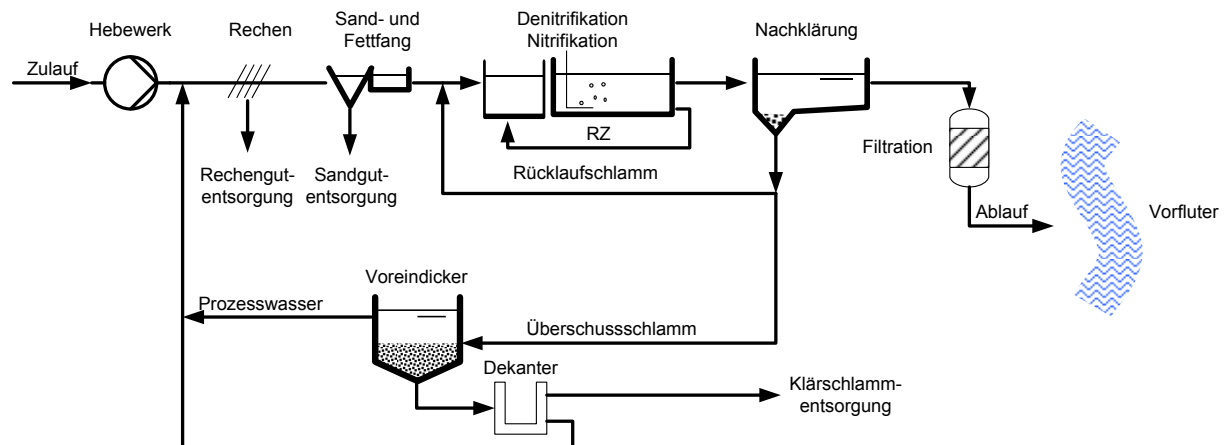


Abbildung 6-6: Verfahrensfließbild der Modellkläranlage mit aerober Klärschlammstabilisierung (10.000 EW)

In der Tabelle 6-1 sind alle bilanzierten Emissionsquellen der 10.000 EW Modellanlage dargestellt. Aufgeführt sind die Emissionen welche, durch den Verbrauch elektrischer Energie, direkt während des Betriebes sowie indirekt durch Materialeinsatz und Verwaltung emittiert werden. Die Gesamtemissionen der Modellanlage liegen bei 704 Tonnen CO₂ pro Jahr. Bezogen auf den angeschlossenen Einwohner entspricht dieser Wert einer Emission von 70 kg CO₂ pro Einwohner und Jahr. Dies entspricht im Vergleich etwa einer PKW-Fahrt von 350 km in einem Mittelklassewagen.

Tabelle 6-1: CF-Bilanz einer 10.000 EW Modellkläranlage

TREIBHAUSGAS-EMISSIONSQUELLEN	Energie	CO ₂		CH ₄		N ₂ O		Brutto Emissionen	
	kWh/a	t/a	kg/EW*a	t/a	kg/EW*a	t/a	kg/EW*a	t CO ₂ -e /a	kg CO ₂ -e /EW*a
1. Energie	444.336,29	255,49	25,55					255,49	25,55
A. Abwasserbehandlung	400.455	230,26	23,03						
1. Hebewerk Zulauf	16.425	9,44	0,94						
2. Rechenanlage	657	0,38	0,04						
3. Sandfang	21.170	12,17	1,22						
4. Belüftung Belebung	137.595	79,12	7,91						
5. Umwälzung	52.072	29,94	2,99						
6. Rücklaufschlammumpwerk	4.668	2,68	0,27						
7. Interner Recycle	51.739	29,75	2,97						
8. Überschussschlammumpwerk	683	0,39	0,04						
9. Simultanfällung	329	0,19	0,02						
10. Nachklärbecken	76.298	43,87	4,39						
11. Flockungsfiltration	38.819	22,32	2,23						
B. Schlammbehandlung	20.285	11,66	1,17						
1. Eindickung	7.300	4,20	0,42						
2. Schlammentwässerung	12.985	7,47	0,75						
2. Direkte Emissionen									
A. Abwasserbehandlung				3,07	0,31	0,63	0,06	264,67	26,47
1. Mechanische Reinigung									
2. Belebung									
B. Schlammbehandlung				0,49	0,05			12,35	1,24
1. Eindicker				0,38	0,04				
2. Entwässerung				0,11	0,01				
C. Energetische Nutzung									
1. Klärschlammverbrennung				0,15	0,01	0,38	0,04	116,44	11,64
3. Indirekte Emissionen									
A. Betriebsmittel		20,66	2,07					20,66	2,07
1. Fällmittel FeSO ₄	13.208 kg/a	17	1,72						
2. Flockungshilfsmittel	3.035 kg/a	3	0,35						
B. Verwaltung		31,78	3,18					34,96	3,18
1. Betrieb	53.655 kWh/a	30,85	3,09						
2. Kraftstoff	293 L/a	0,93	0,09						
Summe								704,58	70,14

Die prozentuale Verteilung der Emissionen ist in Abbildung 6-7 dargestellt. Es wird deutlich, dass mit den hier zugrunde gelegten Emissionsfaktoren die direkten Emissionen aus der Abwasserreinigung nahezu das gleiche Schadpotential, wie der elektrische Energieverbrauch aufweisen. Akkumuliert mit der Schlammbehandlung und Verbrennung weisen die direkten Emissionen mit 57 % sogar mehr als die Hälfte der Gesamtemissionen auf. Die Emissionen aus Verwaltung, Transportprozessen und dem Einsatz von Betriebsmitteln haben erwartungsgemäß mit 4 % bzw. 3 % einen sehr geringeren Anteil am gesamt CF.

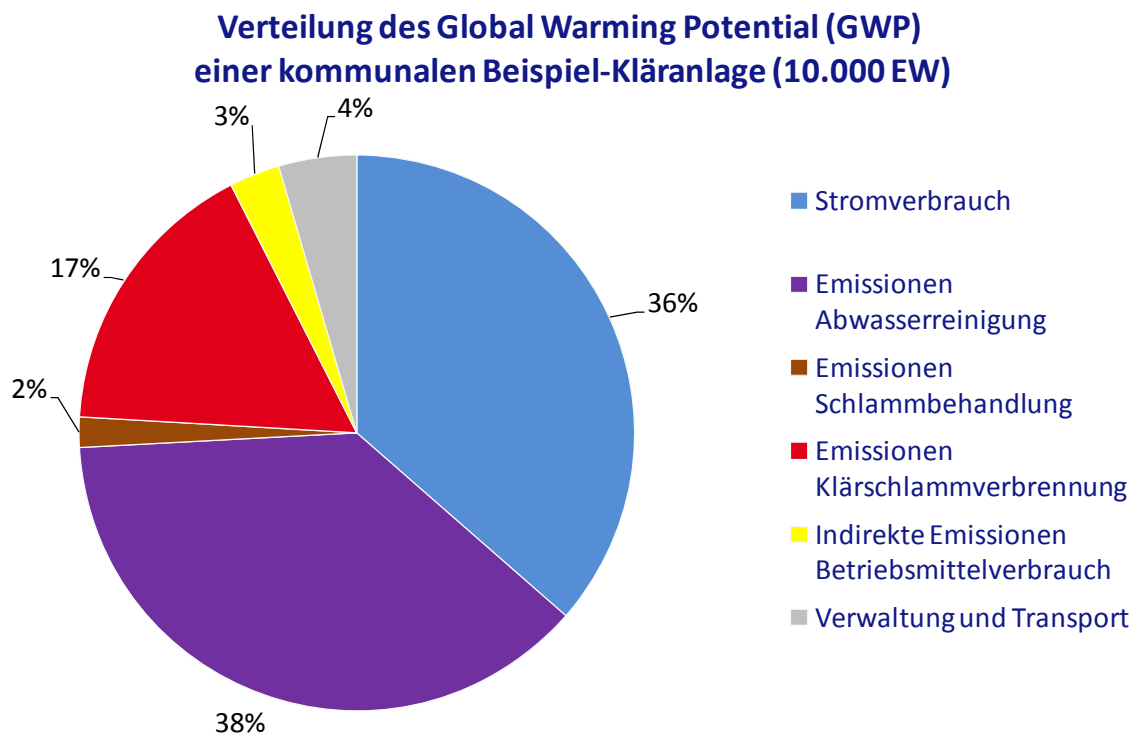


Abbildung 6-7: GWP-Verteilung einer kommunalen Beispiel-Kläranlage (10.000 EW)

6.3.2 Carbon Footprint einer kommunalen 100.000 EW Beispielkläranlage

Das Verfahrensfließbild der kommunalen Beispielkläranlage mit anaerober Schlammstabilisierung ist in Abbildung 6-8 dargestellt. Über eine Schneckenpumpe wird das Abwasser aus dem Zulauf in die mechanische Reinigungsstufe (Rechen, Sand- und Fettfang, Vorklärbecken) gefördert. Die Belebungsstufe wurde mit vorgeschalteter Denitrifikation berechnet. Der Primärschlamm aus der Vorklärung sowie der Überschussschlamm werden voreingedickt und in einem anaeroben Fermenter (Faulbehälter) anaerob stabilisiert. Der stabilisierte Faulschlamm wird in einem Nacheindicker vorentwässert und anschließend im Dekanter restentwässert. Die detaillierte Bemessungsberechnung der Modellanlage befindet sich im Anhang dieses Berichtes.

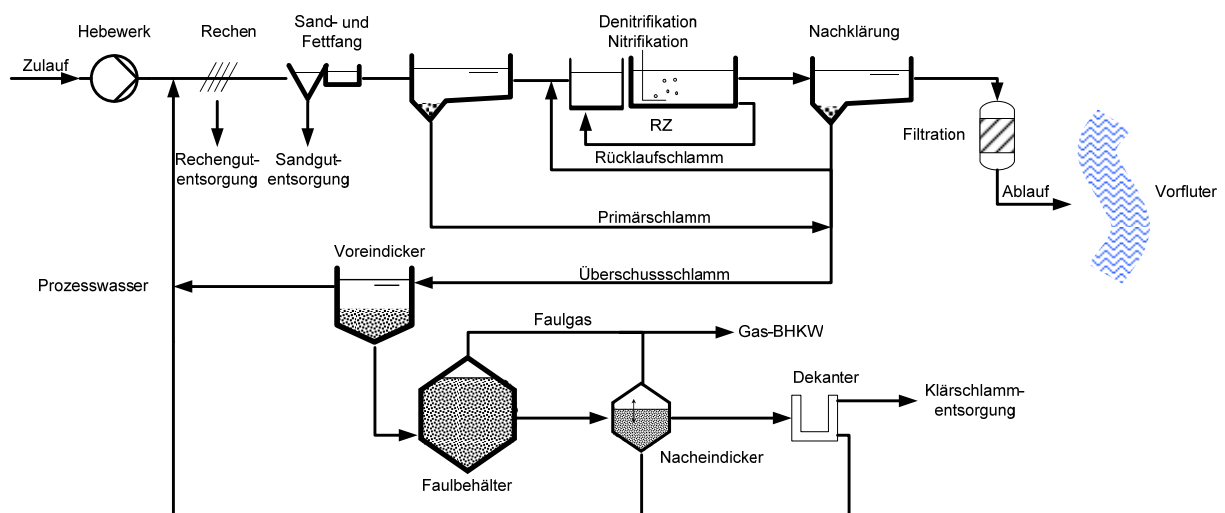


Abbildung 6-8: Verfahrensfließbild der Modellkläranlage mit anaerober Klärschlammstabilisierung (100.000 EW)

In der Tabelle 6-2 sind alle bilanzierten Emissionsquellen der 100.000 EW Modellanlage dargestellt. Aufgeführt sind die Emissionen, welche durch den Verbrauch elektrischer Energie, direkt während des Betriebes, sowie indirekt durch Materialeinsatz und Verwaltung emittiert werden. Die Gesamtemissionen der Modellanlage liegen bei 6.003 Tonnen CO₂ pro Jahr. Bezogen auf den angeschlossenen Einwohner entspricht dieser Wert einer Emission von 60 kg CO₂ pro Einwohner und Jahr. Dies entspricht im Vergleich etwa einer PKW-Fahrt von 300 km in einem Mittelklassewagen. Im Vergleich zu der 10.000 EW Modellanlage ist dieser spezifische Emissionswert um 15 % geringer. Dies ist zum einen auf den spezifisch geringeren Energieverbrauch größerer Kläranlagen sowie die Eigenenergieversorgung durch Faulgas-BHKW zurückzuführen.

Tabelle 6-2: CF-Bilanz einer 100.000 EW Modellkläranlage

TREIBHAUSGAS-EMISSIONSQUELLEN	Energie	CO ₂		CH ₄		N ₂ O		Brutto Emissionen	
	kWh/a	t/a	kg/EW*a	t/a	kg/EW*a	t/a	kg/EW*a	t CO ₂ -e /a	kg CO ₂ -e /EW*a
1. Energie	2.834.645,13	1.629,92	16,30					1.629,92	16,30
A. Abwasserbehandlung	2.390.452	1.374,51	13,75						
1. Hebewerk Zulauf	88.695	51,00	0,51						
2. Primärschlammumpwerk	157.680	90,67	0,91						
3. Vorklärbecken	10.214	5,87	0,06						
4. Rechenanlage	6.570	3,78	0,04						
5. Sandfang	48.918	28,13	0,28						
6. Belüftung Belebung	1.535.395	882,85	8,83						
7. Umwelzung	236.520	136,00	1,36						
8. Rücklaufschlammumpwerk	46.682	26,84	0,27						
9. Interner Recycle	51.739	29,75	0,30						
10. Überschussschlammumpwerk	4.110	2,36	0,02						
11. Simultanfällung	3.285	1,89	0,02						
12. Nachklärbecken	161.825	93,05	0,93						
13. Flockungsfiltration	38.819	22,32	0,22						
B. Schlammbehandlung	314.455	180,81	1,81						
1. Grobstoffentfernung	2.129	1,22	0,01						
2. Voreindickung	7.300	4,20	0,04						
3. ÜS-Eindickung	73.638	42,34	0,42						
4. Faulschlammmentwässerung	121.888	70,09	0,70						
5. Faulbehälter	109.500	62,96	0,63						
2. Direkte Emissionen									
A. Abwasserbehandlung				23,00	0,23	6,31	0,06	2.455,04	24,55
1. Vorklärbecken									
2. Belebung									
B. Schlammbehandlung				36,15	0,36			903,64	9,04
1. Eindicker				3,56	0,04				
2. Faulbehälter				31,83	0,32				
3. Schlammmentwässerung				0,75	0,01				
C. Energetische Nutzung									
1. Klärschlammverbrennung				0,95	0,01	2,48	0,02	762,90	7,63
2. Faulgasverbrennung (BHKW)				0,09	0,001	0,002	0,00	2,63	0,03
3. Gutschrift Faulgasverbrennung (BHKW)	1.487.777	855	8,55					- 855	- 8,55
3. Indirekte Emissionen									
A. Betriebsmittel		497,77	4,98					497,77	4,98
1. Fällmittel FeSO ₄	159.460 kg/a	207	2,07						
2. Flockungshilfsmittel	12.640 kg/a	15	0,15						
4. Aktivkohle	98.550 kg/a	276	2,76						
B. Verwaltung		100,19	1,00					101,20	1,00
1. Betrieb	158.045 kWh/a	90,88	0,91						
2. Kraftstoff	2.931 L/a	9,32	0,09						
Summe								5.497,63	54,97

Die prozentuale Verteilung der Emissionen ist in Abbildung 6-9 dargestellt. Äquivalent zu der oben betrachteten 10.000 EW Modellanlage resultiert aus dem elektrischen Energiebezug nur ein geringer Anteil (14 %) am Gesamt CF. Akkumuliert mit der Schlammbehandlung und Verbrennung weisen die direkten Emissionen 74 % der Gesamtemissionen auf. Die Emissionen aus Verwaltung, Transportprozessen und dem Einsatz von Betriebsmitteln haben erwartungsgemäß mit 4 % bzw. 3 % einen eher geringeren Anteil am Gesamt-CF.

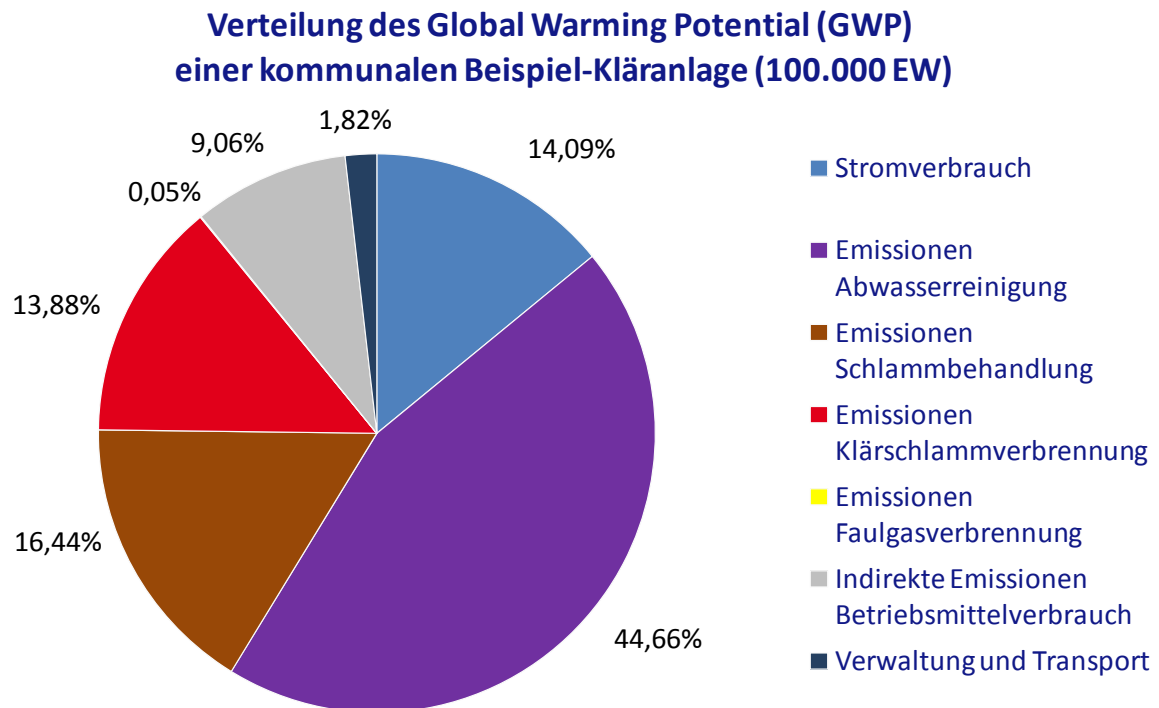


Abbildung 6-9: GWP-Verteilung einer kommunalen Beispiel-Kläranlage (100.000 EW)

Die Sensitivität der CO₂-Bilanz allein auf die N₂O-Emissionen wird deutlich, wenn der Emissionsfaktor der Niederländischen Richtlinie des VROM mit der Schwankungsbreite aktueller Messungen verglichen wird. Geringe N₂O-Emissionen (0,04 % des TKN) senken den CF der Modellkläranlage um 33 % bzw. 1.800 t CO₂ pro Jahr. Wird die N₂O-Bildung jedoch begünstigt, hier als Beispiel mit 6,1 % des TKN, steigt der CF um 9.700 t CO₂ pro Jahr. Dies entspricht einer Erhöhung der Gesamtemissionen um den Faktor 2,7 (Abbildung 6-10). Folglich ist die Betriebsweise und somit die CF optimierte Steuerung bedeutender als allgemein angenommen. Entsprechender Forschungsbedarf ergibt sich daher noch, um betriebsbedingte Einflüsse in den Emissionsfaktoren zu berücksichtigen.

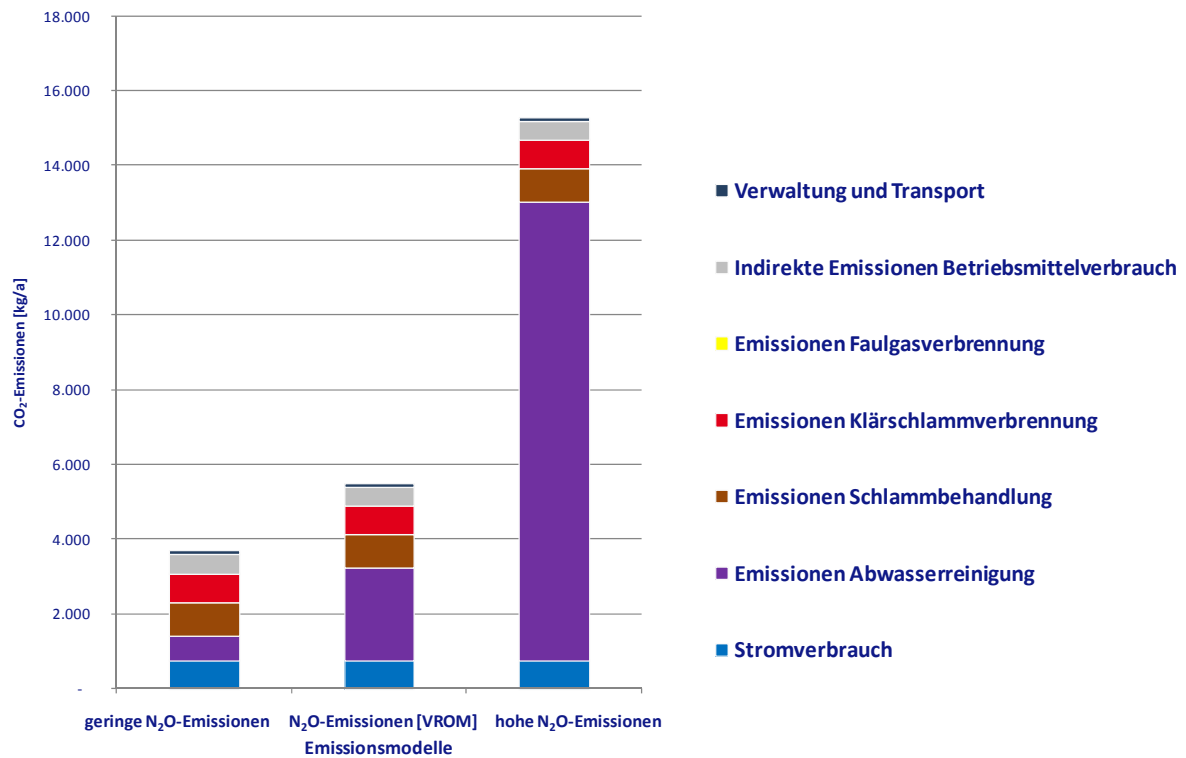


Abbildung 6-10: Vergleich unterschiedlicher N₂O-Emissionsfaktoren auf den Carbon Footprint einer kommunalen Modellkläranlage

7 Bilanzierung der Trinkwasserversorgung

7.1 Festlegung der Systemgrenzen und des Prozessnetzes

Zum System Wasserversorgung gehören die Prozesse Wassergewinnung, Wasseraufbereitung und Wasserverteilung. Wassergewinnung und -aufbereitung bilden laut DIN 4046 die Betriebseinheit Wasserwerk, „die aus Anlagen zur Gewinnung, Aufbereitung, Förderung und Speicherung von Wasser bestehen kann“ (Abbildung 7-1). Die Förderung im Wasserwerk umfasst nur die Pumpen vor den Reinwasserpumpen (Gewinnungsanlagen und Zwischenpumpen) (DVGW, 2010).

Die Wassergewinnung beginnt mit dem Eintritt des Wassers in die Fassungsanlage und endet am Eingang zur Wasseraufbereitung (Schieber in der Rohwasserleitung). Die Wasseraufbereitung umfasst alle Anlagen zur Reinigung bzw. Behandlung des Wassers, mit denen die geforderte Qualität erreicht werden soll, sowie die Pumpen dazwischen und die Abwasserbehandlung. Sie beginnt am Schieber in der Rohwasserleitung und endet laut DVGW (2010) am Eingang des Reinwasserbehälters, sofern dort keine Nachbehandlung stattfindet. Sollte kein Reinwasserbehälter vorhanden sein, endet die Aufbereitung am Eingang zu den Reinwasserpumpen. Für die Bilanzierung des Carbon Footprint wird der Reinwasserbehälter der Wasseraufbereitung zugeordnet, so dass die Systemgrenze einheitlich am Eingang zu den Reinwasserpumpen liegt. Da der Anteil am CF, der auf die Wasserverteilung entfällt, fast ausschließlich durch den Energiebedarf für die Wasserförderung verursacht wird, gibt es keinen Grund, diese separat zu bilanzieren. Der Prozess der Verteilung wird deshalb zunächst ebenfalls dem System Trinkwasserversorgung zugeordnet. Die Wassernutzung wird nicht in die Bilanzierung einbezogen.

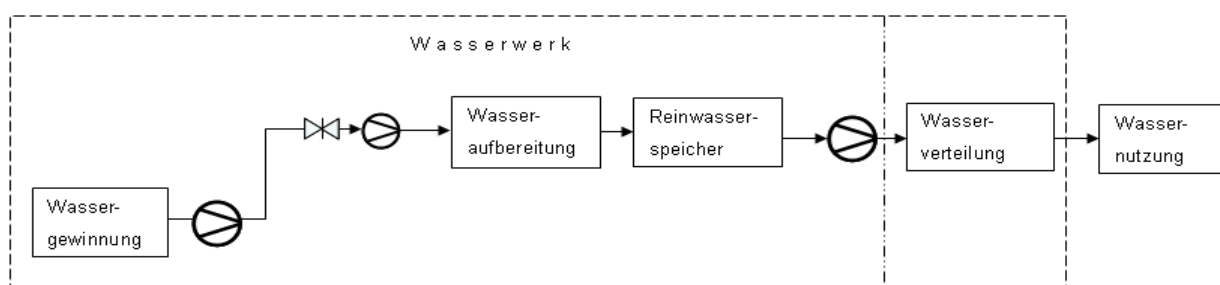


Abbildung 7-1: Systemgrenze Trinkwasserversorgung

Für die in Abbildung 7-1 genannten Prozesse, die zum Untersuchungsraum Trinkwasserversorgung gehören, sind die zugehörigen Teilprozesse, für die dann nachfolgend alle Input- und Output-Ströme ermittelt werden müssen, festzulegen. Dieser Schritt ist sinnvoll und notwendig, um einerseits ein vollständiges und detailliertes Abbild des

Systems zu erhalten sowie andererseits Einsparpotentiale aufzeigen und eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Anlagen gewährleisten zu können.

Die Teilprozesse der Wassergewinnung sind der Betrieb und die Instandhaltung von:

- Brunnen, Entnahmebauwerke
- Anreicherungsbecken
- Pumpen

Der Energiebedarf der Gewinnungs-Pumpen wird dabei nicht vollständig der Wassergewinnung zugeteilt. Der Anteil des Pumpendruckes, der am Eingang zum Wasserwerk noch zur Verfügung steht, um das Wasser durch die Aufbereitungsanlagen zu fördern, wird entsprechend der Wasseraufbereitung zugeordnet. Weiterhin sollte der Restdruck mit dem zugehörigen Energieverbrauch auf die einzelnen Aufbereitungsstufen aufgeteilt werden, genauso wie ggf. vorhandene Zwischenpumpen (DVGW, 2010).

Die Teilprozesse der Wasseraufbereitung sind alle Aufbereitungsstufen. Der Energiebedarf ergibt sich aus dem Bedarf für den Betrieb der einzelnen Anlagen und dem Förderenergiebedarf durch die jeweilige Aufbereitungsstufe. Wie bereits erwähnt, wird der Reinwasserspeicher am Ende der Aufbereitungsstrecke ebenfalls der Wasseraufbereitung zugeordnet.

Ob für das Verteilungsnetz eine Aufteilung in Teilprozesse durchführbar ist, muss bei der Datenerhebung an einer Pilotanlage geprüft werden. Grundsätzlich sind Betrieb und Instandhaltung aller Anlagen im Verteilungsnetz zu berücksichtigen:

- Rohrnetz
- Druckerhöhungs- und Druckminderungsanlagen
- Speicherbehälter

In Abbildung 7-2 wurden alle in der Wasserversorgung zu berücksichtigenden Teilprozesse noch einmal zusammengefasst dargestellt.

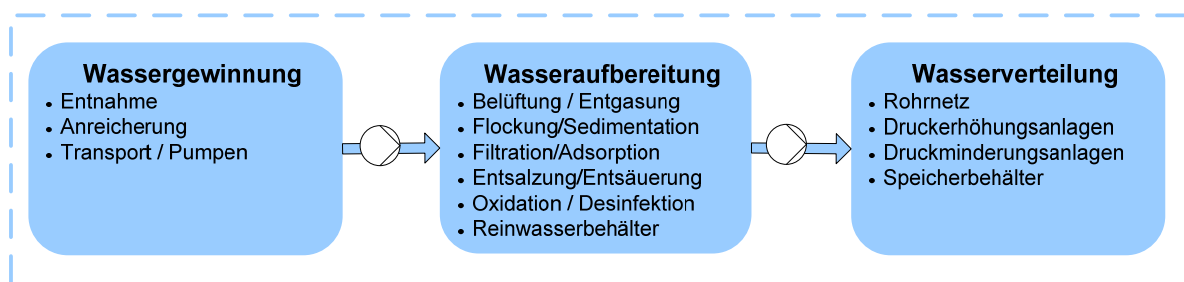


Abbildung 7-2: Teilprozesse der Trinkwasserversorgung

7.2 Emissionsquellen

Alle in die Teilprozesse einfließenden Material- und Energiemengen müssen nun gemeinsam mit Mitarbeitern aus dem jeweiligen Unternehmen festgestellt bzw. berechnet werden.

Dazu gehören in Trinkwasserversorgungsunternehmen vor allem:

- Strom
- Kraftstoffe (z. B. für Transporte)
- Betriebsmittel wie Chemikalien und andere Aufbereitungsstoffe
- Baustoffe (z.B. zur Reparatur / Instandhaltung)

Mit dieser Festlegung hat man im Grunde alle möglichen Quellen für indirekte Emissionen von Treibhausgasen identifiziert. Diese entstehen bspw. bei der Stromerzeugung im Kraftwerk oder bei der Herstellung der verbrauchten Betriebsmittel. Deshalb ist es notwendig, Angaben zu den Herstellern bzw. Lieferanten mit zu erfassen.

Darüber hinaus müssen Quellen für direkte Emissionen aufgezeigt werden. Das können bei der Trinkwassergewinnung methanhaltige Grundwässer sein. Diese können auch bei der Belüftung in der Wasseraufbereitung zu relevanten Methanemissionen führen. Ob CO₂-Emissionen bei der Belüftung ebenfalls in die Bilanzierung einzubeziehen sind, muss noch endgültig geklärt werden (siehe Kap. 5.3). Die Emissionsmengen entsprechen den Konzentrationen im Rohwasser. Gehört zur Wasseraufbereitung eine Ozonung, ist diese eine Quelle für direkte N₂O-Emissionen.

Weiterhin sind alle anfallenden Abfallmengen (Schlamm) zu erfassen und die Entsorgungswege zu verfolgen. Hier fallen ggf. Emissionen durch Transportprozesse an.

An dieser Stelle wird auch noch einmal darauf hingewiesen, dass neben den betrieblichen Prozessen im Wasserwerk auch alle Transportprozesse und die Betriebsgebäude zum Bilanzraum gehören.

In Abbildung 7-3 wurden die Stoff- und Energieströme sowie die möglichen Treibhausgasemissionen im System Trinkwasserversorgung schematisch zusammengefasst.

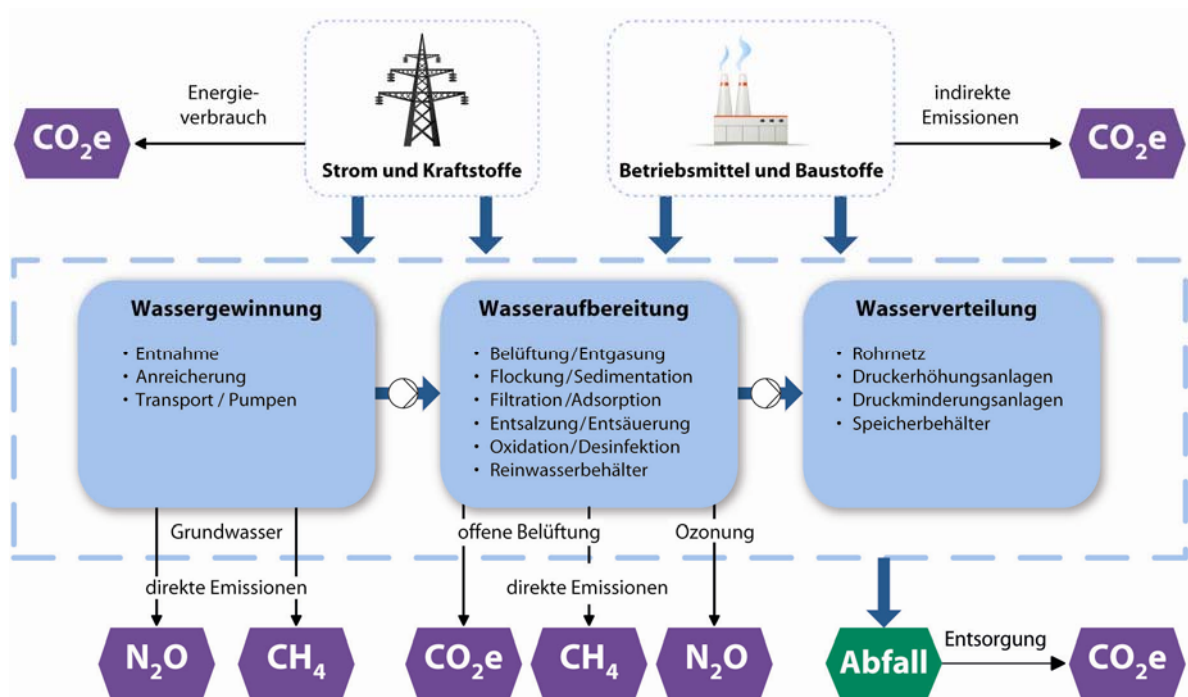


Abbildung 7-3: Systemgrenzen in der Wasserversorgung

7.3 Bilanzierung eines Musterwasserwerkes

Aufbauend auf den Erfahrungen und vorhandenen Daten am IWW wurde die Bilanzierung der Stoff- und Energieströme für ein Musterwasserwerk durchgeführt und der CF für die einzelnen Prozesse abgeschätzt.

Das Musterwasserwerk kann folgendermaßen beschrieben werden:

- Wassergewinnung:
 - o Eisen- und Mangan haltiges Uferfiltrat, gespeist aus Fluss mit organischer Belastung
 - o Rohwasserförderung: 5.500.000 m³/a
- Wasseraufbereitung:
 - o geschlossene Belüftung
 - o geschlossene Schnellfiltration
 - o offene Belüftung
 - o offene Schnellfiltration
 - o Ozonung
 - o Aktivkohlefiltration
 - o NaOH-Dosierung

- o Chlorung (Dosierung von NaOCl)
 - o Speicherung im Reinwasserbehälter
- Wasserverteilung:
 - o insgesamt 5.280.000 m³/a Trinkwasser
 - o Versorgungsgebiet: Großstadt im Flachland (max. 70 m)
- weitere Prozesse:
 - o Schlammtransport
 - o Betriebsgebäude

Alle Material- und Energiemengen, die in diesem Wasserwerk benötigt werden, wurden auf der Grundlage einschlägiger Erfahrungen berechnet bzw. abgeschätzt. Der Energiebedarf für die Wasserverteilung wurde anhand von Ergebnissen aus Benchmarking-Projekten gemittelt. Eventuell im Wasserwerk bzw. im Verteilungsgebiet anfallende Transporte wurden nicht berücksichtigt, ausgenommen der Entsorgungstransport für den Schlamm.

Die so ermittelten Verbrauchsmengen wurden mit Emissionsfaktoren, die der Literatur entnommen wurden (siehe Anhang 14.1), multipliziert. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse ist Tabelle 7-1 zu entnehmen. Wie sich die Treibhausgasemissionen auf die Hauptprozesse der Trinkwasserversorgung verteilen, wurde in Abbildung 7-4 verdeutlicht.

Insgesamt wurde für das Muster-Wasserwerk ein CF von 319 g CO₂e / m³ Trinkwasser ermittelt. Erwartungsgemäß müsste der größte Anteil durch die Wasserverteilung verursacht werden. Im modellierten Muster-Wasserwerk ist der Energieverbrauch der Wasseraufbereitung aber fast genauso groß. Das kommt daher, dass eine recht umfangreiche Aufbereitung mit vielen Stufen und einem sehr energieintensiven Verfahren – der Ozonung – vorgesehen werden musste. Bei der Wasserverteilung könnte der Energiebedarf deutlich ansteigen, wenn größere Höhenunterschiede überwunden werden müssen.

Weiterhin wird deutlich, dass erhebliche Anteile der CO₂e-Emissionen durch die Regenerierung von Aktivkohle sowie direkter Art bei Belüftung und Ozonung verursacht werden.

Tabelle 7-1: Ergebnisse der CF-Bilanzierung für ein Musterwasserwerk

Treibhausgas-Emissionsquellen		Energieverbrauch	CO ₂		N ₂ O		Brutto-Emissionen	
	Verfahrensvariante	[kWh/a]	kg/a	g/m ³	kg/a	g/m ³	kg CO ₂ e/a	g CO ₂ e/m ³
1. Energie		2.168.470	1.246.870	227			1.246.870	236
A. Wassergewinnung	Uferfiltrat	215.000	123.625	22			123.625	23
B. Wasseraufbereitung		897.470	516.045	94			516.045	98
1. Enteisenung / Entmanganung	geschlossene Belüftung	101.861	58.570	11				
	geschlossene Schnellfiltration	92.182	53.005	10				
	offene Belüftung	136.011	78.206	14				
	offene Schnellfiltration	110.412	63.487	12				
2. Entfernung organischer Substanzen	Ozonung (O ₃ aus Luft)	297.963	171.328	31				
	Aktivkohlefiltration	104.847	60.287	11				
3. Stabilisierung	NaOH-Dosierung	4.194	2.411	0				
4. Desinfektion	Dosierung von NaOCl	0	0	0				
5. Reinwasserspeicherung		50.000	28.750	5				
C. Wasserverteilung		1.056.000	607.200	110			607.200	115
2. Direkte Emissionen							260.150	49
B. Wasseraufbereitung								
1. Belüftung/Entsäuerung			72.600	13			72.600	14
2. Ozonung	2,5 g O ₃ aus Luft				605	0,11	187.550	36
3. Indirekte Emissionen							174.897	33
A. Betriebsmittel								
NaOH							10.563	2
NaOCl		4.400	2.530	0,5			2.530	0,5
Aktivkohle							102.667	19
B. Schlammtransport			1.638	0,3			1.638	0,3
c. Betriebsgebäude		100.000	57.500	10			57.500	11
Summe							1.681.917	319

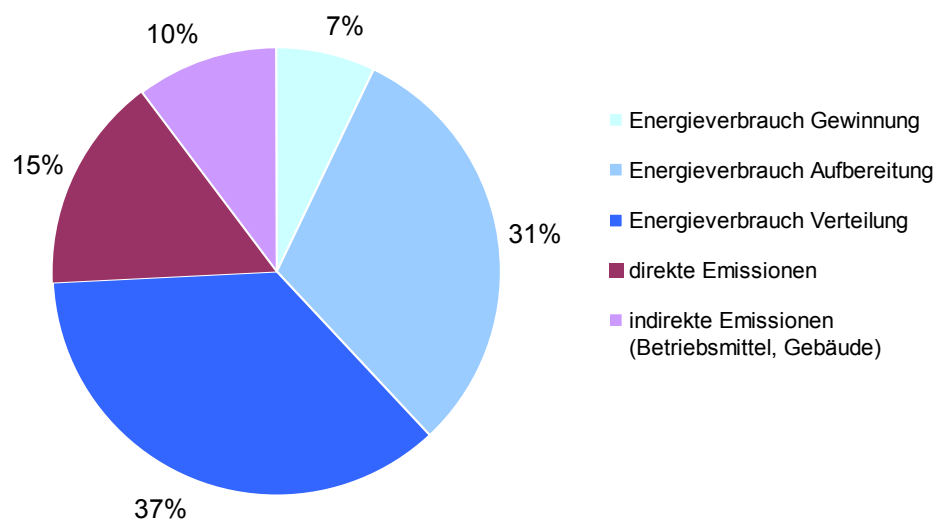


Abbildung 7-4: Prozentuale Verteilung der Treibhausgasemissionen eines Muster-Wasserwerkes

8 Bilanzierung von Pumpwerken

Pumpwerke finden dort Einsatz, wo einem inkompressiblen Fluid Bewegungsenergie zugeführt werden soll. In der Wasserwirtschaft finden Pumpwerke zur Förderung und Transport von Wasser und Abwasser ein weites Anwendungsfeld. An dieser Stelle soll die CF-Systematik am Beispiel von Pumpwerken zur Grundwasserhaltung sowie Abwasserpumpwerken dargestellt werden. Da es sich bei dieser Art von Pumpen meist um motorgetriebene Anlagen zur Wasserförderung handelt, resultieren die ökologischen Auswirkungen in erster Linie aus dem Energieverbrauch zum Betrieb des Motors.

8.1 Festlegung der Systemgrenzen

Die Systemgrenzen zur CF-Bilanzierung eines Pumpwerks werden eindeutig auf die ökologisch, klimatischen Auswirkungen der Wasserförderung festgelegt. Soziale sowie ökonomische Aspekte werden hierbei nicht berücksichtigt.

Zur Beschreibung des Pumpwerkes werden folgende Daten erfasst:

- Art des Förderwassers: Schmutz-, Regen-, Misch-, Grund/Grubenwasser
- Geförderte Wassermenge
- Geodätische Förderhöhe / verlustbehaftete Förderhöhe
- Wartungsaufwand
- Elektrischer Energieverbrauch
- Anfallende Abfallstoffe
- Aufbau des Pumpwerks

Eine genaue Auflistung aller zu erhebenden Daten findet sich ebenfalls in Steckbriefform im Anhang dieses Berichtes.

In Abbildung 8-1 sind die Systemgrenzen schematisch dargestellt. Eingangspunkt der Bilanzhülle ist die Übernahme des Wassers einschließlich aller gegebenenfalls enthaltenen Frachten am Zulauf der Saugseite. Grenze der Bilanzhülle bezüglich des Wasserpfades ist die Übergabe des Wassers auf der Druckseite mit Verlassen des Pumpwerkes. Emissionen außerhalb dieser Übergabepunkte (Kanalisation, Gewässer, Grundwasser) werden für den Bilanzraum Pumpwerk nicht berücksichtigt. Alle Prozesse innerhalb des Bilanzraumes werden gewichtet und in der CF-Bilanz berücksichtigt. Hierzu zählen die indirekten Emissionen, verursacht durch den Verbrauch an fossilen Energieträgern in Form von elektrischer Energie sowie Primärenergieträgern. Ebenfalls zu den indirekten Emissionen wird der Verbrauch an Betriebsmitteln und weiterer Verbrauchsmaterialien berücksichtigt. Bilanziert werden auch die Emissionen, welche durch wiederkehrende Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden. Um den CF eines Pumpwerkes zu

spezifizieren wird als funktionelle Einheit der Kubikmeter gefördertes Wasser pro Meter Förderhöhe gewählt.

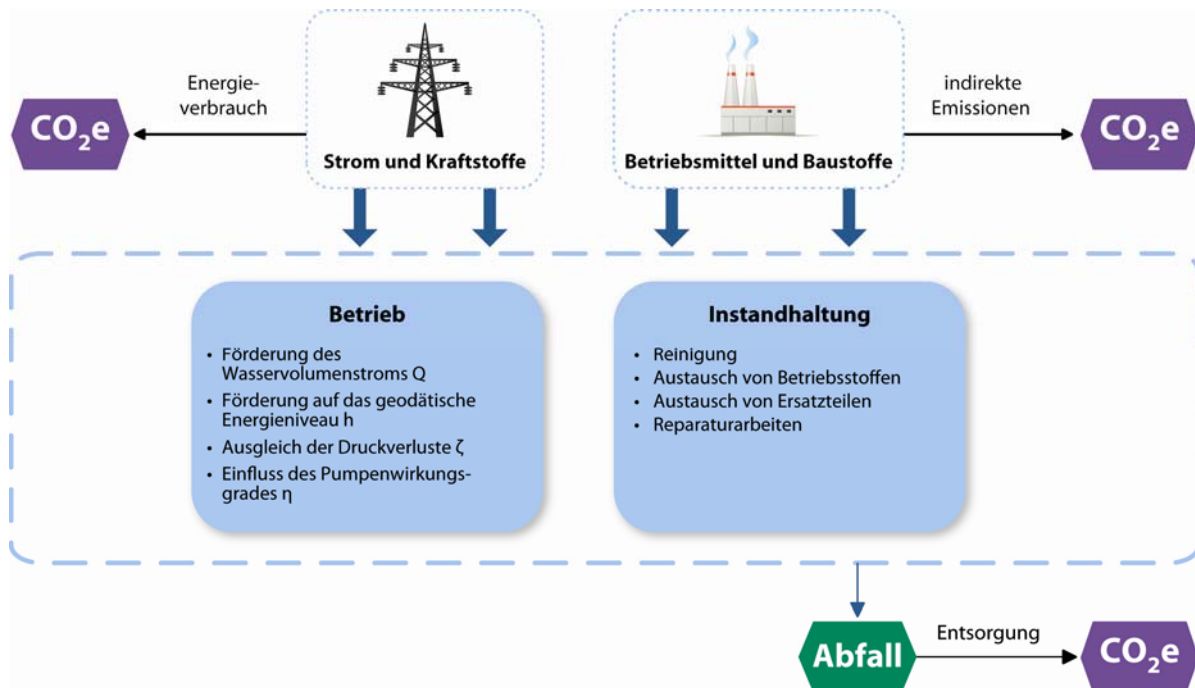


Abbildung 8-1: Systemgrenzen eines Pumpwerkes

8.2 Emissionsquellen

Direkte Emissionen durch die Bildung von CH_4 oder N_2O wurden nach aktuellem Stand des Wissens bei dem Betrieb von Pumpwerken nicht festgestellt und werden daher an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Bezüglich der Input- sowie Outputströme ergeben sich jedoch relevante und zu bilanzierende indirekte Emissionen. Hierzu zählen:

- Elektrischer Energieverbrauch
- Kraftstoffe (z. B. für Transporte und Instandhaltung)
- Betriebsmittel (z. B. Betriebschemikalien, Ersatzteile)
- Baustoffe (z.B. zur Reparatur / Instandhaltung)
- Entsorgung von Abfallstoffen (z. B. Rechengut, Sandgut)

Diese Ströme teilen sich auf den kontinuierlichen Betrieb des Pumpwerkes sowie auf wiederkehrende Instandhaltungsarbeiten auf.

8.2.1 Betrieb

Für den Betrieb wasserwirtschaftlicher Pumpwerke wesentlich ist die Bereitstellung von Energie. Sowohl die Pumpen als auch periphere Anlagenkomponenten wie Rechen, Sandfang, Heizung und etc. verbrauchen im Betrieb elektrische Energie, welche im CF bilanziert wird, in Einzelfällen wird zur Notstromversorgung ein Dieselgenerator vorgehalten. Weiterhin führen einzelne Anlagen kontinuierlich Betriebsmittel, welche als indirekte Emissionen erfasst werden. Bei langen Abwasserleitungen wird so z. B. dem Abwasser im Pumpwerk Nutriox zugegeben um die H₂S-Bildung im Rohr zu verhindern. Fallen im Betrieb auch Abfallstoffe an, ergibt sich der Bedarf des regelmäßigen Abtransportes.

$$\begin{aligned}
 CF_{BPW} = & \text{Energie } f(Q, h, \eta) \cdot EF(\text{Strom}) \\
 & + \text{Betriebsmittel} \cdot f(Q) \cdot EF(\text{Betriebsmittel}) \\
 & + \text{Transport } f(m, km, LKW) \cdot EF(\text{Treibstoff})
 \end{aligned}
 \quad \text{Gl. (8-1)}$$

8.2.2 Instandhaltung

Mit der Instandhaltung werden die turnusmäßigen Anfahrten und Arbeiten des Betriebspersonals zum Pumpwerk beschrieben. Hieraus relevante Emissionen ergeben sich aus dem Transportprozess, dem Einsatz von Betriebsmitteln sowie dem Input von Ersatzmaterialien.

$$\begin{aligned}
 CF_{BPW} = & \text{Transport } f(m, km, PKW) \cdot EF(\text{Treibstoff}) \\
 & + \text{Betriebsmittel} \cdot f(Q) \cdot EF(\text{Stoff}) \\
 & + \text{Material} \cdot f(Q) \cdot EF(\text{Stoff})
 \end{aligned}
 \quad \text{Gl. (8-2)}$$

8.3 Bilanzierung von Musterpumpwerken

Zur Abschätzung des CF von Pumpanlagen wurden Modellrechnungen an Musterpumpwerken durchgeführt. Die Modellrechnung wurde beispielhaft für ein kontinuierlich laufendes Abwasserpumpwerk sowie ein Pumpwerk zur Förderung von Grubenwässern durchgeführt. Die Eingangsdaten basieren auf anlagentypischen Annahmen.

8.3.1 Musterabwasserpumpwerk

Das Musterabwasserpumpwerk (Tabelle 8-1) fördert das Abwasser einer Kommune mit 25.000 EW zur nächstgelegenen größeren Kläranlage. Die verlustbehaftete Förderhöhe liegt hier bei 12 m.

Tabelle 8-1: Basisdaten des Musterabwasserpumpwerkes

Pumpwerksdaten	
Pumpwerk	Modelleinzugsgebiet Abwasser
Installierte Förderleistung	6 kW
Pumpenwirkungsgrad	60%
Förderhöhe	12,00 m
Funktion	Abwasserförderung
Fördervolumen	1.000.000 m³/a
Theoretischer Energiebedarf	32.700 kWh/a
Effektiver Energiebedarf	54.500 kWh/a

Um den Verschleiß des Pumpwerks zu minimieren ist der Anlage eine mechanische Reinigung mit Rechen und Sandfang vorgeschaltet. Die anfallenden Frachten sind den Standardwerten für häusliches Abwasser entnommen (Schneider, 2004), der Energiebedarf wurde in Anlehnung an den Kennwerten des Energiehandbuches bestimmt (Müller, Kobel *et al.*, 1999) (Tabelle 8-2).

Tabelle 8-2: Basisdaten der peripheren Anlagenteile des Abwasserpumpwerkes

Periphere Anlagendaten	
Rechen	Feinrechen 1cm
spezifischer Energiebedarf	1,5 Wh/m³
absoluter Energiebedarf	1.500 kWh/a
Spezifischer Rechengutanfall	3,52E-04 m³/m³
Gesamtrechengutanfall	351,95 m³/a
nach Waschen und Pressen	140,78 m³/a
TS-Gehalt	25%
TS-Masse	35 kg/a
Gesamtmasse	140.780 kg/a
Sandfang	unbelüftet, ohne Wäscher
spezifischer Energiebedarf	1,0 Wh/m³
absoluter Energiebedarf	1.000 kWh/a
Spezifischer Sandgutanfall	7,38E-05 m³/m³
Gesamtsandgutanfall	73,76 m³/a
Masse	147.524 kg/a

Tabelle 8-3: Basisdaten der Bautechnik des Abwasserpumpwerkes

Bautechnik	
Höhe	3,0 m
Länge	5,0 m
Breite	5,0 m
Umbautes Volumen	75 m ³
Wandstärke	0,3 m
Bauvolumen	33 m ³
Maschinentechnik	3.000,0 kg
Beton	74.382,0 kg
Stahlbeton	5.181,0 kg
Maschinentechnik	5.160 kg CO ₂
Beton	38.679 kg CO ₂
Stahlbeton	7.564 kg CO ₂
Summe CO ₂	51.403 kg CO ₂
Nutzungsdauer	30,00 Jahre
CO ₂ /a	1713,43 kg

In Tabelle 8-4 sind die Annahmen dargestellt, welche für den Instandhaltungsaufwand gewählt wurden. Der Aufwand für die Entsorgung des anfallenden Rechen- und Sandgutes wurde aus der Jahresmasse über eine Transportdistanz von 20 km abgeschätzt (Tabelle 8-5).

Tabelle 8-4: Basisdaten der Instandhaltungsarbeiten eines Abwasserpumpwerkes

Instandhaltung		
Posten	Aufwand	pro Jahr
Wartungsintervall	1.000 h	9
Inspektionsintervall	4.000 h	2
Ölwechselintervall	5.000 h	2
Materialinput	1% der Maschinentechnik	30 kg
Fahrleistung	20 km	180 km
Fahrzeug	10 L/100km	18 L

Tabelle 8-5: Basisdaten der Abfallentsorgung eines Abwasserpumpwerkes

Abfallentsorgung	
LKW Transport	14 t
Fahrstrecke	20 km
Fahrzeug	0,30 L/km
Rechenguttransporte	11 /a
Dieserverbrauch	66 L/a
Sandguttransporte	11 /a
Dieserverbrauch	66 L/a

Die aus der Berechnung resultierende CF des Musterabwasserpumpwerkes ist in Tabelle 8-6 dargestellt. Die gesamt Emissionen liegen hier bei 35,36 t CO₂ pro Jahr. Dies entspricht, bezogen auf die funktionelle Einheit 2,39 g CO₂ pro m³ Förderwasser und Meter Förderhöhe.

Tabelle 8-6: CF-Bilanz eines Abwasserpumpwerkes

TREIBHAUSGAS-EMISSIONSQUELLEN	Energie	CO ₂		Brutto Emissionen	
	kWh/a	t/a	g/m ³ /m	t CO ₂ -e /a	g CO ₂ -e /m ³ /m
1. Energie	57.000,00	32,78	2,73	32,78	2,73
A. Pumpen	54.500	31,34	2,61		
1. Wirkarbeit	32.700	18,80	1,57		
2. Blindarbeit	21.800	12,54	1,04		
B. Rechen	1.500	0,86	0,07		
C. Sandfang	1.000	0,58	0,05		
2. Indirekte Emissionen					
A. Betriebsmittel		0,11	0,01	0,11	0,01
1. Schmieröl	20 kg/a	0,064	0,01		
2. Ersatzteile	30 kg/a	0,05	0,00		
B. Instandhaltung		0,14	0,01	0,14	0,01
1. Kraftstoff	45 L/a	0,14	0,01		
C. Reststoffentsorgung	132,00	0,42	0,03	0,42	0,03
1. Rechengut	66 L/a	0,21	0,02		
2. Sandgut	66 L/a	0,21	0,02		
C. Baustoffe		1,71	0,14	1,71	0,14
Summe				35,17	2,93

Wie in Abbildung 8-2 gezeigt resultiert der größte Anteil (89 %) des CF aus dem Energiebedarf der Pumpen. Rechen und Sandfang (4 %) weisen einen verhältnismäßig geringen Einfluss auf den CF auf. Ebenfalls untergeordnet sind die Emissionen aus den Prozessen des Betriebsmitteleinsatzes, der Instandhaltung sowie der Reststoffentsorgung (insgesamt 2 %) sowie der Baumaßnahme (4 %).

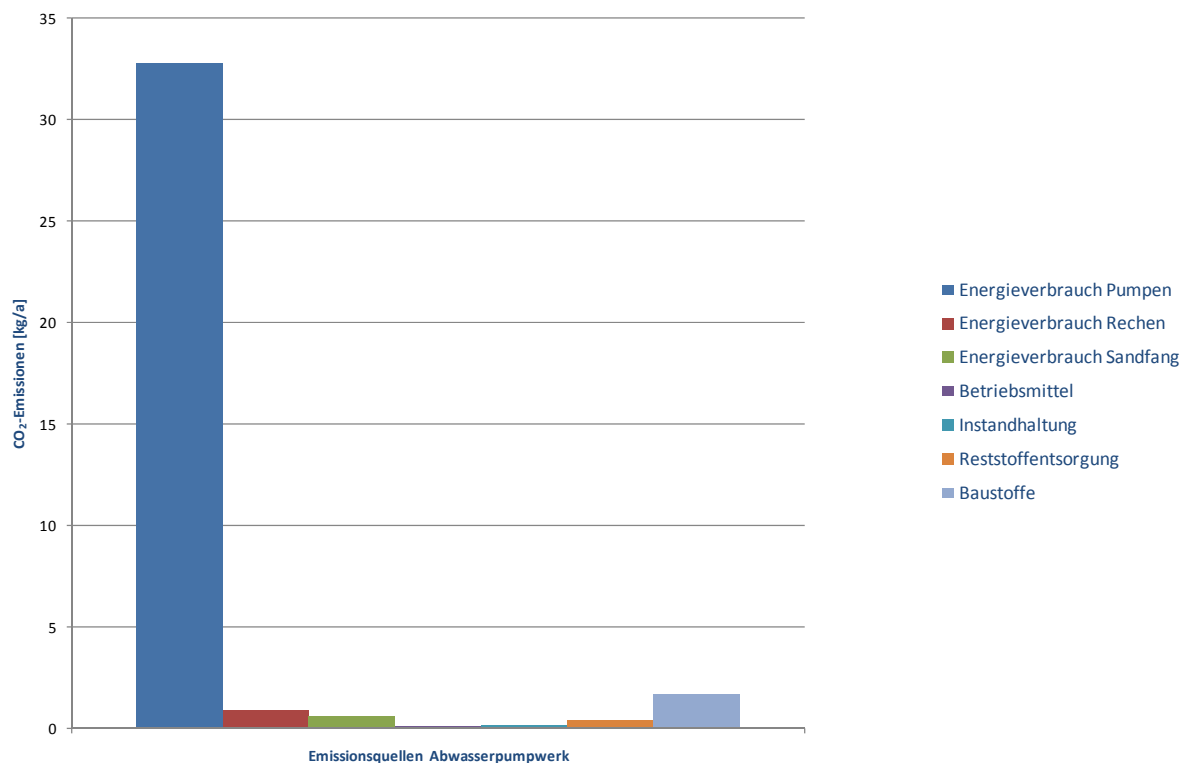


Abbildung 8-2: Graphische Darstellung der CF-Bilanz eines Abwasserpumpwerkes

8.3.2 Mustergrundwasserhaltungspumpwerk

Das Mustergrundwasserpumpwerk fördert das Grubenwasser einer Bergbauregion zum nächstgelegenen Fließgewässer. Die verlustbehaftete Förderhöhe liegt hier bei 200 m (Tabelle 8-7).

Tabelle 8-7: Basisdaten des Muster-Grundwasserpumpwerkes

Pumpwerksdaten	
Pumpwerk	Modelleinzugsgebiet Grundwasser
Installierte Förderleistung	830 kW
Pumpenwirkungsgrad	60%
Förderhöhe	200,00 m
Funktion	Wasserhaltung
Fördervolumen	8.000.000 m³/a
Theoretischer Energiebedarf	4.360.000 kWh/a
Effektiver Energiebedarf	7.266.667 kWh/a

In Tabelle 8-8 sind die Annahmen dargestellt, welche für den Instandhaltungsaufwand gewählt wurden.

Tabelle 8-8: Basisdaten der Instandhaltungsarbeiten eines Grundwasserpumpwerkes

Instandhaltung		
Posten	Aufwand	pro Jahr
Wartungsintervall	1.000 h	9
Inspektionsintervall	4.000 h	2
Ölwechselintervall	5.000 h	2
Materialinput	1% der Maschinenteknik	100 kg
Fahrleistung	20 km	180 km
Fahrzeug	10 L/100km	18 L

Tabelle 8-9: Basisdaten der Bautechnik eines Grundwasserpumpwerkes

Bautechnik	
Höhe	7,0 m
Länge	5,0 m
Breite	5,0 m
Umbautes Volumen	175 m³
Wandstärke	0,3 m
Bauvolumen	57 m³
Maschinenteknik	10.000,0 kg
Beton	128.478,0 kg
Stahlbeton	8.949,0 kg
Maschinenteknik	17.200 kg CO ₂
Beton	66.809 kg CO ₂
Stahlbeton	13.066 kg CO ₂
Summe CO ₂	97.074 kg CO ₂
Nutzungsdauer	30,00 Jahre
CO ₂ /a	3.236 kg CO ₂

Ausgehend von den oben getroffenen Annahmen ist in Tabelle 8-10 die CF-Bilanz des Grundwasserpumpwerkes dargestellt. Erwartungsgemäß verursacht der elektrische Energieverbrauch zur Förderung der Wassermenge die anteilig größten Emissionen. Bezogen auf die spezifische Einheit sind Betriebsmitteleinsatz sowie Instandhaltungsarbeiten vernachlässigbar gering. Lediglich die Bau- und Maschinenteknik verursacht, bedingt durch die Bauwerksgröße einen relevanten Anteil an dem Gesamt-CF.

Tabelle 8-10: CF-Bilanz eines Grundwasserpumpwerkes

TREIBHAUSGAS-EMISSIONSQUELLEN	Energie	CO ₂		Brutto Emissionen	
	kWh/a	t/a	g/m ³ /m	t CO ₂ -e /a	g CO ₂ -e /m ³ /m
1. Energie	7.266.666,67	4.178,33	2,61	4.178,33	2,61
A. Pumpwerk	7.266.667	4.178,33	2,61		
1. Wirkarbeit	4.360.000	2.507,00	1,57		
2. Blindarbeit	2.906.667	1.671,33	1,04		
2. Indirekte Emissionen					
A. Betriebsmittel		0,36	0,00		0,00
1. Schmieröl	60 kg/a	0,191	0,00		
2. Ersatzteile	100 kg/a	0,17	0,00		
B. Instandhaltung		0,06	0,00	0,06	0,00
2. Kraftstoff	18 L/a	0,06	0,00		
C. Baustoffe		3.235,80	2,02	3.237,83	2,02
Summe				7.416,22	4,63

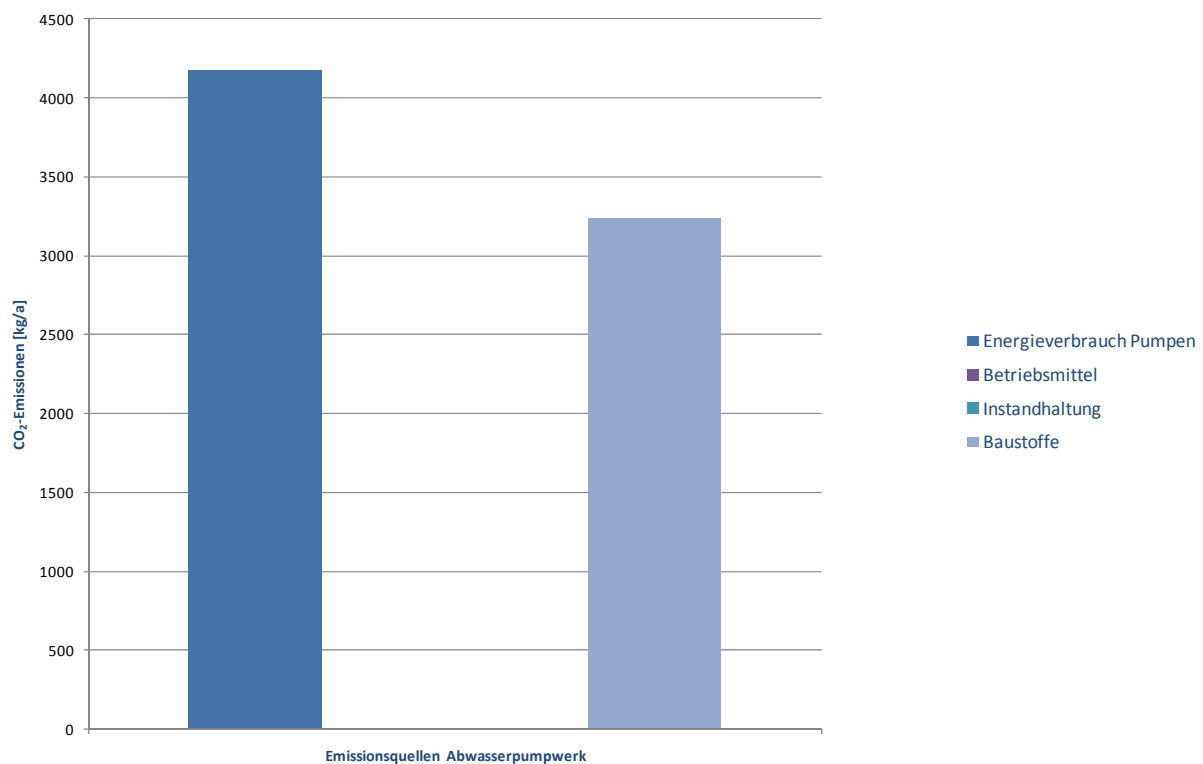


Abbildung 8-3: Graphische Darstellung der CF-Bilanz eines Grundwasserpumpwerkes

9 Bilanzierung von Sonderbauwerken und Sammlern

Die Systemgrenzen zur CF-Bilanzierung von Sonderbauwerken und Sammlern werden eindeutig auf die ökologisch, klimatischen Auswirkungen der Abwasserableitung sowie -behandlung festgelegt.

Zur Beschreibung der Sonderbauwerke werden folgende Daten erfasst:

- Bauwerktyp: Sammler, Regenüberlaufbecken, Regenklärbecken, Retentionsbodenfilter, Stauraumkanal, etc.
- Behandlungsvolumen / Länge / Nenndurchmesser
- Stand der Maschinentechnik /EMS-Technik
- Zulaufmenge
- Angeschlossene Fläche
- Entleerungshäufigkeit
- Reststoffanfall

Eine genaue Auflistung aller zu erhebenden Daten findet sich ebenfalls in Steckbriefform im Anhang dieses Berichtes.

In Abbildung 9-1 sind die Systemgrenzen schematisch dargestellt. Eingangspunkt der Bilanzhülle ist die Übernahme des Wassers einschließlich aller gegebenenfalls enthaltenen Frachten am Zulauf. Grenze der Bilanzhülle bezüglich des Wasserpfades ist die Übergabe des Wassers auf der Ablaufseite mit Verlassen des Bauwerkes. Emissionen außerhalb dieser Übergabepunkte (Kanalisation, Gewässer) werden für den Bilanzraum nicht berücksichtigt. Alle Prozesse innerhalb des Bilanzraumes werden gewichtet und in der CF-Bilanz berücksichtigt. Hierzu zählen die indirekten Emissionen, verursacht durch den Verbrauch an fossilen Energieträgern in Form von elektrischer Energie sowie Primärenergieträgern. Ebenfalls zu den indirekten Emissionen wird der Verbrauch an Betriebsmitteln und weiterer Verbrauchsmaterialien berücksichtigt. Bilanziert werden auch die Emissionen, welche durch wiederkehrende Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden. Um den CF eines Bauwerkes zu spezifizieren wird als funktionelle Einheit der Kubikmeter Bauwerksvolumen gewählt.

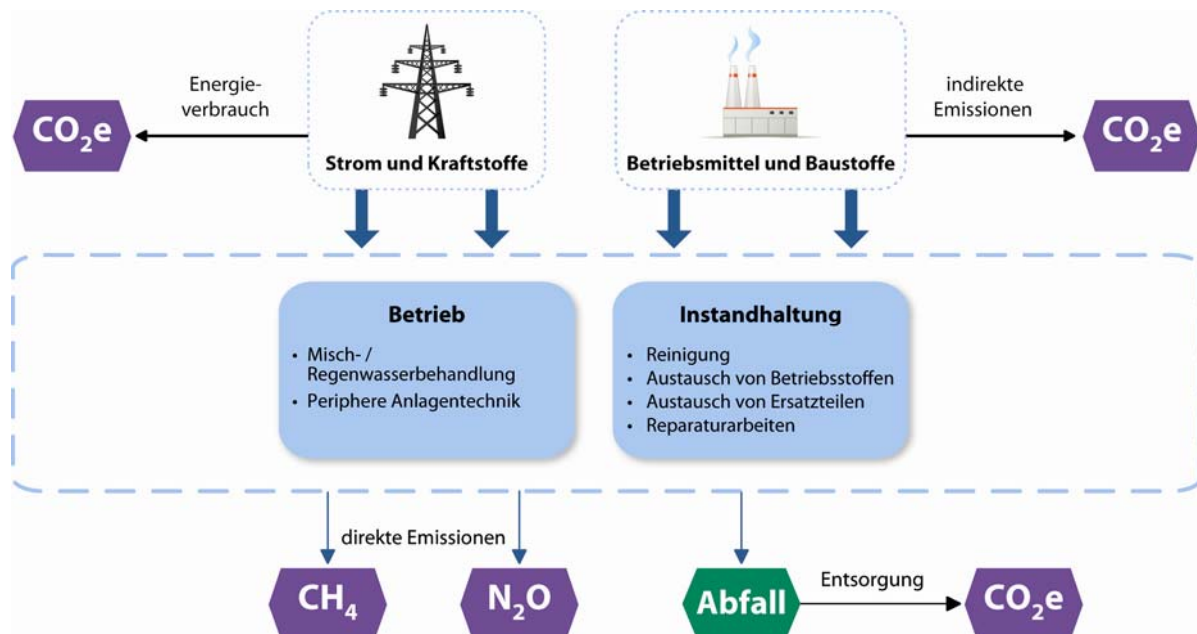


Abbildung 9-1: Systemgrenzen eines Sonderbauwerkes

9.1 Emissionsquellen

Direkte Emissionen durch die Bildung von CH₄ oder N₂O wurden nach aktuellem Stand aus den Untersuchungen von Kanalnetzen nachgewiesen, das spezifische Emissionsverhalten von Sonderbauwerken und Sammlern in Deutschland wurde bisher jedoch noch nicht untersucht. Es ist jedoch zu vermuten, dass unter bestimmten Betriebsbedingungen ebenfalls direkte Emissionen in diesen Kanalbauwerken gebildet werden.

Bezüglich der Input- sowie Outputströme ergeben sich jedoch relevante und zu bilanzierende indirekte Emissionen. Hierzu zählen:

- Elektrischer Energieverbrauch
- Kraftstoffe (z. B. für Transporte und Instandhaltung)
- Betriebsmittel (z. B. Betriebschemikalien, Ersatzteile)
- Baustoffe (z.B. zur Reparatur / Instandhaltung)
- Entsorgung von Abfallstoffen (z. B. Rechengut, Sandgut)

Diese Ströme teilen sich auf den kontinuierlichen Betrieb des Bauwerkes sowie auf wiederkehrende Instandhaltungsarbeiten auf.

9.1.1 Betrieb

Für den Betrieb wasserwirtschaftlicher Sonderbauwerke, bei integrierter Maschinenteknik, wesentlich ist die Bereitstellung von Energie. Energieverbräuche ergeben sich bei dem

Einsatz von Pumpen oder auch peripheren Anlagenkomponenten wie Rechen, Sandfang, Heizung oder Steuerungstechnik. Fallen im Betrieb auch Abfallstoffe an, ergibt sich der Bedarf des regelmäßigen Abtransportes. Bei Anlagen ohne Maschinentechnik entfallen diese Indirekten Emissionen.

$$\begin{aligned}
 CF_{BPW} = & \text{Energie } f(Q, h, \eta) \cdot EF(\text{Strom}) \\
 & + \text{Betriebsmittel} \cdot f(Q) \cdot EF(\text{Betriebsmittel}) \\
 & + \text{Transport } f(m, km, LKW) \cdot EF(\text{Treibstoff})
 \end{aligned}
 \quad \text{Gl. (9-1)}$$

9.1.2 Instandhaltung

Mit der Instandhaltung werden die turnusmäßigen Anfahrten und Arbeiten des Betriebspersonals zum Bauwerk beschrieben. Hieraus relevante Emissionen ergeben sich aus dem Transportprozess, dem Einsatz von Betriebsmitteln sowie dem Input von Ersatzmaterialien.

$$\begin{aligned}
 CF_{BPW} = & \text{Transport } f(m, km, PKW) \cdot EF(\text{Treibstoff}) \\
 & + \text{Betriebsmittel} \cdot f(Q) \cdot EF(\text{Stoff}) \\
 & + \text{Material} \cdot f(Q) \cdot EF(\text{Stoff})
 \end{aligned}
 \quad \text{Gl. (9-2)}$$

9.2 Bilanzierung von Musterbauwerken

Zur Abschätzung des CF von Bauwerken wurden Modellrechnungen an Musteranlagen durchgeführt. Die Modellrechnung wurde beispielhaft für ein Regenklärbecken sowie einen Sammler zur Förderung von häuslichem Abwasser durchgeführt. Die Eingangsdaten basieren auf anlagentypischen Annahmen.

9.2.1 Musterregenklärbecken

Für die Abschätzung des CF eines Regenklärbecken (RKB) wurde ein Bemessungsberechnung für ein RKB im Dauerstau durchgeführt (LfU, 2005). Ausgehend von einer angeschlossenen Fläche von 10 ha und einer kritischen Regenspende von 15 L/(s·ha) sind die Bemessungsdaten in Tabelle 9-1 dargestellt.

Tabelle 9-1: Berechnungsdaten eines Regenklärbeckens im Dauerstau

Bauwerksdaten	
Bauwerk	RKB im Dauerstau
Flächenbeschickung	7,5
Regenspende	15,00 L/(s·ha)
Angeschlossene Fläche	10 ha
min. Beckenoberfläche	72 m ²
Beckenoberfläche	100 m ²
Beckenlänge	20 m
Beckenbreit	5 m
Beckentiefe	2 m
Behandlungsvolumen	200 m ³
Auffangraum Leichtflüssigkeit	5 m ³
Schlammammelraum	10 m ³

Der Instandhaltungsaufwand der RKB wurde nach (DWA, 2005) mit 12 Inspektionen sowie einer Entschlammung pro Jahr abgeschätzt.

Tabelle 9-2: Instandhaltungsaufwand eines RKB im Dauerstau

Betriebsdaten		
Posten	Aufwand	pro Jahr
Wartungsintervall	12	
Reinigungsintervall	1	
Fahrleistung	20 km	240 km
Fahrzeug	10 L/100km	24 L
Abfallentsorgung		
LKW Transport	20 t	
Fahrstrecke	20 km	
Fahrzeug	0,30 L/km	
Entschlammung	10 m ³	
Entschlammungsdauer	20 min	
Dieserverbrauch	16 L/a	

Ausgehend von der oben genannten Bemessung des RKB wurde eine grobe Abschätzung der benötigten Bauarbeiten durchgeführt (Tabelle 9-3). Auf Basis der angesetzten Bauarbeiten und Materialverbräuche wurde eine CO₂-Emission von 2,6 t pro Jahr über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ermittelt.

Tabelle 9-3: Bautechnische Aufwendungen eines RKB im Dauerstau

Bautechnik	
Höhe	2,0 m
Länge	20,0 m
Breite	5,0 m
Umbautes Volumen	215 m³
Wandstärke	0,3 m
Bauvolumen	94 m³
Aushubarbeiten	237 m³
Beton	212.865,9 kg
Stahlbeton	14.827,0 kg
Beton	110.690 kg CO ₂
Stahlbeton	21.647 kg CO ₂
Aushubarbeiten	128 kg CO ₂
Summe CO ₂	132.338 kg CO ₂
Nutzungsdauer	50 Jahre
CO ₂ /a	2.647 kg CO ₂

Die Gesamtheit der ermittelten Emissionen für ein Regenklärbecken im Dauerstau sind in Tabelle 9-4 dargestellt. Die Emissionen der Einzelprozess wurden ebenfalls auf die funktionelle Einheit kg CO₂ pro m³-Behandlungsvolumen spezifiziert.

Tabelle 9-4: CF-Bilanz eines Regenklärbeckens im Dauerstau

TREIBHAUSGAS-EMISSIONSQUELLEN	Input	CO ₂		Brutto Emissionen	
		t/a	kg/m³	t CO ₂ -e /a	kg CO ₂ -e /m³
1. Indirekte Emissionen					
A. Instandhaltung		0,08	0,38	0,08	0,38
1. Kraftstoff	24 L/a	0,08	0,38		
B. Reststoffentsorgung		0,06	0,32	0,06	0,32
1. Entschlammung	20 L/a	0,06	0,32		
C. Baustoffe		2,65	13,23	2,65	13,23
		Summe		2,79	13,93

In Abbildung 9-2 wird deutlich, dass die äquivalenten Emissionen aus dem Energiebedarf für die Instandhaltung und Reinigung in der Gesamtbilanz tatsächlich eher von untergeordneter Relevanz sind. Trotz der, über die Nutzungsdauer von 50 Jahren, verteilten Emissionen aus der Baumaßnahme verursachen diese mit 2,79 t/a bzw. 13,23 kg/m³ den anteilig größten Part.

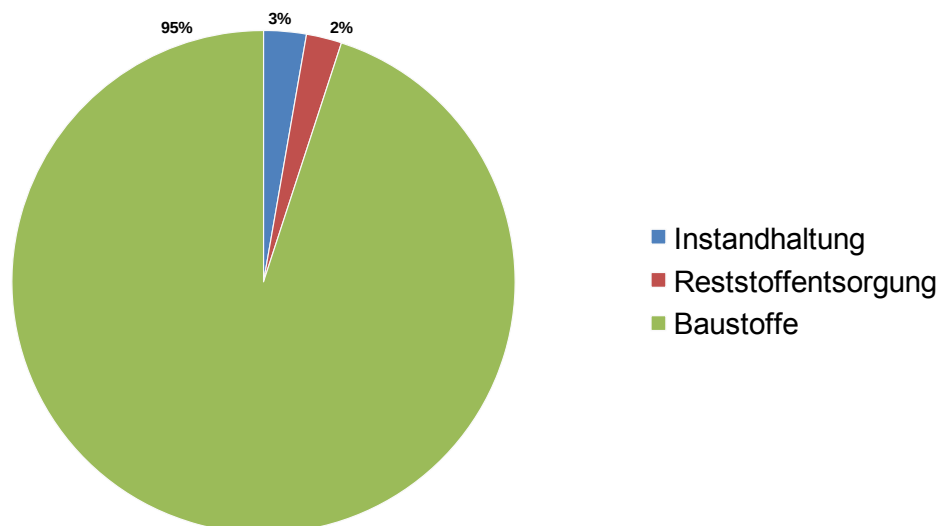


Abbildung 9-2: Verteilung der Treibhausgasemissionen eines Regenklärbeckens

9.2.2 Mustersammler

Für überschlägige CF-Bilanz eines Abwassersammlers wurde angenommen, dass das Abwasser des bilanzierenden Abwasserpumpwerkes (s. Kapitel 8.3.1) im Freispiegelgefälle über 5 km zur nächstgelegenen Kläranlage geleitet wird (Tabelle 9-5).

Tabelle 9-5: Bemessungslagen des Mustersammlers

Kanaldaten	
Kanaltyp	Abwassersammler
Angeschlossene EW	25.000
Nenndurchmesser	400,00 mm
Leitungslänge	5 km
Rohrtyp	Betonrohr
Hydraulische Annahmen	
Jahreszufluss	1.000.000 m³/a
hydraulische Belastung	32 L/s
Gefälle	1,50 ‰
Rauheit	0,75 mm
DN	400,00 mm
Q_v	88 L/s
v_v	0,70 m/s
Q_t/Q_v	0,36
v_t	0,65 m/s
h	165,60 mm
Länge	5 km
Fließzeit	2,15 h

Hinsichtlich der Wartungs- und Reinigungsintervalle wurde die Empfehlungen nach (DWA, 2005) angesetzt. Für den Zeitbedarf der Kanalreinigung wurden 8 Stunden pro laufendem Kilometer Kanal angenommen (Tabelle 9-6).

Tabelle 9-6: Wartungs- und Reinigungsaufwand des Modellsammlers

Betriebsdaten		
Posten	Aufwand	pro Jahr
Schachtinspektion	1	
Inspektionsintervall	0,2	
Reinigung	0,2	
Fahrleistung	20 km	20 km
Fahrzeug	10 L/100km	2 L
Reinigung		
Zeitbedarf	8 h/km	
Gesamtbedarf	40,00 h	
Dieselvebrauch	1200 L	

Zur näherungsweisen Bilanzierung des Baus der 5 km langen Sammelleitung wurde der Materialinput, verursacht durch das Stahlbetonrohr sowie die Arbeiten im offenen Bau bilanziert (Tabelle 9-7).

Tabelle 9-7: Bautechnischer Aufwand eines Sammlers

Bautechnik	
Rohrlänge	5 km
Rohrwanddicke	90,00 mm
Rohrvolumen	315 m ³
Beton	709.000 kg
Stahlbeton	49.385 kg
Beton	368.680 kg CO ₂
Stahlbeton	72.102 kg CO ₂
Einbautiefe	2,0 m
Grabenbreite	1,2 m
Aushubvolumen	11.900 m ³
Emissionen Aushub	6.426 kg CO ₂
Summe CO ₂	447.208 kg CO ₂
Nutzungsdauer	100,00 Jahre
CO ₂ /a	4.472 kg CO ₂

Da in internationalen Untersuchungen die Bildung der Treibhausgase CH₄ und N₂O nachgewiesen werden konnten (vgl. 5.4.1), wurde auf Basis der bisherigen Erkenntnisse das mögliche Bildungspotential direkter Emissionen des Mustersammlers berechnet. Als

Datengrundlage wurden das Abwasservolumen im teilgefüllten Sammler sowie die benetzte Rohrfläche bestimmt. Da die bisherigen Erkenntnisse zur CH_4 -Bildung in Abwasserrohren aus Australien mit den hier vorherrschenden klimatischen Randbedingungen kaum vergleichbar sind wurden aktuelle Messwerte aus den Niederlanden angesetzt. Die Bildung von $2 \text{ g CH}_4/\text{m}^3$ Abwasser (STOWA, 2010) entsprechen in diesem Modell einem CSB-Umsatz von 0,3 %. Hinsichtlich der N_2O -Bildung wurden die Ergebnisse von Messungen in Bayreuth angesetzt (Clemes, Haas, 1997). Hierzu wurde der niedrigste Messwert von $11 \text{ mg N}_2\text{O pro m}^2$ benetzter Rohrfläche und Stunde als Emissionsfaktor angenommen (Tabelle 9-8).

Tabelle 9-8: Annahmen zur Berechnung der direkten Emissionen eines Sammlers

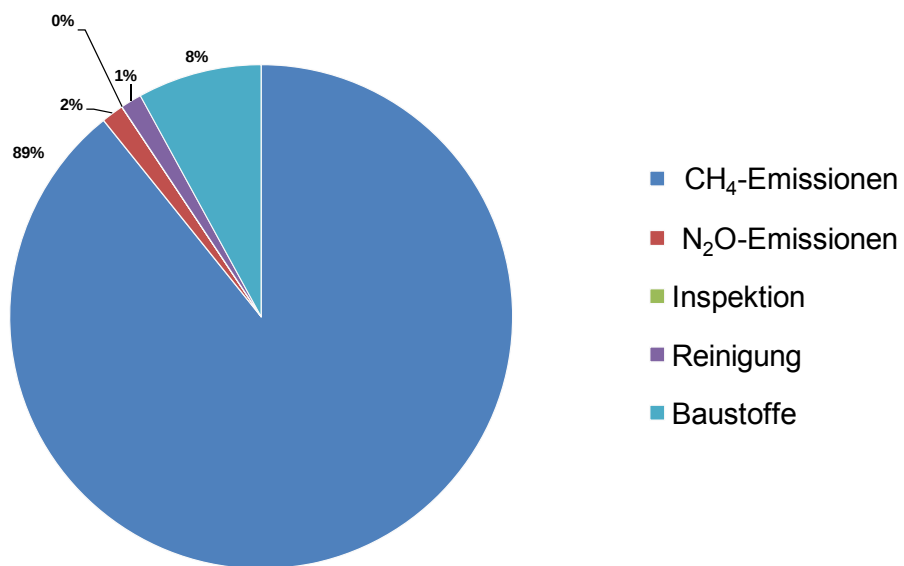
direkte Emissionen	
Abwasservolumen im Kanal	246 m^3
Benetzte Rohrfläche	2.796 m^2
A/V	11,38
CH_4 -Bildung	2.000 kg
N_2O -Bildung 0,11 $\text{mg/m}^2/\text{h}$	2,69 kg

Im Folgenden ist die CF-Bilanz des Mustersammlers dargestellt (Tabelle 9-9). In Summe werden durch den Sammler 56,04 t CO_2 pro Jahr emittiert.

Tabelle 9-9: GWP eines Musterabwassersammlers

TREIBHAUSGAS-EMISSIONSQUELLEN	Input	CO_2		CH_4		N_2O		Brutto Emissionen	
		t/a	kg/km*a	t/a	kg/km*a	t/a	kg/km*a	t $\text{CO}_2\text{-e /a}$	kg/km*a
1. Direkte Emissionen									
A. Abwasserableitung				2,00	400,00	0,0027	0,54	50,80	10.161
2. Indirekte Emissionen									
A. Inspektion	2 L	0,006	1,27					0,006	1,27
B. Reinigung	240 L	0,763	152,58					0,76	152,58
C. Baustoffe		4,47	894,42					4,47	894,42
Summe								56,04	11.208,83

Den größten Anteil haben nach dem angesetzten Modell hierbei die Emissionen, welche aus der CH_4 -Bildung (89 %) resultieren. Die N_2O -Emissionen verursachen trotz des hohen GWP, bedingt durch das eher gering angesetzte Bildungspotential, 2 % des CF. Ebenfalls gering sind die Emissionen aus Instandhaltung und Wartung. Mit 8 % weist die Verlegung des Abwasserrohrs im offenen Bau noch einen anteilig größeren Einfluss auf den CF auf.

Abbildung 9-3: Verteilung des GWP eines Abwassersammlers

10 Bilanzierung von Talsperren

10.1 Ausgangssituation und Besonderheiten

Talsperren unterscheiden sich maßgeblich von den anderen wasserwirtschaftlichen Anlagen, aufgrund der starken Abhängigkeit von naturräumlichen Gegebenheiten (Morphologie, Geologie, Hydrologie, Temperatur, Erdbewegungen, Gütebeeinflussung u. a.) und unterschiedlicher Nutzungsarten (z. B. Hochwasserschutz, Wassermengenausgleich, Trinkwasserspeicher). Auch die technische Realisierung von Absperrbauwerk und vor gelagerten technischen Einrichtungen kann sehr unterschiedlich sein. Eine Vergleichbarkeit des Carbon Footprint verschiedener Talsperren kann deshalb nur gewährleistet werden, wenn der Bilanzierung ein hierarchisch aufgebautes Prozessmodell zugrunde liegt, in dem alle Teilprozesse eindeutig einem Hauptprozess zugeordnet sind. Der Vergleich unterschiedlichster Talsperrentypen wird dann möglich, wenn er für einzelne Teilaufgaben bzw. Teilprozesse erfolgt.

Insbesondere bei den Talsperren als technische Großbauwerke stellt sich die Frage, ob hier der CF der Bauphase mit in die Bilanzierung einfließen sollte. Wie in einer britischen Untersuchung festgestellt, macht dieser den Hauptanteil des Gesamt-CF von Talsperren aus (s. Kap. 5.6). Allerdings wurde der Nutzungszeitraum hier mit 20 Jahren sehr niedrig angesetzt, denn er liegt meistens eher bei mindestens 50 Jahren, so dass sich der CF der Bauphase über die gesamte Nutzungsdauer betrachtet, entsprechend verringern würde.

Kurz- bis mittelfristige Optimierungsansätze sind aber in den betrieblichen Prozessen zu sehen, da in Deutschland wahrscheinlich kaum noch neue Talsperren gebaut werden. Für langfristig orientierte Strategien sollte die Bauphase jedoch in die Bilanzierung mit einbezogen werden, da die Rohstoffauswahl einen erheblichen Einfluss hat. Da es schwierig sein dürfte, hierfür noch Daten zu erhalten, könnte man ggf. auf solche von Hochwasserrückhaltebecken zurückgreifen und damit die THG-Emissionen für den Bau von Talsperren abschätzen.

10.2 Festlegung der Systemgrenzen und des Prozessnetzes

Die Festlegung des Bilanzierungsraumes Talsperren erfolgte auf Grundlage eines Leitfadens (Merkel, Graf, 2007), der auf Initiative der Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V. (ATT) entstanden ist mit dem Ziel, Benchmarking für den Talsperrenbetrieb nutzbar zu machen. Die dort beschriebenen Prozessmodelle für Talsperren sind grundsätzlich auch für die CF-Bilanzierung geeignet, weil sie in einer Gruppe von Talsperrenbetreibern entwickelt und in der Praxis erprobt worden sind.

Das zu betrachtende System wurde anhand der wasserwirtschaftlichen Kernfunktionen der Talsperre mit Einzugsgebiet inkl. vorliegender Bauwerke und den dort operativen Tätigkeiten

definiert. Der Betrieb von nach geschalteten Anlagen (u.a. Wasserkraftanlagen, Aufbereitungsanlagen zur Trinkwasserbereitstellung) ist nicht Gegenstand der Betrachtung.

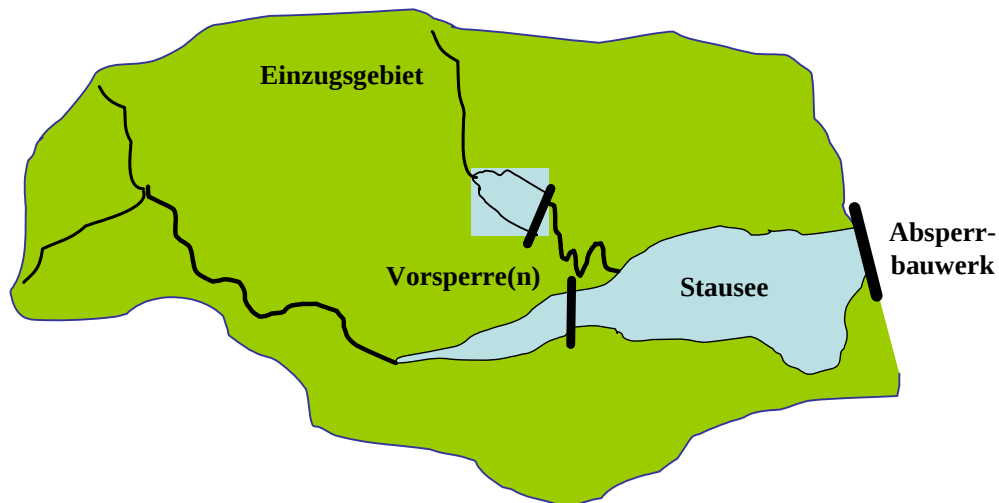


Abbildung 10-1: Schematische Darstellung des Systems Talsperre (Merkel, Graf, 2007)

Im ATT-Leitfaden werden 2 Prozessmodelle für Talsperren beschrieben. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zielrichtung:

- Das objekt- oder bauwerksorientierte Prozessmodell unterteilt Talsperren entlang dem Fließweg des Wassers in folgende Prozesse:
 - 1) Einzugsgebiet
 - 2) Vorsperre
 - 3) Stausee
 - 4) Absperrbauwerk
 - 5) Sonstiges
- Die Prozesse eines Aufgaben orientierte Prozessmodells sind:
 - 1) Überwachung
 - 2) Hauptfunktionen
 - 3) Planung/Bau/Instandhaltung
 - 4) Administration
 - 5) Sonstiges

Die wesentlichsten zugehörigen Teilprozesse sind Abbildung 10-2 und Abbildung 10-3 zu entnehmen. Beide Prozessmodelle sind hinsichtlich der Erhebungstiefe variabel, d.h. je nach Datenverfügbarkeit ist eine Erhebung auf Teilprozess- oder auf Hauptprozessebene möglich. Weiterhin kann bei Bedarf eine weitere Detaillierung der Teilprozesse vorgenommen werden.

Welches der beiden Modelle für eine CF-Bilanzierung geeigneter ist, hängt von der Art der Datenerfassung bei den Talsperrenbetreibern ab.

Baumaßnahmen, die in regelmäßigen Abständen anfallen, müssen in die Bilanzierung des Talsperrenbetriebes mit einbezogen werden und entsprechend Ihrer Lebensdauer den jährlichen Emissionen zugeteilt werden. Der Baumaßnahmenkatalog von Talsperren beinhaltet mindestens (Polczyk, 2011):

- Elektroarbeiten (alle 10-20 Jahre)
- Böschungssanierung (alle 20-30 Jahre)
- Stahlwasserbauarbeiten (Armaturen, Verschlüsse etc.) (alle 30-50 Jahre)
- Räumung Vorsperre (alle 10-20 Jahre)
- Sanierung Staubauwerk (alle 60-80 Jahre)

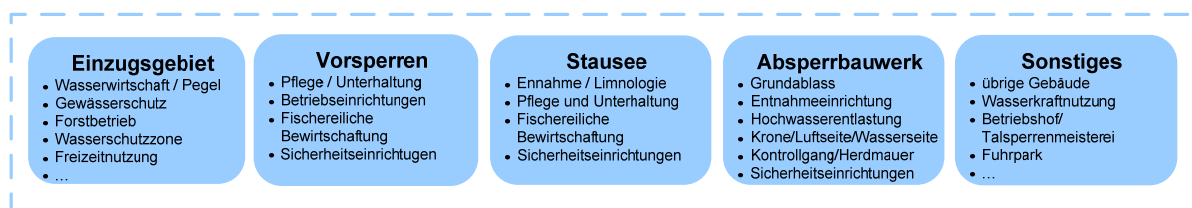


Abbildung 10-2: Bauwerk orientiertes Prozessschema für Talsperren

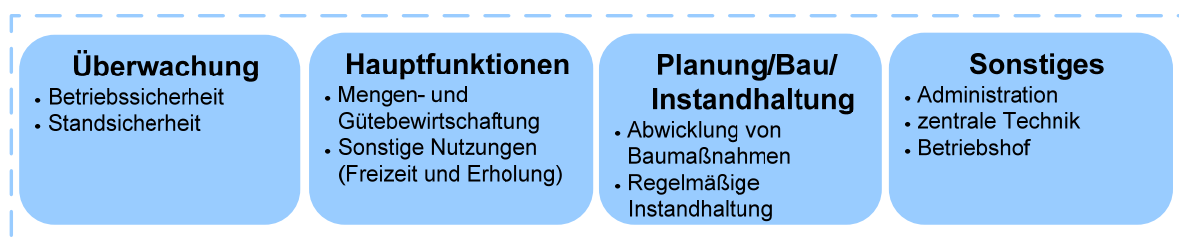


Abbildung 10-3: Aufgaben orientiertes Prozessschema für Talsperren

10.3 Emissionsquellen und funktionelle Einheit

Wie in den anderen bereits beschriebenen Bilanzierungsräumen (Kläranlage, Wasserwerk) müssen im Anschluss an die Definition der Prozesse alle Material- und Energiemengen ermittelt und nach Möglichkeit den einzelnen Teilprozessen zugeteilt werden. Anhand dieser

werden Umweltbelastungen abgeschätzt und die Prozesse identifiziert, die einer Detailanalyse unterzogen werden sollen. Es ist zu erwarten, dass bei der Talsperrenbewirtschaftung Stromverbrauch und Treibstoffe einen erheblichen Anteil der THG-Emissionen verursachen. Im Gegensatz zu den anderen Bilanzräumen ist außerdem zu vermuten, dass Baumaßnahmen aufgrund der Größe von Talsperren ebenfalls eine relevante Emissionsquelle darstellen.

Um die CO₂-Bilanz einer Talsperre richtig einordnen und beurteilen zu können, ist es wichtig, sog. Kontextinformationen in Form von Steckbriefen, mit allen relevanten Informationen zum Bauwerk, zu den Nutzungsarten, zum Einzugsgebiet usw. zu erfassen (siehe Anhang 14.5.6).

Direkte Emissionen entstehen nicht bei der Talsperrenbewirtschaftung sondern in den Talsperren selbst. Diese sind von vielen Faktoren abhängig, die sich gegenseitig beeinflussen (siehe Kap. 5.6.). Deshalb können hierzu erst dann Aussagen getroffen werden, wenn entsprechende Messwerte vorliegen, die wiederum Messprogramme über eine längere Zeit erfordern. In der CF-Bilanzierung werden sie vorerst nicht berücksichtigt.

Der Wasserverband Eifel-Rur hat im Rahmen eines Benchmarking das Aufgaben orientierte Prozessmodell zur Kostenerfassung in SAP abgebildet. Deshalb soll dieses Modell für die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen erster Pilotanlagen verwendet werden. In Abbildung 10-4 wurde es zusammen mit den relevanten Emissionsquellen schematisch dargestellt.

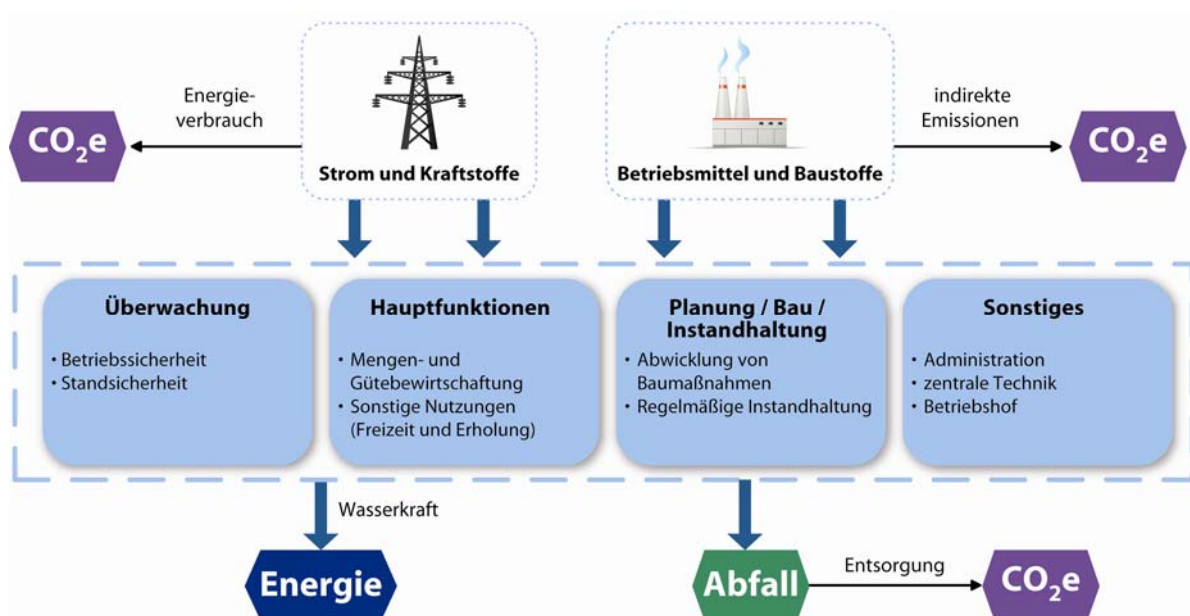


Abbildung 10-4: Emissionsquellen der Talsperrenbewirtschaftung

Die Festlegung einer funktionellen Einheit auf die der CF der Talsperrenbewirtschaftung bezogen werden soll, ist nicht so einfach möglich wie bei Prozessen, aus denen ein konkretes Produkt hervorgeht. Bei der Abwasserreinigung ist es der m³ gereinigtes Abwasser und bei der Trinkwasserversorgung der m³ Trinkwasser. Man kann den CF der Talsperrenbewirtschaftung nicht so ohne Weiteres auf den m³ Stauvolumen, die m² Stauffläche oder den km Uferlänge beziehen, da der Aufwand für die Bewirtschaftung nicht proportional mit diesen Größen zunimmt. Dieser hängt von zu vielen nicht beeinflussbaren naturräumlichen Faktoren ab (z. B. Vegetation in der Uferzone, Nutzung des Einzugsgebietes). Vorrangiges Ziel der CF-Bilanzierung ist hier aber in erster Linie kein Vergleich, sondern das vollständige Abbild des CF aus den Tätigkeiten der Wasserwirtschaftverbände und eine Darstellung der verschiedenen Anteile am Gesamt-CF der Wasserwirtschaft. Es soll gezeigt werden, bei welchen Tätigkeiten die meisten THG-Emissionen verursacht werden, um dort vorrangig mit Minderungsmaßnahmen ansetzen zu können.

Welche funktionelle Einheit sinnvoll ist, muss mit Experten aus den Verbänden zu gegebener Zeit noch diskutiert werden. Für einen ersten Ansatz könnte man den CF auf eine Zeiteinheit (z.B. 1 Jahr) beziehen.

10.4 Bilanzierung von Musteranlagen

Für eine grobe Bilanzierung des CF von Talsperren wurden vom WVER Daten aus dem Jahr 2010 zur Verfügung gestellt, anhand derer die Treibhausgasemissionen abgeschätzt werden konnten (siehe Tabelle 10-1). Anhang 14.5.6 enthält die Steckbriefe der einzelnen Talsperren mit weiteren notwendigen Kontextinformationen, die für Vergleichszwecke herangezogen werden müssen. Nicht enthalten sind Verbrauchsmengen für Baumaßnahmen und Fremdleistungen, die insbesondere bei der Rurtalsperre den Treibstoffverbrauch noch deutlich erhöhen werden.

Emissionsquellen bei der Bewirtschaftung der 4 Talsperren des WVER sind im Wesentlichen Strom, Kraftstoffe (Diesel und Benzin) und Heizöl. Die Kraftstoffe werden für Mahd und Gehölzarbeiten sowie Kontrollfahrten und Transporte (auch Betriebswerkstatt und Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik) verbraucht. Heizöl und Flüssiggas wird zur Beheizung der Dienstgebäude, einschließlich Dienstwohnungen verwendet. Die Menge der THG-Emissionen an den ausgewählten Talsperren bewegte sich im Jahr 2010 ungefähr zwischen 111 und 211 t CO₂e, wobei diese unabhängig von der Größe der Talsperren sind (siehe Kenndaten in Tabelle 10-1). Es handelt sich dabei jedoch um Mindestwerte, die in weiteren Untersuchungen noch um die Emissionen durch Fremdleistungen und Baumaßnahmen ergänzt werden müssen.

Tabelle 10-1: Kenngrößen, Verbrauchsmengen und Treibhausgasemissionen von 4 Talsperren des WVER

	Oleftalsperre	Urftalsperre	Wehebachtalsperre	Rurtalsperre
Kenngrößen				
Stauvolumen [Mio. m³]	19,30	19,30	25,10	195,00
Staufläche [ha]	101,00	203,00	158,50	768,00
Uferlänge [km]	12,66	21,42	18,50	50,00
Verbrauchsmengen				
Kraftstoffe [l]	10.110	10.690	5.010	17.290
Diesel (ca. 75 %) [l]	7.583	8.018	3.758	12.968
Benzin (ca. 25 %) [l]	2.528	2.673	1.253	4.323
Strom [kWh]	87.700	115.000	66.000	247.500
Flüssiggas [l]	2.810	20	5.800	50
Heizöl [l]	11.900	9.100	14.300	4.700
CO₂ e [t/a]	126	129	111	211

Anmerkung: Im Bewirtschaftungsgebiet der Rurtalsperre werden große Flächen durch Fremdleister unterhalten, die noch nicht in der CO₂-Bilanz berücksichtigt wurden:

- Mäharbeiten: 47970 m²
- Mäh- und Freischneidearbeiten: 67595 m²
- Hecken schneiden: 3093 m
- Rückschnitt: 4555 m

In Abbildung 10-5 bis Abbildung 10-7 wurde jeweils die prozentuale Verteilung der THG-Emissionen auf die verschiedenen Quellen für die 4 Talsperren dargestellt. Die Anteile von Diesel und Benzin am Gesamtkraftstoffverbrauch wurden vom WVER abgeschätzt.

Die Verteilung der prozentualen Anteile des CF auf die einzelnen Emissionsquellen ist bei den Talsperren sehr unterschiedlich. So stellt der Stromverbrauch an der Rurtalsperre mit 67 % die größte Emissionsquelle dar, während dieser bspw. an der Wehetalsperre nur bei 34 % liegt. Dafür entfallen an der Wehetalsperre über 50 % auf Heizöl und Flüssiggas (zur Beheizung). Die Emissionen durch den Treibstoffverbrauch (Diesel, Benzin) sind an der Olef-, der Urft- und der Rurtalsperre mit ca. 25 % annähernd gleich groß.

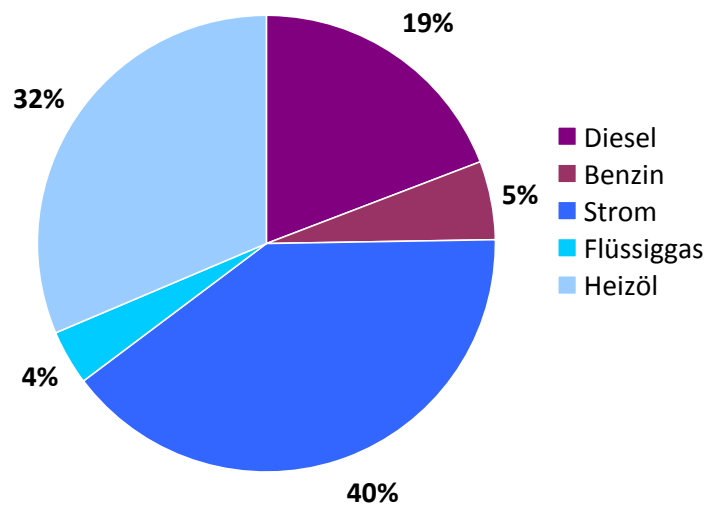


Abbildung 10-5: Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der Oleftalsperre

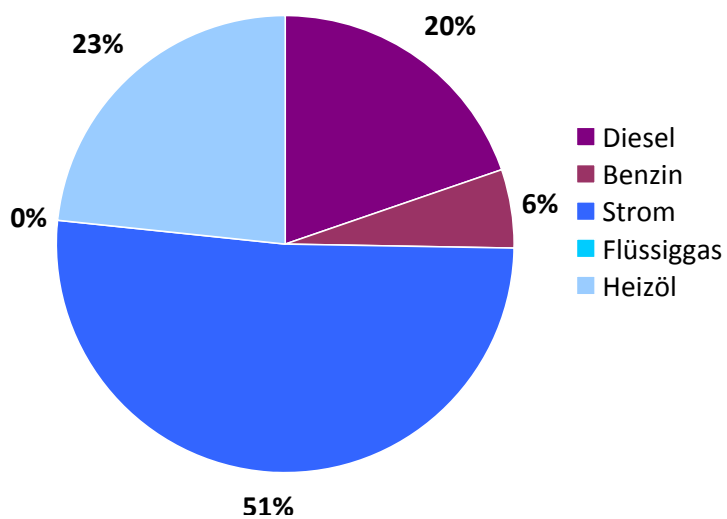


Abbildung 10-6: Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der Urfttalsperre

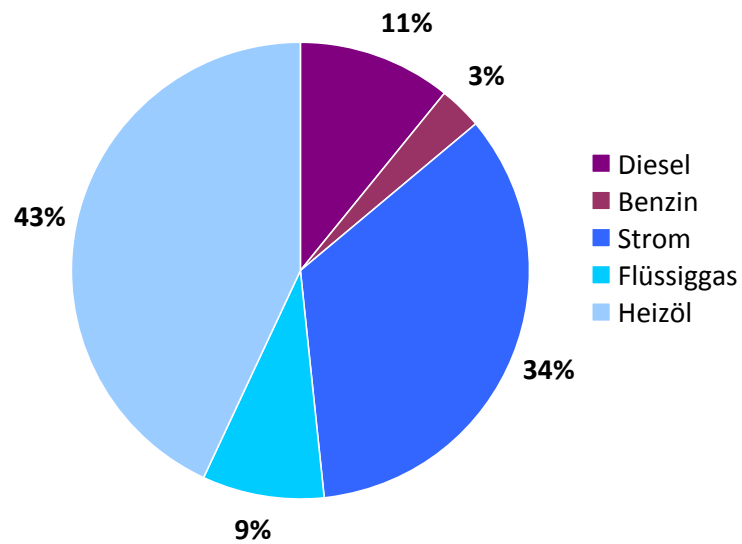


Abbildung 10-7: Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der Wehetalsperre

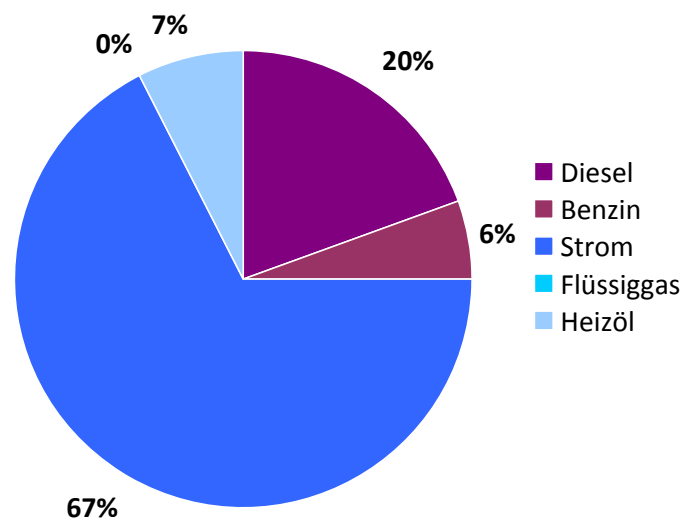


Abbildung 10-8: Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der Rurtalsperre

11 Bilanzierung von Oberflächengewässern

11.1 Ausgangssituation und Besonderheiten

Durch die Arbeiten der Wasserverbände hat sich die Qualität der Flüsse in den letzten Jahren deutlich verbessert. Derartige Bemühungen sind natürlich immer mit einem Verbrauch von Energie, Kraftstoffen und Materialien verbunden, der wiederum Treibhausgasemissionen verursacht. Interessant wäre hier eine Gegenüberstellung dieser Emissionen und der Entwicklung von ökologischer und chemischer Gewässerqualität in den letzten Jahren. Eine umfassende Beurteilung des ökologischen Nutzens einzelner Maßnahmen könnte mit einer Bilanzierung des CF unterstützt werden. Dazu zählen vor allem auch die Renaturierungsmaßnahmen, die zwar während ihrer Durchführung THG-Emissionen verursachen, aber unter bestimmten Bedingungen nachfolgend geringeren Unterhaltungsaufwand erfordern (z.B. weniger zu mähende Flächen).

Die Voraussetzungen für die Bilanzierung von Flussgebietsabschnitten sind ähnlich denen bei Talsperren. Auch die Flussgebietsbewirtschaftung ist abhängig von naturräumlichen Gegebenheiten und von den Nutzungsarten der Flüsse. Eine Vergleichbarkeit ist deshalb nur unter homogenen Randbedingungen oder bei Betrachtung von Einzelprozessen gewährleistet.

Für die Flussgebietsbewirtschaftung sind bisher noch keine Ansätze zur Festlegung von einheitlichen Prozessen für Bilanzierungszwecke bekannt. Es müssen deshalb zuerst Prozesse festgelegt werden, für die eine Datenerhebung sinnvoll und möglich ist und die für alle Wasserverbände zutreffen.

11.2 Festlegung der Systemgrenzen und des Prozessnetzes

Um ein einheitliches Verständnis für den CF der Flussgebietsbewirtschaftung herzustellen, wurden kompetente Mitarbeiter der vier Auftraggeber in die Erarbeitung der Bilanzierungssystematik einbezogen. Wichtigstes Ziel war zunächst, die Systemgrenzen für die Flussgebietsbewirtschaftung festzulegen und zugehörige Prozesse zu definieren. Für ein einheitliches und systematisches Vorgehen wurden folgende drei Hauptprozesse identifiziert:

- Gewässerunterhaltung
- Regelung des Wasserabflusses
- Baumaßnahmen

Diese können entsprechend der zugehörigen Maßnahmen in Teilprozesse unterteilt werden, wobei nicht alle Teilprozesse für jedes Unternehmen zutreffen.

Ausschlaggebend für die Prozessdefinition war vor allem die Datengrundlage in den Verbänden, d. h., für welche Haupt- und Teilprozesse können In- und Outputdaten erfasst bzw. abgeschätzt werden.

Der Prozess der Gewässerunterhaltung beinhaltet die Maßnahmen:

- Mahd
- Gehölzpflege
- Entkrautung / Sohlschnitt
- Sonstiges (wie Administration, Betriebshöfe)

Zum Prozess „Regelung des Wasserabflusses“ gehören die Hochwasserrückhaltebecken sowie die Vorflut- und Hochwasserpumpanlagen.

Baumaßnahmen müssen einzeln bilanziert und ggf. über die Lebensdauer jeweils einem Jahr zugeteilt werden. Dies gilt bspw. für den Bau von Hochwasserschutzdämmen und Hochwasserrückhaltebecken. Renaturierungsmaßnahmen dagegen sind Umgestaltungsmaßnahmen ohne Lebensdauer, deren Carbon Footprint bezogen auf die Länge des umgestalteten Flussabschnittes angegeben werden könnte. Grundlage für die Auswahl der zu bilanzierenden Maßnahmen bilden die jeweiligen Baumaßnahmenkataloge der Verbände.

In Abbildung 11-1 wurde der Bilanzraum Flussgebietsbewirtschaftung mit den zu berücksichtigenden Haupt- und Teilprozessen zusammengefasst dargestellt. Für die Baumaßnahmen wurden nur Beispiele aufgeführt, die nach Bedarf ergänzt werden können.

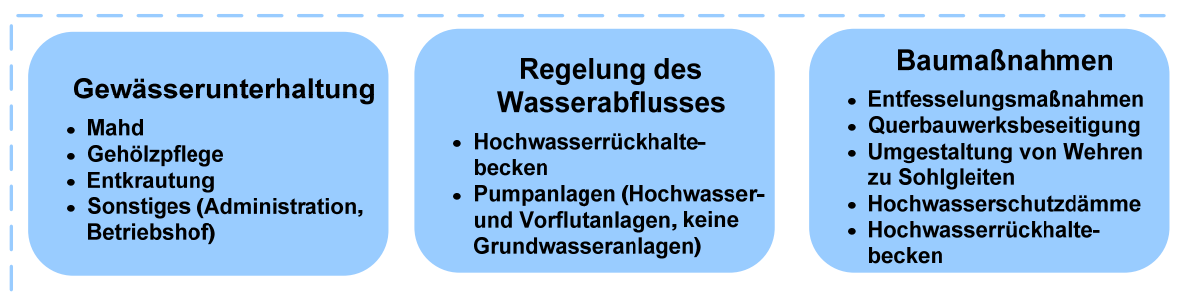


Abbildung 11-1: Haupt- und Teilprozesse im Bilanzraum Flussgebietsbewirtschaftung

Interessant wäre aus Sicht der Verbände auch eine separate Bilanzierung aller Hochwasserschutzmaßnahmen in den bewirtschafteten Gebieten. Da eine Bilanzierung der Flussgebietsbewirtschaftung auf Teilprozessebene angestrebt wird, ist es ohne größeren Aufwand möglich die entsprechenden Teilprozesse, die dem Hochwasserschutz dienen herauszuziehen. Diese werden dann gemeinsam mit den Hochwassertalsperren im

Bilanzraum Hochwasserschutz zusammengefasst und separat bilanziert (siehe Abbildung 11-2).

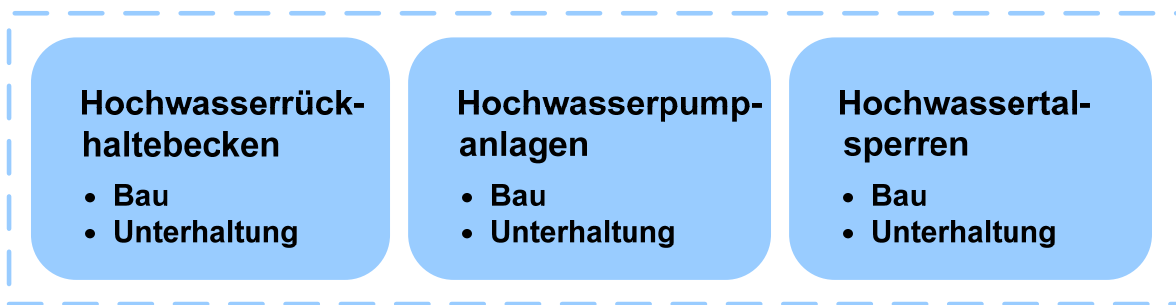


Abbildung 11-2: Prozesse im Bilanzraum Hochwasserschutz

11.3 Emissionsquellen und funktionelle Einheit

Quellen für die Emissionen von Treibhausgasen bei der Gewässerunterhaltung sind vorwiegend Energie- und Treibstoffverbrauch sowohl bei der Maßnahmendurchführung als auch beim Abtransport der Abfälle. Es handelt sich dabei demnach vordergründig um indirekte Emissionen. Auch weitere, aus dem Verbrauch von anderen Betriebs-, Hilfs- und Baustoffen bzw. in den entsprechenden Vorketten entstandene Emissionen (Herstellung und Transport) müssen bei der Bilanzierung berücksichtigt werden, wobei deren Anteil als sehr gering eingeschätzt wird. Dazu gehören bspw. Schmier- und Reinigungsmittel.

Direkte Emissionen entstehen, wie bei den Talsperren, nicht bei der Gewässerbewirtschaftung, sondern in den Gewässern selbst. Auch hier wären erst Messprogramme aufzusetzen, um korrekte Aussagen treffen zu können. Interessant wäre in diesem Zusammenhang bspw., wie sich die direkten Emissionen aus Gewässern in Anhängigkeit von den Bewirtschaftungs- und Renaturierungsmaßnahmen verändern.

Ein komplettes Abbild des Bilanzraumes mit allen indirekten und direkten Emissionsquellen sowie der zu berücksichtigenden Einflüsse gibt Abbildung 11-3 wider. Im Rahmen des Projektes werden die direkten Emissionen aus Gewässern zunächst nicht berücksichtigt.

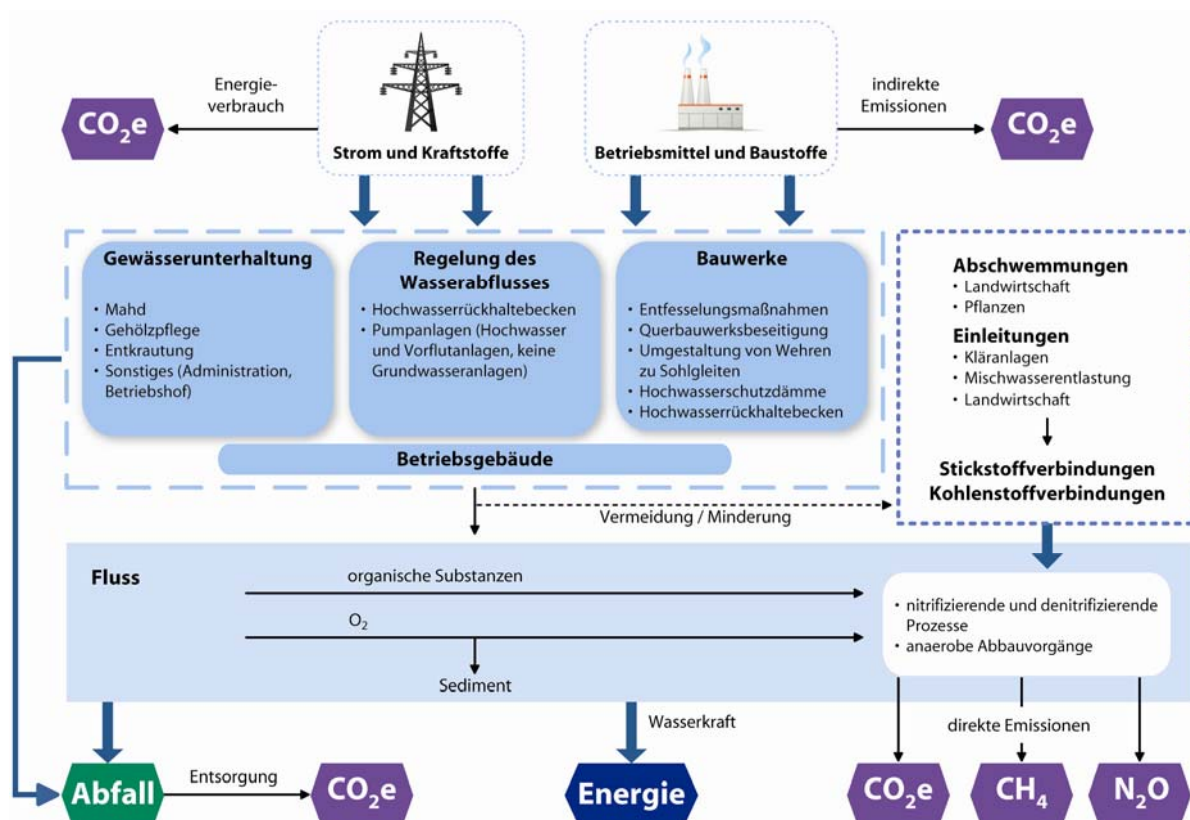


Abbildung 11-3: Emissionsquellen der Flussgebietsbewirtschaftung

Wasserkraftwerke an den Flüssen müssten nur in die Bilanzierung einbezogen werden, wenn diese auch von den Wasserverbänden unterhalten werden, was bei den vier Auftraggebern nicht der Fall ist.

Im Rahmen einer Grobanalyse sollen Material- und Energiemengen den Prozessen zugeteilt und Umweltbelastungen abgeschätzt werden. Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse können die relevanten Prozesse für eine Detailanalyse identifiziert werden. Zusätzlich zu den Mengenströmen werden sog. Kontextinformationen in Form von Steckbriefen für die Flussgebiete erfasst (siehe Anhang 14.5.3), um die CO_2 -Bilanz im Vergleich richtig einordnen und begründen zu können.

Wie bei den Talsperren (Kap. 10.3) ist die Festlegung einer funktionellen Einheit, auf die der CF der Gewässerbewirtschaftung bezogen werden soll, noch nicht geklärt. Der Fluss-km als Bezugsgröße ist als kritisch anzusehen, da der Aufwand für die Bewirtschaftung nicht proportional mit der Gewässerlänge zunimmt. Dieser hängt von zu vielen nicht beeinflussbaren naturräumlichen Faktoren ab (z. B. Beschaffenheit des Bodens, Gefälle, zu mähende Flächen, Bergbau). Wie bei den Talsperren kann aber für einen ersten Ansatz eine Zeiteinheit (z.B. 1 Jahr) als Bezugsgröße verwendet werden.

11.4 Musterbilanzierung

11.4.1 Gesamtbilanz für Flussgebiete

Für den Erftverband und die LINEG wurde für das Jahr 2010 eine erste Abschätzung des CF vorgenommen. Dieser basiert auf den Mengenströmen, die bei den Verbänden selbst anfallen. Fremdleistungen konnten in der Bilanzierung noch nicht berücksichtigt werden. Betriebshöfe, Werkstätten und Lager die auch von den Abteilungen Abwasser benutzt werden, wurden jeweils zur Hälfte den Gewässern zugeteilt.

Die für die Bilanzierungen verwendeten Basisdaten der Verbände und die daraus jeweils berechneten THG-Emissionen können in Anhang 14.5.1 eingesehen werden. Die Emissionsfaktoren zur Berechnung der THG-Emissionen aus den Mengenströmen sind in Anhang 14.1 enthalten.

Erftverband:

Der Erftverband unterhält ca. 1200 km Gewässer. Die Bewirtschaftung dieser Gewässer war im Jahr 2010 laut einer ersten Schätzung mit Treibhausgasemissionen von mindestens 437 t CO₂e verbunden. Davon wurden 59 t durch den Stromverbrauch und 361 t durch den Treibstoffverbrauch verursacht. Der Rest von 17 t entfiel auf Gas und Heizöl für die Beheizung eines Bauhofes und einer Gewässermeisterei. Aus Abbildung 11-4 geht hervor, dass der Dieserverbrauch die meisten Emissionen verursacht. Benzin und Stihlsprit für Geräte nehmen nur einen geringen Anteil ein. Der Treibstoff wurde für Baumaßnahmen, Gehölz- und Mäharbeiten benötigt. Der Anteil von 14 % durch den Stromverbrauch verteilt sich auf 8 Betriebshöfe (7 Gewässermeistereien und 1 Bauhof), 4 Hochwasserrückhaltebecken (HRB), 9 Wehranlagen und 1 Pumpwerk (vergleiche Abbildung 11-5). Zwei Gewässermeistereien werden mit Strom, der auf einer Kläranlage aus Faulgas erzeugt wird, versorgt und wurden deshalb nicht mit in die Bilanz einbezogen. Der relativ hohe Anteil der Betriebshöfe am Stromverbrauch wird wahrscheinlich durch die größtenteils elektrische Beheizung verursacht.

In eine vollständige Bilanzierung müssen zusätzlich auch Emissionsanteile, die durch das Verwaltungsgebäude und durch Labore verursacht werden, zugeteilt werden.

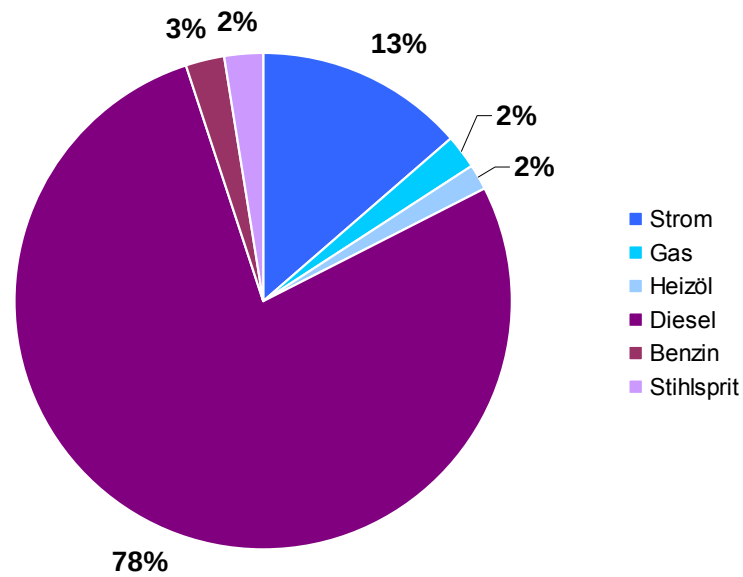


Abbildung 11-4: Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF des Erftverbandes

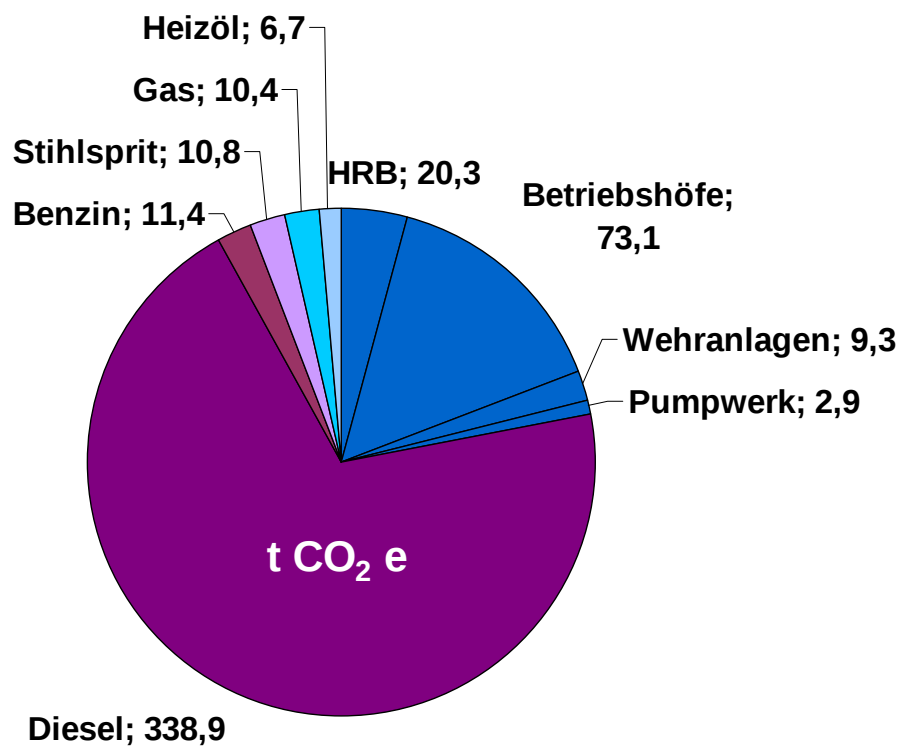


Abbildung 11-5: Verteilung der Treibhausgasemissionen beim Erftverband

LINEG:

Die LINEG bewirtschaftet ca. 379 km Gewässer, die größtenteils bergbaulichen Senkungen unterliegen und demzufolge zahlreiche Pumpanlagen zur Unterhaltung erfordern. Im Gegensatz zum Erftverband werden die Treibhausgasemissionen hier nicht hauptsächlich durch den Treibstoffverbrauch sondern durch den Stromverbrauch für die Pumpen verursacht (siehe Abbildung 11-6). Ersten Schätzungen zufolge wurden im Jahr 2010 durch die Gewässerbewirtschaftung der LINEG Emissionen von mindestens 6550 t CO₂e verursacht. Ca. 6116 t entfielen dabei auf den Stromverbrauch von 75 Vorflutpumpanlagen (5713 t), 8 Hochwasserpumpanlagen (290 t) sowie Werkstatt und Lager (88 t). Nur ca. 6 % wurden durch den Verbrauch von Diesel und geringfügige Anteile (kleiner 1 %) durch Benzin und LPG (Autogas) verursacht (vergleiche Abbildung 11-7). Auch wenn in den Treibstoffmengen noch einzelne Positionen fehlen und weitere Mengenströme wie Schmier- und Reinigungsmittel noch nicht erfasst wurden, ist keine wesentliche Veränderung der Gesamtbilanz zu erwarten.

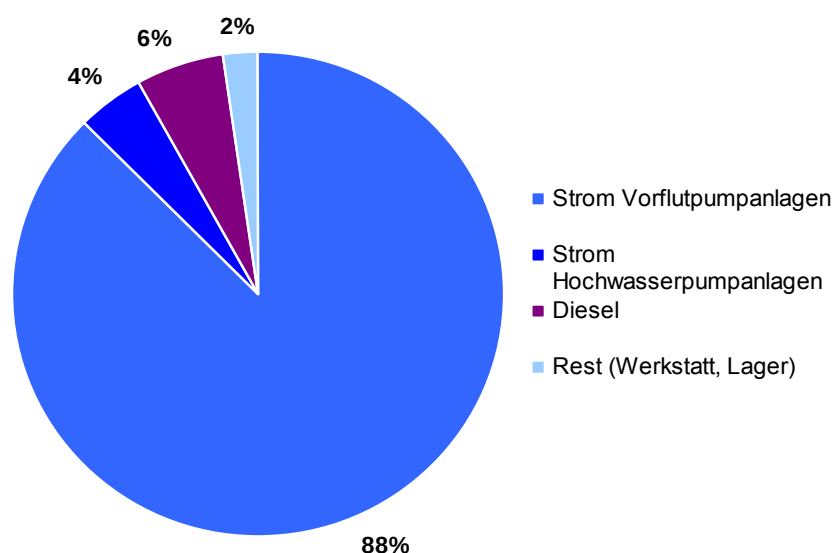


Abbildung 11-6: Anteile der Emissionsquellen am Gesamt-CF der LINEG

Für eine vollständige Bilanzierung müssen neben den Fremdleistungen zukünftig auch noch Anteile aus dem Verwaltungsgebäude und dem Zentrallabor der LINEG zugeteilt werden. Insgesamt wurden hierfür Emissionen von 173 t (Verwaltungsgebäude) und 124 t (Zentrallabor) ermittelt.

Die ebenfalls von der LINEG betriebenen 186 Grundwasserpumpen gehören nicht zum Bilanzraum Flussgebietsbewirtschaftung sondern zu den Pumpwerken. Mit einem Energieverbrauch von insgesamt ca. 12.016 kWh im Jahr 2010 haben diese einen noch

größeren Anteil an der Gesamtbilanz der LINEG als die Vorflut- und Hochwasserpumpanlagen zusammen.

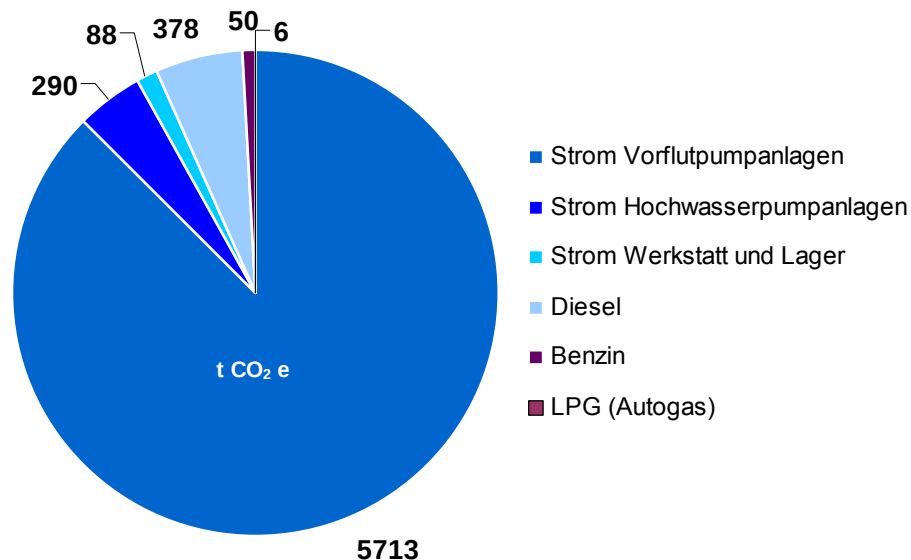


Abbildung 11-7: Verteilung der Treibhausgasemissionen bei der LINEG

11.4.2 Bilanzierung einer Renaturierungsmaßnahme

Für die Musterbilanzierung einer Renaturierungsmaßnahme wurden vom Erftverband überschlägige Daten zur Verfügung gestellt. Bei dieser ökologischen Gewässerausbaumaßnahme wurde ein Flussabschnitt (Gillbach) verlegt, um diesem wieder mehr Raum zu geben. Die Arbeiten wurden innerhalb einer Woche durchgeführt und mit 5 Betriebsstunden pro Arbeitstag (Schätzung) bilanziert. Treibhausgasemissionen sind hierbei durch den Verbrauch von Kraftstoffen der eingesetzten Fahrzeuge und des Baggers entstanden. Die Basisdaten, die zur Berechnung des Kraftstoffverbrauches verwendet wurden, sind in Anhang 14.5.2 enthalten. Mit diesen Daten und der o. g. Betriebsdauer erfolgte die Berechnung der Verbrauchsmengen und der Treibhausgasemissionen. Insgesamt wurden durch diese Maßnahme Emissionen von ca. 2,3 t CO₂-Äquivalenten verursacht (vergleiche Abbildung 11-8).

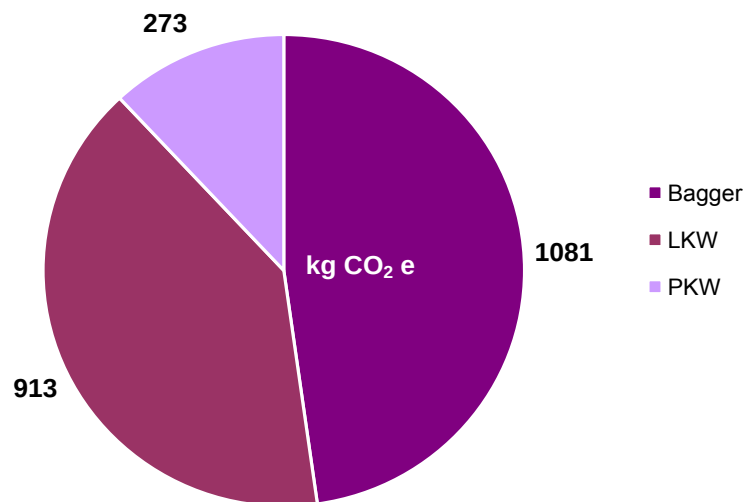


Abbildung 11-8: THG-Emissionen bei einer Renaturierungsmaßnahme des Erftverbandes

11.4.3 Bilanzierung einer Sohlschnittmaßnahme

Zu den regelmäßig in bestimmten Gewässerabschnitten notwendigen Maßnahmen gehört der Sohlschnitt (Entkrautung). Besonders in Flüssen mit nur geringem Gefälle muss diese relativ häufig durchgeführt werden. Dazu zählt bspw. die Niers. Auf der Grundlage von überschlägigen Verbrauchsdaten des Niersverbandes wurde nachfolgend eine Musterbilanzierung für solch eine Entkrautungsmaßnahme vorgenommen.

Die betrachtete Maßnahme wurde auf 4 km Länge der Niers mit einem Motorboot durchgeführt. Folgende Teilmaßnahmen sind dabei zu berücksichtigen:

- Betrieb des Mähbootes
- An- und Abfahrten des Personals
- Aufnahme und Verladung des Krautes
- Transport des Mähbootes
- Transport des Krautes zur Kompostierung

Bei den Emissionsquellen handelt es sich demnach vorrangig um den Treibstoff Diesel. Verbrauchsmengen von Hilfsstoffen, wie z. B. Schmierstoffe, wurden nicht berücksichtigt.

Anhand der geschätzten Treibstoffmengen (siehe Anhang 14.5.3) wurden THG-Emissionen von ca. 859 kg pro Maßnahme berechnet. Die Aufteilung auf die Teilmaßnahmen wurde in Abbildung 11-9 dargestellt. Die Entkrautung wird in dem betrachteten Flussabschnitt 6 bis 8 Mal jährlich durchgeführt. Bei Annahme einer mittleren Anzahl von 7 ergeben sich THG-Emissionen von ca. 6 t CO₂e pro Jahr.

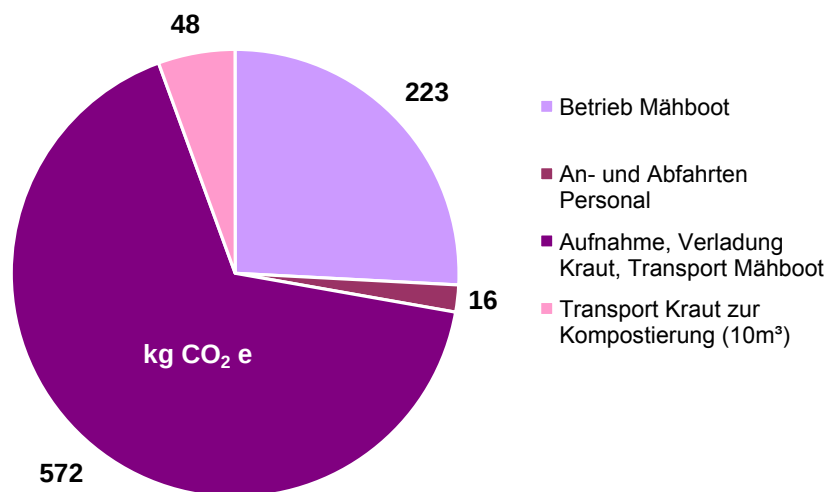


Abbildung 11-9: THG-Emissionen der Teilmaßnahmen bei einer Entkrautung eines 4 km langen Niers-Abschnittes

11.4.4 Bilanzierung von Hochwasserrückhaltebecken

Die CO₂-Bilanz für die Bewirtschaftung von Hochwasserrückhaltebecken (HRB) kann unabhängig von deren Größe sehr unterschiedlich ausfallen. Nachfolgend wurden die THG-Emissionen für zwei Muster-HRB des Wasserverbandes Eifel-Rur abgeschätzt. Dabei wurden nur die regelmäßigen Pflegearbeiten (Mahd) einschließlich An- und Abfahrten sowie Abfalltransporte berücksichtigt, keine Instandhaltungs- und Bauarbeiten. Dafür wird überwiegend Treibstoff (Diesel, jeweils ein Benzin-Fahrzeug) für die eingesetzten Maschinen und Fahrzeuge (siehe Anhang 14.5.4) verbraucht.

Das kleine HRB hat ein Stauvolumen von ca. 13.500 m³ und ein Einzugsgebiet von ca. 250 ha. Hier werden regelmäßig Staudamm sowie die gesamte Einstaufläche gemäht und entkrautet. Es wurden anhand des Treibstoffverbrauches im Jahr 2010 für diese Arbeiten CO₂e-Emissionen von ca. 1,8 t berechnet.

Der Stauraum des großen Beckens beträgt ca. 62.000 m³ und das Einzugsgebiet hat eine Fläche von ca. 6.250 ha. Diese wird landwirtschaftlich genutzt, so dass lediglich der Staudamm regelmäßig gemäht werden muss. Bei dieser Arbeit wurden im Jahr 2010 ca. 1 t CO₂ e verursacht.

In eine vollständige CO₂-Bilanz müssen auch die Mengenströme für Instandhaltungs- und Baumaßnahmen einbezogen und der Treibstoffverbrauch für die Kontrollfahrten abgeschätzt werden.

Insgesamt betreibt der WVER 50 HRB, denen somit schätzungsweise 70 t CO₂e jährlich (bei einem mittleren Wert von 1,4 t pro Anlage) zugeschrieben werden müssen.

12 Ausblick

Nach Abschluss der Projektphase I soll eine Übertragung der entwickelten Bilanzierungssystematik auf reale wasserwirtschaftliche Anlagen erfolgen. Die Ergebnisauswertung wird die unterschiedlichen Beiträge zum Gesamt-Carbon-Footprint einer Anlage oder eines Prozesses herausarbeiten und die prioritären Handlungsfelder in Bezug auf Minderungspotenziale aufdecken. Mit den für jedes Aufgabengebiet entwickelten Musteranlagen wurde einerseits die Praxistauglichkeit der entwickelten Systematik überprüft und teilweise schon anpasst sowie andererseits die Bilanzierungsräume weitgehend festgelegt.

Die bisherigen überschlägigen Musterbilanzierungen verdeutlichen, dass eine Analyse von möglichst vielen Einzelanlagen der Wasserwirtschaft in jedem Fall sinnvoll ist, weil die Schwankungsbreite sowohl bei den Kläranlagen aber bspw. auch bei der Flussgebietsbewirtschaftung (440 und 6600 t CO₂e pro Jahr) sehr groß ist. Die Ergebnisse einer Anlage können in den meisten Fällen nicht ohne Weiteres auf andere übertragen werden. Anhand der Ergebnisse von mehreren Pilotanlagen, könnte man aber versuchen, für die einzelnen Untersuchungseinheiten Klassen zu bilden, die sich durch nicht beeinflussbare Randbedingungen unterscheiden. Ziel ist es, im Anschluss daran Größenordnungen der THG-Emissionen für die einzelnen Klassen anzugeben, um damit ein Gesamtbild in der Wasserwirtschaft zeichnen zu können.

Eine Bilanzierung jeweils auf Teilprozessebene, zumindest für die Emissionsquellen mit den größten Anteilen am Gesamt-CF, macht die Analyse transparenter und eine Identifizierung von Minderungspotentialen leichter. So fallen bspw. bei der Gewässer- und Talsperrenbewirtschaftung teilweise große Mengen an Biomasse an, deren Abtransport zur Kompostierung Treibstoff verbraucht. Der WVER hat dazu 2010 bereits eine Potentialanalyse für seinen Bauhof bezüglich erneuerbarer Energien durchgeführt und u.a. festgestellt, dass sich die Verwendung von Holzhackschnitzeln für Beheizungszwecke sowohl ökologisch als auch finanziell lohnen würde (Ottersbach, 2010). Hohen Treibstoffverbräuchen könnte man außerdem durch eine Optimierung der Fahrten und eine langfristige Umstellung auf emissionsärmere Fahrzeuge begegnen. Hat man aber nur eine Aussage über die Gesamtemissionen bspw. bei der Flussgebietsbewirtschaftung vorliegen, ist es eher schwierig, prioritäre Bereiche zu identifizieren, in denen wirksame Maßnahmen ergriffen werden könnten.

Auf Grundlage der beschriebenen Musterbilanzierungen sollen für eine systematische Datenerhebung an Pilotanlagen einheitliche Erfassungsbögen erstellt werden, um zu gewährleisten, dass

- die Datenerhebung vollständig ist

- eine strukturierte Lieferantenbefragung möglich ist.
- eine Priorisierung von Minderungspotentialen unterstützt wird.

Auf der Basis der entwickelten prozessorientierten Methodik kann der Carbon Footprint für jede wasserwirtschaftliche Aktivität eines Verbandes oder eines Wasserversorgers ermittelt und bewertet werden. Dies kann anschließend für einen gesamten Verband, ein Flussgebiet, ein Bundesland oder für ganz Deutschland zusammengeführt werden. Der Beitrag der Wasserwirtschaft zu den Minderungszielen der deutschen Anpassungsstrategie wird damit messbar und transparent. Gleichzeitig können die beteiligten Verbände ihre Aktivitäten zum Klimaschutz gut darstellen und in der Öffentlichkeit kommunizieren.

13 Literatur

- Bastviken D. *et al.* (2004): Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics. *Global Biogeochemical Cycles*, VOL. 18
- BDI (2010). Produktbezogen Klimaschutzstrategien. Produkt Carbon Footprint verstehen und nutzen. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
- BIS (2008): Life Cycle Assessment Methodologies and Tools for assess Greenhouse Gas Emissions and Carbon Footprints. Paper IB-IGT [SG-08] 34. Papers from the 3rd IB-IGT Steering Group Meeting. Department for Business, Innovation and Skills, London
- BMU (2010): Produktbezogene Klimaschutzstrategien. Product Carbon Footprint verstehen und nutzen. Leitfaden des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- Boulos P.F., Bros C.M. (2010): Assessing the carbon footprint of water supply and distribution systems. *Journal AWWA*, November 2010
- ATV-DVWK (2000): ATV-DVWK-A 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Regelwerk ATV-DVWK. Hennef.
- BHKW-Infozentrum. 2010, from <http://www.bhkw-infozentrum.de/erlaeuter/treibhausgas.html>.
- Boyle, W. C. (1977): Energy recovery from sanitary landfills. *Microbial Energy Conversion*. A. G. B. Schlegel, J. . Oxford, Pergamon Press: 119–138.
- BSI (2008): PAS-2050 - How to assess the carbon footprint of goods and services. London, British Standards Institution. PAS 2050:2008.
- BSI (2008): Publicly Available Specification PAS-2050 - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. London, British Standards Institution. PAS 2050:2008.
- Buswell, A. M. (1936): *Anaerobic fermentations*. Illinois, Div. State Water Survey
- Clemes, J., Haas, B. (1997): "Nitrous Oxide Emissions in Sewer Systems." *Acta hydrochim. hydrobiol.* 25(2): 96-99.
- Dean, J. A. (1992): *Lange's handbook of chemistry*. New York, McGraw-Hill, Inc.
- Delwiche, C. C., Bryan, B. A. (1976): "Denitrification." *Ann. Rev. Microbiol.* 30: 241-262.
- Durth, A., Hartmann, K.-H., *et al.* (2005): Stand der Klärschlammbehandlung und -entsorgung in Deutschland. Hennef, DWA.

- DVGW (2010): Handbuch Energieeffizienz / Energieeinsparung in der Wasserversorgung. Bonn, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. Technisch-wissenschaftlicher Verein.
- DWA (2005): DWA-A 147 Betriebsaufwand für die Kanalisation – Betriebsaufgaben und Häufigkeiten. Henef, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- Eggleston, H. S., Buendia, L., *et al.* (2006): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama, IPCC.
- EUWID (2010): "Wassersektor in Großbritannien soll CO₂-Ausstoß deutlich senken." EUWID(41).
- Eyerer, P., Reinhardt, H.-W. (2000): Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden - Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung. Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser Verlag.
- Firestone, M., Davidson, E. (1989): Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere. M. Andreae, Schimel, D. Chichester, Wiley.
- Friedrich, H., Fehrenbach, H., *et al.* (2010): "Ökobilanz der verschiedenen Entsorgungswege des Klärschlammes." Müll und Abfall 10(2): 558-568.
- Frijns, J., Mulder, M., *et al.* (2008): Op weg naar een klimaatneutrale waterketen. Utrecht, STOWA.
- Galletti, S., Kowalski, M., *et al.* (2010): Workbook for estimating operational GHG emissions - version 4. London, UK Water Industry Research Limited. 4.
- Geywitz-Hetz, S., Bußmann, M., *et al.* (1993): "Einfluß einiger Umweltfaktoren auf die N₂O-Bildung durch Belebtschlamm unter anoxischen Bedingungen." Acta. Hydrochim. Hydrobiol. 21: 258-266.
- Goreau, T. J., Kaplan, W. A., *et al.* (1980): "Production of NO₂- and N₂O by Nitrifying Bacteria at Reduced Concentrations of Oxygen." Applied and Environmental Microbiology 40(3): 526-532.
- Griffiths-Sattenspiel, B., Wilson, W. (2009): The Carbon Footprint of Water. Portland, River Network.
- Guérin, F., Abril, G., *et al.* (2007): "Gas transfer velocities of CO₂ and CH₄ in a tropical reservoir and its river downstream." Journal of Marine Systems 66: 161–172.
- Guisasola, A., de Haas, D., *et al.* (2008): "Methane formation in sewer systems." WATER RESEARCH 42(6-7): 1421-1430.

- Guisasolaa, A., Sharmaa, K. R., *et al.* (2009): "Development of a model for assessing methane formation in rising main sewers." *water research* 43.
- Hospido, A., Carballa, M., *et al.* (2010): "Environmental assessment of anaerobically digested sludge reuse in agriculture: Potential impacts of emerging micropollutants." *WATER RESEARCH* 44(10): 3225-3233.
- Huttunen, J. T., Alm, J., *et al.* (2003): "Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential antropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions." *Chemosphere* 52: 609-621.
- IPCC (2001): CH₄ and N₂O emissions from waste water handlings. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, International Panel for Climate Change.
- IPCC (2006): Incineration and open burning of waste. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, International Panel for Climate Change.
- IPCC (2006): Wastewater Treatment and Discharge. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel for Climate Change.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genua, IPCC.
- Itokawa, H., Hanaki, K., *et al.* (2001): "Nitrous oxide production in high-loading biological nitrogen removal process under low COD/N ratio condition." *Water Research* 35(3): 657-664.
- Janse, T., Wiers, P. (2006): "Broeikasgasemissie vanuit de Amsterdamse Waterketen." *H2O* 39(18): 87-90.
- Johnke, B. (2003): Emissionsberichterstattung - Inventarstellung für das Jahr 2002. Berlin.
- Kampschreur, M. J., Temmink, H., *et al.* (2009): "Nitrous oxide emission during wastewater treatment." *water research* 43: 11.
- Kilchmann, A., Kamm, U., *et al.* (2004): Energie in der Wasserversorgung - Ratgeber zur Energiekosten- und Betriebsoptimierung. Zürich, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW).
- Kogelschatz, U., Baessler, P. (1987): "Determination of Nitrous-Oxide and Dinitrogen Pentoxide Concentrations in the Output of Air-Fed Ozone Generators of High-Power Density." *Ozone-Science & Engineering* 9(3): 195-206.
- LfU (2005): Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten. Karlsruhe, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

- Linke, B., Mähnert, P., *et al.* (2006): Grundlagen und Verfahren der Biogasgewinnung. Biogas in der Landwirtschaft Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg. D. Woidke. Potsdam, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg. 3.
- Matsubara, T., Mori, T. (1968): "Studies on denitrification." J. Biochem. 64(6): 869-871.
- Merkel, W., Graf, P. (2007): Benchmarking Talsperrenbetrieb, Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V. (ATT)
- Mollekopf, N., Polster, A., *et al.* (2006): Verbesserung von Entschwefelungsverfahren in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Dresden, Technische Universität Dresden: 112.
- Müller, E. A., Kobel, B., *et al.* (1999): Handbuch Energie in Kläranlagen. Düsseldorf, Ministerium für Umwelt, Raumordnung, und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MURL).
- Müller, E. A., Kobel, B., *et al.* (1999): Handbuch Energie in Kläranlagen. Düsseldorf, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MURL).
- Neumann-Silkow, F. (2006): Treibhausgas-Emissionen durch Staubecken. Eschborn, Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Otte, S., Grobbs, N. G., *et al.* (1996): "Nitrous oxide production by *Alcaligenes faecalis* under transient and dynamic aerobic and anaerobic conditions." Applied and Environmental Microbiology 62(7): 2421-2426.
- Ottersbach, J. (2010). Bauhof Linnich des WVER, Potenzialanalyse Erneuerbare Energien
- Park, H.-D., Wells, G. F., *et al.* (2006): "Occurrence of ammonia-oxidizing Archaea in wastewater treatment plant reactors." Applied and Environmental Microbiology 72(8): 5643-5647.
- Polczyk, H. (2011). Information von Herrn Polczyk, Leiter Unternehmensverband Talsperren, Wasserverband Eifel-Rur
- Schneider, K.-J. (2004): Bautabellen für Ingenieure. München, Werner Verlag.
- Schön, M., Walz, R., *et al.* (1993): Emissionen der Treibhausgase Distickstoffoxid und Methan in Deutschland. Berlin, Erich Schmidt Verlag.
- Seiler, W., Conrad, R. (1981): Mikrobielle Bildung von N_2O aus Mineraldünger - ein Umweltproblem? Forum Mikrobiologie. 6: 322-328.
- Solomon, S., Qin, D., *et al.* (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge, New York, IPCC.

- STOWA (2010): Emissies van Broeikasgassen van RWZI's. Amersfoort, Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer. 1.
- Strutt, J., Wilson, S., *et al.* (2008): "Assessing the carbon footprint of water production." American Water Works Association 100(6): 80-91.
- Tallec, G., Garnier, J., *et al.* (2006): "Nitrous oxide emissions from secondary activated sludge in nitrifying conditions of urban wastewater treatment plants: Effect of oxygenation level." WATER RESEARCH 40(15): 2972-2980.
- UKWIR (2010): Workbook for estimating operational GHG emissions - version 4. London, UK Water Industry Research Limited.
- Umwelt-Bundesamt (2010): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009. Berlin.
- Van Cleemput, O. (1998): "Subsoils: chemo- and biological denitrification, N₂O and N₂ emissions." Nutrient Cycling Agroecosystems 52: 187-194.
- van Niel, E. W. J., Arts, P. A. M., *et al.* (1993): "Competition between heterotrophic and autotrophic nitrifiers of ammonia in chemostat cultures." FEMS Microbiology Ecology 102(2): 109-118.
- VROM (2008): Protocol 8136 Afvalwater - CH₄ en N₂O uit Afvalwater. Den Haag, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu - Directie Klimaatverandering en Industrie.
- Watt (1994): Methane Emissions. Watt Committee Report. A. Williams. 28.

14 Anhang

14.1 Emissionsfaktoren

Tabelle 14-1: CO₂-Emissionsfaktoren ausgewählter Chemikalien in der Abwasserreinigung

Chemikaliientyp	Umsatzfaktor [kg CO₂ / kg] (Janse, Wiers, 2006)
Natronlauge [NaOH]	0,96
Salzsäure [HCl]	0,35
Aktivkohle	2,8
Eisenchlorid [FeCl ₃]	1,15
Eisensulfat [FeSO ₄]	1,13
[AlClSO ₄]	1,13
Polyelektrolyte (Flockungshilfsmittel)	1,15

Tabelle 14-2: CO₂-Emissionsfaktoren ausgewählter Brennstoffe

CO ₂ e			
Brennstoff	[kg/m ³]	[kg/L]	[kg/kWh]
Flugzeugkraftstoff		2,6557	0,28529
Turbinenkraftstoff		3,0165	0,29372
Burning Oil		3,0121	0,29247
CNG		0,5452	0,21233
Kohle (Industrie)			0,37492
Kohle (Stromerzeugung)			0,37455
Kohle (Inland)			0,39275
Kokskohle			0,39346
Diesel		3,1787	0,30099
Heizöl		3,3285	0,31108
Gasöl		3,5477	0,32331
LNG		1,6604	0,25011
LPG		1,6786	0,24127
Schmierstoffe			0,29466
Rohbenzin			0,27081
Erdgas	2,224		0,20322
anderes Erdgas			0,23564
Benzin		2,7329	0,28455
Petroleum Coke			0,36841
Sonstige Raffinerie			0,27588
Deutscher Strommix			0,575
Flüssiggas		1,66	0,25

Tabelle 14-3: CO₂-Emissionsfaktoren ausgewählter Baumaterialien

Baustoff	GWP [CO ₂ -Äq.] [kg/kg]
Aluminium	1,7
Chemikalien anorganisch	1,15
Beton ohne Armierung	0,52
Bitumen ab Raffinerie	0
Glas unbeschichtet	0,21
Stahl hochlegiert	1,72
Kalkstein	0,75
Kupfer	1,72
Mineralwolle	2,21
Chemikalien organisch	1,15
PE (HD)	1,69
PE (LD)	1,69
Stahl unlegiert	1,46

Tabelle 14-4: CO₂-Emissionsfaktoren ausgewählter Baustoffe und Bauprozesse

Baustoffe / Baustellenprozesse	GWP [CO₂-Äq.]
Zement	872 kg/t
Sand und Kies	2 kg/t
Transportbeton B 25	241,7 kg/m ³
Transportbeton B 35	329,4 kg/m ³
Werkfrischmörtel	194,4 kg/m ³
Betonieren mit Betonpumpe	15,5 kg/m ³
Hydraulikbagger	0,54 kg/m ³
Bauschutttaufbereitung	5,9 kg/t

14.2 Basisdaten für die Musterbilanzierung der Kläranlagen

14.2.1 Energieverbräuche

Tabelle 14-5: Energieverbrauch Abwasserreinigung

Energieverbrauch Abwasserreinigung	Elektrizität
Verfahrensstufe	[Wh/m³]
Abwasserhebewerk (3 m Förderhöhe)	13,9
Rechen	1,0
Sandfang (belüftet)	5,5
Vorklärung einschließlich Primärschlammumpwerk	1,1
Belebung mit Stickstoffelimination	185,7
Belüftung / Gebläse	153,5
Umwälzung	19,6
Rezirkulation	5,7
Rücklaufschlamm	6,9
Nachklärung einschließlich Überschussschlammumpwerk	1,6
Fällmitteldosierung (Simultanfällung)	0,5
Filtration einschl. Hebewerk	22,5
Summe	232,0

Tabelle 14-6: Energieverbrauch Schlammbehandlung

Energieverbrauch Schlammbehandlung	Elektrizität
Verfahrensstufe	[kWh/m ³ Schlamm]
Schlammsiebung	0,1
Voreindickung statisch	0,1
Stabilisierung anaerob-mesophil	1,3
Entwässerung Hochentwässerungszentrifuge	1,3

Tabelle 14-7: Energieverbrauch Verwaltung

Energieverbrauch Abwasserreinigung	Elektrizität
Verfahrensstufe	[kWh/EW a]
Betriebsgebäude	0,18
Betriebsmittel	0,68
Lüftungsanlage	0,15
Abluftreinigung	0,58
Summe	1,6

14.2.2 Baustoffbedarf

Tabelle 14-8: Statistische Auswertung des Baustoffbedarfs von Kläranlagen nach Ausbaugröße

	Infrastrukturaufwand für ARA verschiedener Größenklassen pro m³ Abwasser					
	nach Zimmermann 1996 für einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren					
	Größenklasse	1	2	3	4	5
		> 100.000 EW	50.000- 100.000 EW	10.000- 50.000 EW	2.000- 10.000 EW	< 2.000 EW
	Einheit pro [m³]	Menge	Menge	Menge	Menge	Menge
Transporte						
Transport LKW 28 t	[tkm]	0,0621	0,0736	0,0795	0,0812	0,0817
Bauprozesse						
Aushub Hydraulikbagger	[m³]	0,0007	0,0008	0,0009	0,0009	0,0009
Energieträger						
Strom Mittelspannung	[TJ]	2,76E-11	3,27E-11	3,54E-11	3,61E-11	3,64E-11
Input-Materialien						
Aluminium	[kg]	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Chemikalien anorganisch	[kg]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Beton ohne Armierung	[kg]	0,44449	0,5272	0,5699	0,5819	0,5858
Bitumen ab Raffinerie	[kg]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Glas unbeschichtet	[kg]	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Gummi EPDM	[kg]	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Stahl hochlegiert	[kg]	0,0013	0,0015	0,0016	0,0016	0,0017
Kalkstein	[kg]	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043
Kupfer	[kg]	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Mineralwolle	[kg]	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Chemikalien organisch	[kg]	0,0008	0,001	0,001	0,001	0,001
PE (HD)	[kg]	0,0005	0,0006	0,0006	0,0006	0,0007
PE (LD)	[kg]	0	0	0	0	0
Stahl ungeliegt	[kg]	0,0156	0,0186	0,0201	0,0206	0,0207
Wasser	[kg]	0,0246	0,0292	0,0316	0,0323	0,0325

14.2.3 Grundlegenden Daten der 10.000 EW Musterkläranlage

Tabelle 14-9: Zulaufdaten und Frachten

häusliches Abwasser:	häusliches AW	gewerbl. AW	Summe AW
E 10.000			
Q _E 180 l/E*d m³/d	1.800	0	1.800
Q _F 0 l/E*d m³/d	0		0
			<u>1.800</u>

spez. Frachten:	Frachten häusl. AW	Frachten gewerbl. AW	Summe Frachten
AFS 70 g/E*d kg/d	700	0	700
CSB 120 g/E*d kg/d	1.200	0	1.200
BSB5 60 g/E*d kg/d	600	0	600
N 11 g/E*d kg/d	110	0	110
P 1,8 g/E*d kg/d	18	0	18

Tabelle 14-10: Rechengutanfall

	Rechenart	Feinrechen 1cm	
	Rechengut	16,7	L/(EW*a)
	Gesamt	167	m³/a
nach Waschen und Pressen		66,8	m³/a
	TS-Gehalt	25	%
	TS-Masse	1.670	kg/a
	Gesamtmasse	66.800	kg/a
Transport			
	LKW Transport	14	t Kapazität
	Transporte	5	pro a
	Fahrstrecke	100	km
	Jahresleistung	477	km/a
	Dieserverbrauch	143	L/a

Tabelle 14-11: Sandgutanfall

	Sangut	3,5	L/(EW*a)
	Gesamt	35	m³/a
	Masse	70.000	kg/a
Transport			
	LKW Transport	14	t Kapazität
	Transporte	5	pro a
	Fahrstrecke	100	km
	Jahresleistung	500	km/a
	Dieserverbrauch	150	L/a

Tabelle 14-12: Klärschlammanfall

	Klärschlamm	382	tTS/a
Trocknungsgrad Verbrennung		50%	
	Schlammfeuchtmasse	765	tWS/a

Tabelle 14-13: Energiebedarf

Hebewerk Anlagenzulauf			
	spez. Wert	5	Wh/(m³·m)

Förderhöhe	$h =$	3	m
Fördermenge	$Q_d =$	1.800	m^3/d
Nutzungsgrad Hebewerk		0,6	
Stromverbrauch absolut		45,0	kWh/d
Rechenanlage (Bandbreite 0,5 -1,5 Wh/m^3)			
spez. Wert		1	Wh/($m^3 \cdot m$)
Wassermenge	$Q_d =$	1.800	m^3/d
Stromverbrauch absolut		1,8	kWh/d
Sandfang/Fettfang			
Gebläse			
Volumen (2x 240 m^3) =	$V_{SF} =$	24	m^3
Einblastiefe	$t_{E,SF} =$	2,7	m
spez. Luftertrag	$q_{L,SF} =$	0,5	$m^3/(m^3_{VSF} \cdot h)$
Rohrreibungsverluste	$\Delta P =$	0,3	[bar]
Luftbedarf	$Q_L =$	12	m^3/h
Gebläsewirkungsgrad	$\eta_g =$	0,6	[-]
$P = Q_L \cdot h_E / (367 \cdot \eta_g) =$	$P =$	0,2	kW
Kontinuierlicher Betrieb		24	h/d
Sandfanggebläse		4,0	kWh/d
Sandfangräumer (2h/d)	Schätzung	8,0	kWh/d
Entnahmepumpe (2h/d)	Schätzung	16,0	kWh/d
Sandfanggutwäscher (2h/d)	Schätzung	30,0	kWh/d
Belebungsanlage			
Stromverbrauch		377	kWh/d
Umwälzung			
spez. Wert (1,5- 2 W / m^3)		1,5	W/ m^3 Beckenvolumen
Volumen Bio-P =		5.000	m^3
Volumen Deni =		2.213	m^3
Volumen Nitri/Deni =		3.500	m^3
Volumen Nitri =		3.319	m^3
Im Jahresmittel umzuwälzendes Volumen		13.500	m^3
Stromverbrauch		486,0	kWh/d
Rücklaufschlammumpwerk			
spez. Wert		2,7	Wh/($m^3 \cdot m$)
Förderhöhe	$h =$	1,5	m
Wassergehalt		99,5	%
Fördermenge	$Q_d =$	1.800	m^3/d
Nutzungsgrad Pumpwerk		0,57	
Stromverbrauch		12,8	kWh/d
Interner Recycle			
spez. Wert		2,7	Wh/($m^3 \cdot m$)
Förderhöhe	$h =$	0,5	m
Wassergehalt		99,5	%
Fördermenge	$Q_d =$	73.500	m^3/d
Nutzungsgrad Pumpwerk		0,7	
Stromverbrauch		141,8	kWh/d
Überschussschlammumpwerk			
spez. Wert		2,7	Wh/($m^3 \cdot m$)

Förderhöhe	h =	4	m
Wassergehalt		99,5	%
Fördermenge	Q _d =	104	m ³ /d
Nutzungsgrad Pumpwerk		0,6	
Stromverbrauch		1,9	kWh/d
Nachklärbecken			
spez. Wert (0,5 bis 1,0 kW je Becken)		1	kW/Becken
Kontinuierlicher Betrieb		24	h/d
Stromverbrauch		24	kWh/d
Simultanfällung			
spez. Wert		0,5	Wh/(m ³ ·m)
Stromverbrauch		0,9	kWh/d
Flockungsfiltration			
spez. Wert		2,7	Wh/(m ³ ·m)
Nutzungsgrad Beschickungspumpen		0,56	
Förderhöhe Hebewerk		3	m
Fördermenge	Q _d =	1.800	
Hebung des Abwassers		26	kWh/d
Flockungsmitteldosierung		5	kWh/d
Spülluft		30	kWh/d
Spülwasser		74	kWh/d
Schlammwasserrückführung		74	kWh/d
Filterfläche (8 Einheiten á 27 m ²)		216	m ²
Spülwasserverbrauch (Zyklus 48 h, 194 m ³ /Spülung)		776	m ³ /d
Jede Einheit wird 30 d im Jahr zusätzlich gespült		128	m ³ /d
Summe Spülwasser		904	m³/d
Überstauwasser von 4 Filtern mit 0,5 * Überstauhöhe		108	m ³ /d
Summe Schlammwasser		1.012	m³/d
Luft (Zyklus 48 h, 203 m ³ /Spülung)		812	m ³ /d
Jede Einheit wird 30 d im Jahr zusätzlich gespült		133	m ³ /d
Summe Luft		945	m³/d
Druckverlust Raumfilter		3	m
Überdruck Spülwasserpumpen		10	m
Filterbetthöhe		1,7	m
Überstau		2	m
Schlammmentwässerung (Zentrifuge)			
Spez. Wert (20-43 kWh/t _{TR,Faulschlamm})		34,23	kWh/t _{TR,Faulschlamm}
Schlammanfall		1,04	t _{TR,Faulschlamm} /d
Schlammanfall		41,57	m ³ /d
Stromverbrauch		35,6	kWh/d

Energieverbrauch Infrastruktur			
Betriebsgebäude		35,0	kWh/d
Brauchwasser		15,0	kWh/d
Druckluft (0,1 kWh/m ³ Druckluft)		13,0	kWh/d
Heizung (30-100 kWh/d)		75	kWh/d
Lüftung (5-8 kWh/d) pro 1.000 m ³ /d		9	kWh/d
Abluftreinigung (Schätzung)		0	kWh/d
Summe		<u>1.217</u>	<u>kWh/d</u>
Jahresverbrauch		444.336	kWh/a

14.2.4 Grundlegendaten der 100.000 EW Musterkläranlage

Tabelle 14-14: Zulauf und Frachten

häusliches Abwasser:					häusliches AW	gewerbl. AW	Summe AW
E	100.000						
Q _E	180	I/E*d		m³/d	18.000	0	18.000
Q _F	0	I/E*d		m³/d	0		0
							<u>18.000</u>
spez. Frachten:					Frachten häusl. AW	Frachten gewerbl. AW	Summe Frachten
AFS	70	g/E*d		kg/d	7.000	0	7.000
CSB	120	g/E*d		kg/d	12.000	0	12.000
BSB5	60	g/E*d		kg/d	6.000	0	6.000
N	11	g/E*d		kg/d	1.100	0	1.100
P	1,8	g/E*d		kg/d	180	0	180

Tabelle 14-15: Rechengutanfall

	Rechenart	Feinrechen 1cm	
	Rechengut	16,7	L/(EW*a)
	Gesamt	1670	m³/a
nach Waschen und Pressen		668	m³/a
	TS-Gehalt	25	%
	TS-Masse	16.700	kg/a
	Gesamtmasse	668.000	kg/a
Transport			
	LKW Transport	14	t Kapazität
	Transporte	48	pro a
	Fahrstrecke	100	km
	Jahresleistung	4.771	km/a
	Dieserverbrauch	1.431	L/a

Tabelle 14-16: Sandgutanfall

	Sangut	3,5	L/(EW*a)
	Gesamt	350	m³/a
	Masse	700.000	kg/a
Transport			
	LKW Transport	14	t Kapazität
	Transporte	50	pro a
	Fahrstrecke	100	km
	Jahresleistung	5.000	km/a
	Dieserverbrauch	1.500	L/a

Tabelle 14-17: Energiebedarf

Hebewerk Anlagenzulauf			
Bandbreite ($\eta_{\text{Pumpe}} = 0,3-0,85$, $\eta_{\text{Motor}} = 0,85-0,95$)		= 3 - 11	Wh/(m³·m)
spez. Wert		2,7	Wh/(m³·m)
Förderhöhe	h =	3	m
Fördermenge	Q _d =	18.000	m³/d
Nutzungsgrad Hebewerk		0,6	
Stromverbrauch absolut		243,0	kWh/d
Primärschlammumpen			
spez. Wert		2,7	Wh/(m³·m)
Förderhöhe	h =	4	m
Fördermenge	Q _d =	18.000	m³/d
Nutzungsgrad Pumpwerk		0,45	
Stromverbrauch absolut		432,0	kWh/d
Vorklärbecken			
spez. Wert (0,3 bis 1,0 kW je Becken)		0,583	kW/Becken
Kontinuierlicher Betrieb		24	h/d
Stromverbrauch absolut		28	kWh/d
Rechenanlage			
spez. Wert		1	Wh/(m³·m)
Wassermenge	Q _d =	18.000	m³/d
Stromverbrauch absolut		18,0	kWh/d

Sandfang/Fettfang			
Gebläse			
Volumen (2x 240 m ³) =	V _{SF} =	480	m ³
Einblastiefe	t _{E,SF} =	2,7	m
spez. Lufteintrag	q _{L,SF} =	0,5	m ³ /(m ³ _{VSF} * h)
Rohrreibungsverluste	Δ P =	0,3	[bar]
Luftbedarf	Q _L =	240	m ³ /h
Gebläsewirkungsgrad	η _g =	0,6	[-]
P = Q _L * h _E / (367 * η _g) =	P =	3,3	kW
Kontinuierlicher Betrieb		24	h/d
Sandfanggebläse		80,0	kWh/d
Sandfangräumer (2h/d)		8,0	kWh/d
Entnahmepumpe (2h/d)		16,0	kWh/d
Sandfanggutwäscher (2h/d)		30,0	kWh/d
Belebungsanlage			
Stromverbrauch		4.207	kWh/d
Umwälzung			
spez. Wert (1,5- 2 W /m ³)		2	W/m ³ Beckenvolumen
Volumen Bio-P =		5.000	m ³
Volumen Deni =		9.514	m ³
Volumen Nitri/Deni =		3.500	m ³
Volumen Nitri =		14.271	m ³
Im Jahresmittel umzuwälzendes Volumen		13.500	m ³
Stromverbrauch		648,0	kWh/d
Rücklaufschlammumpwerk			
spez. Wert		2,7	Wh/(m ³ ·m)
Förderhöhe	h =	1,5	m
Wassergehalt		99,5	%
Fördermenge	Q _d =	18.000	m ³ /d
Nutzungsgrad Pumpwerk		0,57	
Stromverbrauch		127,9	kWh/d
Interner Recycle			
spez. Wert		2,7	Wh/(m ³ ·m)
Förderhöhe	h =	0,5	m
Wassergehalt		99,5	%
Fördermenge	Q _d =	73.500	m ³ /d
Nutzungsgrad Pumpwerk		0,7	
Stromverbrauch		141,8	kWh/d
Überschussschlammumpwerk			
spez. Wert		2,7	Wh/(m ³ ·m)
Förderhöhe	h =	4	m
Wassergehalt		99,5	%
Fördermenge	Q _d =	626	m ³ /d
Nutzungsgrad Pumpwerk		0,6	
Stromverbrauch		11,3	kWh/d

Nachklärbecken			
spez. Wert (0,5 bis 1,0 kW je Becken)		0,6	kW/Becken
Kontinuierlicher Betrieb		24	h/d
Stromverbrauch		28,8	kWh/d
Simultanfällung			
spez. Wert		0,5	Wh/(m ³ ·m)
Stromverbrauch		9,0	kWh/d
Flockungsfiltration			
spez. Wert		2,7	Wh/(m ³ ·m)
Nutzungsgrad Beschickungspumpen		0,56	
Förderhöhe Hebewerk		3	m
Fördermenge	Q _d =	18.000	
Hebung des Abwassers		260	kWh/d
Flockungsmitteldosierung		5	kWh/d
Spülluft		30	kWh/d
Spülwasser		74	kWh/d
Schlammwasserrückführung		74	kWh/d
Filterfläche (8 Einheiten á 27 m ²)		216	m ²
Spülwasserverbrauch (Zyklus 48 h, 194 m ³ /Spülung)		776	m ³ /d
Jede Einheit wird 30 d im Jahr zusätzlich gespült		128	m ³ /d
Summe Spülwasser		904	m³/d
Überstauwasser von 4 Filtern mit 0,5 * Überstauhöhe		108	m ³ /d
Summe Schlammwasser		1.012	m³/d
Luft (Zyklus 48 h, 203 m ³ /Spülung)		812	m ³ /d
Jede Einheit wird 30 d im Jahr zusätzlich gespült		133	m ³ /d
Summe Luft		945	m³/d
Druckverlust Raumfilter		3	m
Überdruck Spülwasserpumpen		10	m
Filterbetthöhe		1,7	m
Überstau		2	m

Schlammbehandlung			
Grobstoffentfernung (Schlamm-siebung PS-Schlamm)			
spez. Wert (0,05-0,09 kWh/m ³)		0,075	kWh/m ³ Rohschlamm
Primärschlammanfall		77,77777778	m ³ /d
Stromverbrauch		5,8	kWh/d
statische Voreindickung Primärschlamm mit Krähwerk			
Primärschlammanfall		77,77777778	m ³ /d
spez. Wert (bei Krähwerk = 20-60 kWh/d pro Behälter)			
Stromverbrauch		20,0	kWh/d
Siebtrommel ÜS-Eindickung			
Spez. Wert (0,2-0,4 kWh/m ³)		0,32	kWh/m ³ Überschussschlamm
Überschussschlammfall		626	m ³ /d
Stromverbrauch		201,7	kWh/d
Faulschlamm-entwässerung (Zentrifuge)			
Spez. Wert (20-43 kWh/t _{TR,Faulschlamm})		34,23	kWh/t _{TR,Faulschlamm}
Faulschlammanfall		10	t _{TR,Faulschlamm} /d
Faulschlammanfall		32,52	m ³ /d
Stromverbrauch		333,9	kWh/d
Faulbehälter (anaerob, mesophil)			
Spez. Wert (29-42 kWh/t _{TR,Rohschlamm, eingedickt})		30,75	kWh/t _{TR,Faulschlamm}
Spez. Wert (1,6-2,3 kWh/m ³ Rohschlamm, eingedickt)		1,94	kWh/m ³ Rohschlamm, eingedickt
Faulschlammanfall		9,76	t _{TR,Faulschlamm} /d
Faulschlammanfall		32,52	m ³ /d
Stromverbrauch		300,0	kWh/d

Energieverbrauch Infrastruktur			
Betriebsgebäude		50,0	kWh/d
Brauchwasser (spez. Wert 0,25-0,3 kWh/m ³ Brauchwasser)		70,0	kWh/d
Druckluft (0,1 kWh/m ³ Druckluft)		13,0	kWh/d
Heizung (30-100 kWh/d)		100	kWh/d
Lüftung (5-8 kWh/d) pro 1.000 m ³ /d Schätzung		40	kWh/d
Abluftreinigung (Schätzung)		160	kWh/d
Summe		<u>7.766</u>	<u>kWh/d</u>
Jahresverbrauch		2.834.645	kWh/a

14.2.5 Steckbrief für die Datenerhebung an Kläranlagen

Kläranlagen-Steckbrief

Anlage :					
Baujahr :		Erweiterungen:			
Kurzbeschreibung Verfahren					
	Kanalisation:	Trennsystem [%]		Mischsyst. [%]:	
		E	EGW	EW	Q_{TW}^* [m³/d]
	Auslegung gem. Erlaubnisbescheid:				
		Q_{max} [m³/0,5h]	Q_m [m³/h]	JSM [m³]	JAM* [m³]
	*wenn nicht im Bescheid, dann Quelle nennen				
Verfahrensstufen		<i>Zutreffendes ankreuzen, Zahlenwerte + Bemerkungen eintragen!</i>			
1 Hebestufen			Bemerkungen		
1.1	Zulauf				
1.2	Anzahl Zwischenhebestufen				
	Summe aller				
1.3	Zwischenhebestufen ΔH [m]				
2 Entfernung v. Grobstoffen			Typ und Spaltweite nennen		
2.1	System				
2.1.1	Grobrechen				
2.1.2	Feinrechen				
2.1.3	Sieb				
2.1.4	Rechengutpresse				
2.1.5	Rechengutanfall				
2.1.6	Entsorgungsintervall				
2.1.7	Transportstrecke				
2.1.8	Entsorgungsart				
3 Sand- und Fettentfernung			Typ nennen, ggf. Sandwäsche		
3.1	System Sand-/Fettentfernung				
3.1.1	unbelüfteter Sandfang				
3.1.2	belüfteter Sand- und Fettfang				
3.1.3	Rundsandfang				
3.1.4	Sandklassierer				
3.1.5	Sandgutanfall				
3.1.6	Entsorgungsintervall				
3.1.7	Transportstrecke				
3.1.8	Entsorgungsart				

4	Vorklärung		Typ nennen (Rundbecken, Rechteckbecken ..)
4.1	Kennwerte Vorklärung		
4.2.1	Beckenvolumen VKB [m³]		
4.2.2	Randtiefe VKB [m]		
4.2.3	Oberfläche VKB [m²]		
5	biolog. HL-Stufe m. Zwischenklär.		Typ nennen (z.B. Kreisel, Kerzen ...), Alter
5.1	Belüftungssystem		
5.1.1	Druckbelüftung		
5.1.2	Oberflächenbelüftung		
5.2	Kennwerte Hochlaststufe		bei versch. Ausführ. Spalten daneben nutzen
5.2.1	Beckenvolumen HL-BB [m³]		
5.2.2	Beckentiefe ZKB [m]		
5.2.3	Beckenvolumen HL-ZKB [m³]		
5.2.4	Randtiefe ZKB [m]		
5.2.5	Oberfläche ZKB [m²]		
5.2.6	ΔH Rücklaufschlamm HL-ZKB [m]		
5.2.7	Anzahl Gebläse HL-BB [-]		
5.2.8	installierte Leistung Gebläse HL-BB [kW]		
6	biolog. SL-Stufe mit Nachklärung		
6.1	System N-Eliminierung		
6.1.1	vorgeschaltete Denitrifikation		
6.1.2	Kaskadendenitrifikation		Anzahl Kaskaden:
6.1.3	simultane Denitrifikation		
6.1.4	intermittierende Denitrifikation		
6.1.5	alternierende Denitrifikation		
6.1.6	SBR		
6.1.7	sonstiges		
6.2	Belüftungssystem		Automatisierungsstrategie O2-Eintrag:
6.2.1	Druckbelüftung		Ja, Eräuterung umfangreich
6.2.2	Oberflächenbelüftung		
6.3	Kennwerte biologische Stufe		
6.3.1	Beckenvolumen SL-BB [m³]		
6.3.2	Beckentiefe SL-BB [m]		
6.3.3	Beckenvolumen SL-NKB [m³]		
6.3.4	Randtiefe SL-NKB [m]		
6.3.5	Oberfläche SL-NKB [m²]		
6.3.6	ΔH Rücklaufschlamm SL NKB [m]		
6.3.7	Anzahl Gebläse SL-BB [-]		
6.3.8	install. Leistung Gebläse SL-BB [kW]		
6.4	P-Elimination		
6.4.1	Simultanfällung		
6.4.2	Bio-P		Bio-P Zeitraum:

7	biolog. Prozesswasserbehandlung			
7.1	System Prozesswasserbehandlung			
7.1.1	Zwischenspeicher Prozesswasser			Volumen:
7.1.2	Sonstige (z.B. separate Nitrifikation)			
	Kennwerte			
7.2	Prozesswasserbehandlung			
7.2.1	Becken volumen Prozesswasserbeh.	[m³]		
8	Nachreinigung /Filtration			Art, kontinuierlich/diskontin., Besonderheiten
8.1	System Filtration			
8.1.1	Sandfiltration nur für Suspensaentf.			
8.1.2	Flockungsfiltration			
8.1.3	biologisch intensivierte Filtration			
8.1.4	sonstige			
8.2	Kennwerte Filtration			
8.2.1	Filterfläche	[m²]		
8.2.2	Filtergeschwindigkeit	[m/h]		
8.2.3	Volumen Vorbelüftungsbecken	[m³]		
8.3	Membrananlagen			
8.3.1	Membranverfahren			
8.3.2	Bioreaktorvolumen	[m³]		
8.3.3	Membranfläche	[m²]		
8.3.4	Anzahl Module			
8.3.5	Standzeit	[a]		
8.3.6	Redundanzen			
8.3.7	max Zufluss	[m³/h]		
8.3.8	Betriebsdruck	[bar]		
8.3.9	Porenweite	[µm]		
8.3.1	Modul			
8.3.1	Reinigungsintervalle	[1/a]		
8.3.1	Eingesetzte Reinigungschemikalien			
8.3.1	Leistung	[kW]		

9	Schlammbehandlung		Art MS ÜS-Eindickung (Zentr., Sieb, Band...)
9.1	System Voreindickung		
9.1.1	statischer Eindicker PS/HL-ÜS		
9.1.2	statischer Eindicker ÜS		
9.1.3	statischer Eindicker PS+ÜS		
9.1.4	maschinelle ÜS-Eindickung		
9.2	Kennwerte ÜS-Eindickung		
9.2.1	Leist. Zentrif./Siebtrommel/Seihband [kW]		
9.3	System Schlammstabilisierung		
9.3.1	einstufig mesophil		
9.3.2	thermophil + mesophil		
9.3.3	simultan aerob		
9.4	Kennwerte Schlammfäulung		
9.4.1	Gesamt-Volumen FB 1.Stufe [m³]		
9.4.2	Gesamt-Volumen FB 2.Stufe [m³]		
9.4.3	t _R Fäulung gesamt lt. Bemessung [d]		
9.4	System Nacheindickung		
9.4.1	statischer FS-Eindicker		
9.4.2	Nassschlamm-speicher/Stapelbehälter		Volumen:
9.5	System Schlammmentwässerung		
9.5.1	Zentrifuge		
9.5.2	Siebbandpresse/Bandfilterpresse		
9.5.3	Kammerfilterpresse		
9.5.4	Faulschlammanfall		
9.5.5	Entsorgungsintervall		
9.5.6	Transportstrecke		
9.5.7	Entsorgungsart		
9.6	Kennwerte Schlammmentwässerung		
9.6.1	Durchsatz Schlammmentwässerung [m³/h]		
9.6.2	installierte Leistung Schlammmentw. [kW]		
10	Anlagenschema (vereinfacht)		

14.3 Basisdaten für die Musterbilanzierung von Pumpwerken

Bauwerk			
Betreiber		Standort	
		Ansprechpartner	
Straße		Tel.	
PLZ und Ort		Fax	
Stromverbrauch kWh/a		E-Mail	

Fördersysteme						
Aufstellung trocken oder nass						
Wartungsintervall [a]						
Kurze Beschreibung der Wartungsstrategie (Fahrstrecke / Treibstoffverbrauch)						
	Gesamt	Pumpe 1	Pumpe 2	Pumpe 3	Pumpe 4	Pumpe 5
Baujahr						
Baujahr Motor						
Pumpentyp*						
Fördermenge [Q] in m³/a						
Druck Betrieb Saugseite in bar						
Druck Betrieb Druckseite in bar						
Geodätische Förderhöhe [m]**						
Anschlussleistung Motor [kW]						
Stromverbrauch in kWh/a						
Strom-Kosten in €						
Drehzahlregelung ja oder nein						
*Kreiselpumpe: Freistrom, Einkanal, Mehrkanal, Andere; Verdrängerpumpe: Kolben, Andere						
Auslegungsdaten	Fördermenge [Q]					
	Förderhöhe [m]**					
	Drehzahl [n]					

** Skizze kann zur besseren Erläuterung angefügt werden

Fördermedium

Leitungsbestand

Elektr. Ausrüstung	
Innenaufstellung	
Außenaufstellung	
SPS-Steuerung	

Niveausteuerung	
Schwimmerschalter	
hydrostatisch	
berührungslos	
Andere	

Anmerkungen		
Entfernung v. Grobstoffen		Typ und Spaltweite nennen
System [kW]		
Grobrechen		
Feinrechen		
Sieb		
Rechengutpresse		
Sand- und Fettentfernung		Typ nennen, ggf. Sandwäsche
System Sand-/Fettentfernung [kW]		
unbelüfteter Sandfang		
belüfteter Sand- und Fettfang		
Rundsandfang		
Sandklassierer		
Peripähre Verbraucher		(z.B. Heizung, Steuerungstechnik, etc.)
Heizung [kW]		Betriebsstunden

Saug- und Druckseite			Freispegelleitung / Druckrohr
Saugseite			
Typ			Druckrohr, Freispegelleitung, Gerinne
Material			
DN	[mm]		
Länge	[m]		
Druckseite			bei versch. Ausführ. Spalten daneben nutzen
Typ			Druckrohr, Freispegelleitung, Gerinne
Material			
DN	[mm]		
Länge	[m]		

14.4 Basisdaten für die Musterbilanzierung von Sonderbauwerken

Bauwerk			
Betreiber		Standort	
		Ansprechpartner	
Straße		Tel.	
PLZ		Fax	
Ort		E-Mail	
Baujahr			
Behandlungsvolumen			
Stand Maschinenteknik			
Stand EMSR-Technik			
Überwachungshäufigkeit			
Anschlussleistung [kW]			
Verbrauch [kWh/a]			
Energie-Kosten [€]			
Zulaufmenge [Q] in m³/a			
Angeschlossene Fläche in m²			
Entleerungshäufigkeit/a			
Wartungsintervall [a]			
Kurze Beschreibung der Wartungsstrategie (Fahrstrecke / Treibstoffverbrauch)			

Beckentyp			
Maße Einbautiefe	Höhe	Länge	Breite
	Fangbecken	Durchlaufbecken	
Nebenschlus s			
Hauptschlus s			

Ausrüstung	
Siebrechen	
Spülkippe	
Schwallspülung	
Wirbeljet	
Andere	

Welche Mess- und Regeltechnik ist im Einsatz?

Anmerkungen

14.5 Basisdaten für die Musterbilanzierung der Gewässerbewirtschaftung

14.5.1 Flussgebiete

Tabelle 14-18: Stromverbrauch des Erftverbandes und berechnete CO₂e-Emissionen

Anlage	Stromverbrauch 2010		Emissionen [kg CO ₂]
	Verbrauch [kWh]	Bemerkungen	
HRB Horchheim	98		56,275
HRB Eicherscheid	2		1,150
HRB Eicherscheid	7.107		4086,238
HRB Eicherscheid	5.335		3067,453
HRB Niederberg	5.773		3319,475
HRB Niederberg (Mühlheim-Wichterich)	599		344,425
HRB Mödrath Frechen/ Kerpen	1.371		788,498
GM Arloff	4.773		2744,245
GM Kessenich	4.240	aus Faulgas der Kläranlage	
GM Enzen	7.800	aus Faulgas der Kläranlage	
GM Bergheim	1.474		847,550
GM Frimmersdorf	3.086		1774,450
GM Frimmersdorf	5.461		3140,075
GM Frimmersdorf	3.334		1917,050
GM Münchrath	5.203		2991,725
GM Münchrath	2.153		1238,033
GM Anstel	1.108		637,273
GM Lützheim	3.029		1741,675
GM Lützheim	1		0,575
GM Lützheim	15.140		8705,500
GM Gymnich	3.151		1811,595
GM Gymnich	2.377		1366,948
GM Gymnich	33		18,745
Bauhof	10.784		6200,800
Wehranlage W 2 Selikum	1.798		1033,850
Wehranlage W 6	213		122,475
Wehranlage W 7 Wevelinghoven	72		41,400
Wehranlage W 8 Noithausen	28		16,100
Wehranlage W 9 Grevenbroich	9.706		5580,950
Wehranlage W10 Gustorf	874		502,550
Wehranlage W11 Bedburg	1.300		747,500
Wehranlage W12 Bedburg	1.537		883,775
Wehranlage W14 Zieverich	685		393,817
Pumpwerk Müttinghoven	5.054		2906,050
Summe	114.698		59.028

Tabelle 14-19: Treibstoffverbrauch des Erftverbandes und berechnete CO₂e-Emissionen

Treibstoffverbrauch 2010		
Treibstoff	Verbrauch [l]	Emissionen [t CO ₂]
Diesel	106582	338,931
Benzin	4180	11,411
Stihlsprit	3400	10,846
Summe		361,187

Tabelle 14-20: Verbrauch von Gas und Heizöl bei Erftverband und berechnete CO₂e-Emissionen

Verbrauch Gas / Heizöl 2010					
Gebäude	Brennstoff	Verbrauch	Einheit	Bemerkungen	Emissionen [t CO ₂]
Bauhof	Erdgas	9311,564	m ³	zur Hälfte Gewässer	10,354
GM Bergheim	Heizöl	2008,000	l		6,684

Tabelle 14-21: Stromverbrauch der LINEG und berechnete CO₂e-Emissionen

Stromverbrauch 2010			
Anlage	Verbrauch [kWh]	Bemerkungen	Emissionen [t CO ₂]
75 Vorflutpumpenanlagen	9.934.923		5.712,6
8 Hochwasserpumpenanlagen	503.641		289,6
Summe Pumpenanlagen	10.438.564		6.002,2
Werkstatt - Betrieb	67.290	wurde zur Hälfte zugeteilt	38,7
Werkstatt - Gebäude	67.290	wurde zur Hälfte zugeteilt	38,7
Bereitstellungslager	17.738	wurde zur Hälfte zugeteilt	10,2
Summe Werkstätten, Lager	152.318		87,6
Gesamtsumme	10.590.882		6.089,8
186 Grundwasserpumpenanlagen	12.015.602		6.909,0
Verwaltung	301.352		173,3
Zentrallabor	216.398		124,4

Tabelle 14-22: Treibstoffverbrauch der LINEG und berechnete CO₂e-Emissionen

Treibstoff	Treibstoffverbrauch 2010	
	Verbrauch	Emissionen [t CO ₂ e]
LPG [kg]	1.905,43	5,92
Diesel [l]	118.750,39	377,63
Benzin [l]	18.448,52	50,36
Summe		433,914

14.5.2 Renaturierungsmaßnahme

Tabelle 14-23: Verbrauchsmengen für eine Renaturierungsmaßnahme des Erftverbandes und berechnete CO₂e-Emissionen

Kenngrößen		durchschnittliche Geschwindigkeit	gefährte Strecke [km]	spez. Verbrauch		Arbeitszeit [h]
Fahrzeug	Kraftstoff			Wert	Einheit	
Bagger	Diesel	40	1000	13,6	l/h	25
LKW	Diesel			0,287	l/km	25
PKW	Benzin			0,1	l/km	

Kenngrößen		Kraftstoffverbrauch		Emissionen CO ₂ e [kg]
Fahrzeug	Kraftstoff	Wert	Einheit	
Bagger	Diesel	340 l		1081,2
LKW	Diesel	287 l		912,66
PKW	Benzin	100 l		273
		Summe		2266,86

14.5.3 Entkrautungsmaßnahme des Niersverbandes

Tabelle 14-24: Verbrauchsmengen für eine Sohlschnittmaßnahme des Niersverbandes und berechnete CO₂e-Emissionen

Kenngrößen	Verbrauch Sohlschnitt			Hochrechnung auf 1 Jahr		THG-Emissionen	
	Wert	Einheit	Teilmaßnahme	Wert	Einheit	CO ₂ e [kg]	CO ₂ e [kg/a]
Kraftstoffverbrauch							
Diesel	70	l	Betrieb Mähboot	490	l/a	222,6	1558,2
Diesel	5	l	An- und Abfahrten Personal Aufnahme, Verladung Kraut,	35	l/a	15,9	111,3
Diesel	180	l	Transport Mähboot	1260	l/a	572,4	4006,8
Diesel	15	l	Transport Kraut zur Kompostierung (10m³)	105	l/a	47,7	333,9
Summe	270	l		1890	l/a	858,6	6010,2

14.5.4 Hochwasserrückhaltebecken des WVER

HRB „St. Jöris:

Volumen: 13.500 m³

Fläche Einzugsgebiet: 250 ha

HRB “Oberzier”:

Volumen: 62.000 m³

Fläche Einzugsgebiet: 6.250 ha

Tabelle 14-25: Verbrauchsmengen für zwei Hochwasserrückhaltebecken des WVER und berechnete CO₂e-Emissionen

Kraftstoffverbrauch für die landwirtschaftlichen Maschinen (Mäh- und Entkrautungsarbeiten)						
Fahrzeug	Kraftstoff	Betriebsdauer/-strecke in 2010		sez.Verbrauch		kg CO2e
		Wert	Einheit	Wert	Einheit	
HRB "St. Jöris"						
MB-Trac	Diesel	26,25	h	6,3 l/h		529,7
Fendt 380 GT	Diesel	15	h	5,4 l/h		256,2
JCB 2155	Diesel	16	h	12,3 l/h		625,4
JCB 2155	Diesel	8,75	h	11,4 l/h		317,5
Pritsche	Diesel	100	km	14,0 l		44,5
Reform / Jet	Benzin	16	km	2,5 l		6,8
					Summe	1780,2
HRB "Oberzier"						
U-400	Diesel	17,5	h	9,5 l/h		529,3
John Deere	Diesel	8,75	h	8,2 l/h		227,2
U-1450	Diesel	8,75	h	10,4 l/h		290,1
Reform / Jet	Benzin	16	km	2,5 l		6,8
					Summe	1053,4

14.5.5 Vorlage Kurzsteckbrief für Gewässer

Kurzsteckbrief Gewässer		
Name des Unternehmens		
Kenndaten der vom Verband bewirtschafteten Gewässer		
Länge Gewässer insgesamt	km	
Länge Hauptfluss	km	
Länge Nebenflüsse	km	
Anzahl Seen	Anzahl	
Einzugsgebiet		
Einzugsgebietsgröße	[km ²]	
Bevölkerungsdichte		
...		
unterhaltene Bauwerke		
Hochwasserrückhaltebecken	Anzahl	
Hochwasserrückhaltebecken-Stauraum	m ³	
Wehranlagen	Anzahl	
Pumpwerke	Anzahl	
Wasserkraftwerke	Anzahl	
Wasserkraftwerke-Leistung	kWh/a	
Wasserkraftwerke, die durch Dritte betrieben werden	Anzahl	
Leistung dieser Kraftwerke	kWh/a	
Fuhrpark		
PKW	Anzahl	
LKW	Anzahl	
Bagger	Anzahl	
motorbetriebene Wasserfahrzeuge	Anzahl	
Betriebsgebäude		
Werkstätten / Betriebshöfe	Anzahl	
Gewässergütemessstationen	Anzahl	
Läger	Anzahl	

14.5.6 Kurzsteckbriefe der Talsperren des WVER

Kurzsteckbrief Oleftalsperre				Hilfetext
Allgemeine Daten				
Name des Unternehmens	WVER			
Kenndaten Talsperre				
Name der Talsperre	Oleftalsperre			
Stauziel	[m ü. NN]	464,53	458,99 bis 464,53 (Betriebsraum)	
Talsperreninhalt	[Mio m³]	19,30	Vollstau - incl. sämtlicher Vorstauanlagen	
Staufläche	[ha]	101	Wasserfläche bei Stauziel - incl. sämtlicher Vorstauanlagen	
Fläche Einzugsgebiet	km²	47,4		
Uferlänge	km	12,66		
Kenndaten Absperrbauwerk				
Staumauer		ja ☒ nein ☐		
Staudamm		ja ☐ nein ☒		
Dichtsystem	Kerndichtung	☐		
	Außenhautdichtung	☐		
Höhe Absperrbauwerk	[m über Talsohle]	54,4	Höhe des Absperrbauwerkes und nicht die Stauhöhe	
Kronenlänge	[m]	282		
Baujahr/ Inbetriebnahme		1959	Eingabe des Jahres	
Generalsanierung		1985	Eingabe des Jahres, bei mehreren Sanierungen alle Jahreszahlen eintragen	
Nutzung	Trinkwassergewinnung	☒ ☐		
	Wasserkraft	☐ ☒		
	Hochwasserrückhalt	☐ ☒		
	Freizeit	☐ ☐		
	Niedrigwasseranreicherung	☐ ☒		
	welche ?			
Einzugsgebiet				
Einzugsgebietsgröße	[km²]	47,4		
Wasserschutzgebiet	ja/nein	nein		
Fläche Forstbetrieb	ha	3887	Wälder	
Pegel	Anzahl	1		
landwirtschaftliche Nutzfläche	ha	663	Grünland	
Verkehrswege	km²	0,001		
Liegenschaften	Anzahl		0% städt. gepr. Fläche = 0 ha	
Vorsperre				
Staufläche Vorsperren/ Vorstauanlagen	ha	-		
Volumen Vorsperren/ Vorstauanlagen	Mio m³	-		
zu unterhaltende Dammoberfläche	ha	-		
Uferlänge	km	-		
Fuhrpark				
Anzahl der Fahrzeuge	Anzahl	3	3 = 2 + 1 Anteil TBW	
Talsperrengebäude				
Büro-/Wohngebäude	Anzahl	2		
Werkstätten	Anzahl	1		
Läger	Anzahl	1		

Kurzsteckbrief Urftalsperre				Hilfetext
Allgemeine Daten				
Name des Unternehmens	WVER			
Kenndaten Talsperre				
Name der Talsperre	Urftalsperre			
Stauziel	[m ü. NN]	321,06	311,40 bis 321,06 (Betriebsraum)	
Talsperreninhalt	[Mio m³]	19,30	Vollstau - incl. sämtlicher Vorstauanlagen	
Staufläche	[ha]	203	Wasserfläche bei Stauziel - incl. sämtlicher Vorstauanlagen	
Fläche Einzugsgebiet	km²	373,9		
Uferlänge	km	21,42		
Kenndaten Absperrbauwerk				
Staumauer		ja ☒ nein ☐		
Staudamm		ja ☐ nein ☒		
Dichtsystem	Kerndichtung	☐		
	Außenhautdichtung	☐		
Höhe Absperrbauwerk	[m über Talsohle]	55	Höhe des Absperrbauwerkes und nicht die Stauhöhe	
Kronenlänge	[m]	226		
Baujahr/ Inbetriebnahme		1905	Eingabe des Jahres	
Generalsanierung		1999	Eingabe des Jahres, bei mehreren Sanierungen alle Jahreszahlen eintragen	
Nutzung	Trinkwassergewinnung	☐		
	Wasserkraft	☒		
	Hochwasserrückhalt	☒		
	Freizeit	☐		
	Niedrigwasseranreicherung	☒		
	welche ?			
Einzugsgebiet				
Einzugsgebietsgröße	[km²]	373,9		
Wasserschutzgebiet	ja/nein	nein		
Fläche Forstbetrieb	ha	19443	Wälder und Flächen mit Strauchvegetation	
Pegel	Anzahl	1		
landwirtschaftliche Nutzfläche	ha	16078	Grünland und Ackerflächen	
Verkehrswege	km²	0,1		
Liegenschaften	Anzahl		4,2 % städt. gepr. Fläche = 1570 ha Dorfbauung	
Vorsperre				
Staufläche Vorsperren/ Vorstauanlagen	ha	-		
Volumen Vorsperren/ Vorstauanlagen	Mio m³	-		
zu unterhaltende Dammoberfläche	ha	-		
Uferlänge	km	-		
Fuhrpark				
Anzahl der Fahrzeuge	Anzahl	2	2 = 1 Betriebsstelle + 1 Anteil-TBW	
Talsperrengebäude				
Büro-/Wohngebäude	Anzahl	2		
Werkstätten	Anzahl	1		
Läger	Anzahl	1		

Kurzsteckbrief Wehetalesperre			Hilfetext
Allgemeine Daten			
Name des Unternehmens	WVER		
Kenndaten Talsperre			
Name der Talsperre	Wehebachtalsperre		
Stauziel	[m ü. NN]		
Talsperreninhalt	[Mio m³]	25,10	Vollstau - incl. sämtlicher Vorstauanlagen
Staufläche	[ha]	158,5	Wasserfläche bei Stauziel - incl. sämtlicher Vorstauanlagen
Fläche Einzugsgebiet	km²	43,5	
Uferlänge	km	18,5	
Kenndaten Absperrbauwerk			
Staumauer		ja ☐ nein ☒	
Staudamm		ja ☒ nein ☐	
Dichtsystem	Kerndichtung	☐	
	Außenhautdichtung	☒	
Höhe Absperrbauwerk	[m über Talsohle]	45	Höhe des Absperrbauwerkes und nicht die Stauhöhe
Kronenlänge	[m]	435	
Baujahr/ Inbetriebnahme	1983		Eingabe des Jahres
Generalsanierung	2010		Eingabe des Jahres, bei mehreren Sanierungen alle Jahreszahlen eintragen
Nutzung	Trinkwassergewinnung	☒ ☐	
	Wasserkraft	☐	
	Hochwasserrückhalt	☒	
	Freizeit	☐	
	Niedrigwasseranreicherung	☒	
	welche ?		
Einzugsgebiet			
Einzugsgebietsgröße	[km²]	43,5	
Wasserschutzgebiet	ja/nein	ja	
Fläche Forstbetrieb	ha	3263	Wälder
Pegel	Anzahl	4	
landwirtschaftliche Nutzfläche	ha	957	Grünland und Ackerflächen
Verkehrswege	km²	0,01	
Liegenschaften	Anzahl		0,76 % städt. gepr. Fläche = 33 ha Dorfbefahrung
Vorsperre			
Staufläche Vorsperren/ Vorstauanlagen	ha	-	
Volumen Vorsperren/ Vorstauanlagen	Mio m³	-	
zu unterhaltende Dammoberfläche	ha	-	
Uferlänge	km	-	
Fuhrpark			
Anzahl der Fahrzeuge	Anzahl	3	3 = 2 + 1 Anteil TBW
Talsperrengebäude			
Büro-/Wohngebäude	Anzahl	2	
Werkstätten	Anzahl	1	
Läger	Anzahl	1	

Kurzsteckbrief Rurtalsperre				Hilfetext
Allgemeine Daten				
Name des Unternehmens		WVER		
Kenndaten Talsperre				
Name der Talsperre		Rurtalsperre Schwammenauel		
Stauziel		[m ü. NN]	280,73	273,86 bis 280,73 (Betriebsraum)
Talsperreninhalt		[Mio m³]	195,00	Vollstau - incl. sämtlicher Vorstauanlagen
Staufläche		[ha]	768	Vorstauanlagen
Fläche Einzugsgebiet		km²	666,44	
Uferlänge		km	50	
Kenndaten Absperrbauwerk				
Staumauer			ja ☐ nein ☒	
Staudamm			ja ☒ nein ☐	
Dichtsystem		Kerndichtung	☒	
		Außenhautdichtung	☐	
Höhe Absperrbauwerk		[m über Talsohle]	71,5	Höhe des Absperrbauwerkes und nicht die Stauhöhe
Kronenlänge		[m]	480	
Baujahr/ Inbetriebnahme			1939	Eingabe des Jahres
Generalsanierung			1961	Eingabe des Jahres, bei mehreren Sanierungen alle Jahreszahlen eintragen
Nutzung		Trinkwassergewinnung	☒ ☐	
		Wasserkraft	☒	
		Hochwasserrückhalt	☒	
		Freizeit	☒	
		Niedrigwasseranreicherung	☒	
		welche ?		
Einzugsgebiet				
Einzugsgebietsgröße		[km²]	666,44	
Wasserschutzgebiet		ja/nein	nein	
Fläche Forstbetrieb		ha	35320	Wälder und Flächen mit Strauchvegetation
Pegel		Anzahl	3	
landwirtschaftliche Nutzfläche		ha	27320	Grünland und Ackerflächen
Verkehrswege		km²	0,5	
Liegenschaften		Anzahl		4,2 % städt. gepr. Fläche = 2799 ha Dorfbebauung
Vorsperre				
Staufläche Vorsperren/ Vorstauanlagen		ha	159	
Volumen Vorsperren/ Vorstauanlagen		Mio m³	18	
zu unterhaltende Dammoberfläche		ha	3,8	38 000 m²
Uferlänge		km	17	Schätzwert
Fuhrpark				
Anzahl der Fahrzeuge		Anzahl	5	5 = 3 Betriebsstelle + 2 Anteil-TBW
Talsperrengebäude				
Büro-/Wohngebäude		Anzahl	2	
Werkstätten		Anzahl	1	
Läger		Anzahl	1	