

# Vergleichende Bilanzierung des Treibhauspotenzials und des Primärenergiebedarfs verschiedener Rohrwerkstoffe bei dem Bau von Abwasserkanälen

Stefan Dollhopf  
stefan.dollhopf@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

## Kurzfassung

Das politische Ziel der Klimaneutralität bis 2045 fordert eine sektorübergreifende Reduzierung von Treibhausgasemissionen, parallel dazu müssen unsere Städte und Entwässerungssysteme aus- und umgebaut werden, um neuen Herausforderungen und Randbedingungen gerecht zu werden. Baumaßnahmen gehen stets mit der Emission klimaschädlicher Treibhausgase und einem stofflichen und energetischen Ressourcenverbrauch einher. Es ist daher nötig, geeignete Baustoffe, Baumaterialien und Bautechniken für den Ausbau zu identifizieren, um negative ökologische Auswirkungen möglichst gering zu halten. Dazu wird in der vorliegenden Arbeit der Bau von Abwasserkanälen anhand seiner integralen Bestandteile und aller Lebenszyklusphasen erfasst und bilanziert. Um die ökologischen Auswirkungen zu quantifizieren, wird das Treibhauspotenzial und der Primärenergiebedarf, je laufenden Meter Kanalsystem berechnet und dabei Rohrleitungen, der Erd- und Oberbau sowie Schächte berücksichtigt. Hinsichtlich der untersuchten Umweltwirkungen stellen sich meist biegesteife Rohre aus Beton- oder Stahlbeton oder Steinzeug als beste Lösung heraus. Kunststoffrohre erzielen meist die schlechtesten Ergebnisse, jedoch variieren die Einsparpotenziale je nach den gewählten Randbedingungen und der untersuchten Wirkungskategorie deutlich.

## Einleitung

Abwasserkanäle dienen dem Transport von Abwasser und tragen deshalb maßgeblich zur Gesundheit der Bevölkerung bei. In Deutschland sind nahezu alle bebauten Gebiete an die Entwässerungs-Infrastruktur angeschlossen, jedoch führt der Wandel der Lebensgewohnheiten wie beispielsweise die zunehmende Urbanisierung dazu, dass Entwässerungsstrukturen angepasst und Abwasserkanäle auch in Zukunft weiter ausgebaut werden. Dies wird aus dem 5-jährlichem Bericht zum Zustand der Kanalisation der deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) ersichtlich. Bei der Gesamtlänge der Kanalisation ist demnach seit 1995 ein jährlicher Längenzuwachs von etwa 9.200 km festzustellen (DWA, 2020d). Hinzu kommt, dass etwa 20 % des deutschen Kanalnetzes kurz- bis mittelfristig sanierungsbedürftig sind (DWA, 2020d), was einen bedeutenden baulichen Aufwand an Erneuerungsmaßnahmen zur Instandhaltung der bestehenden Infrastruktur zur Folge hat.

Abwasserkanäle bestehen zum Großteil aus kreisförmigen Rohren aus Beton bzw. Stahlbeton, Steinzeug oder Kunststoff. Dabei ist im letzten Jahrzehnt ein deutlicher Zuwachs des Anteils der Kunststoffe zu verzeichnen. Dieser stieg von etwa 7% im Jahr 2009 (DWA, 2009b) auf etwa 18% im Jahr 2019 (DWA, 2020d). Kunststoffrohre werden aus fossilen Rohstoffen gewonnen, zeichnen sich jedoch durch die leichte Handhabung beim Transport und auf der Baustelle aus. Biegesteife Rohrleitungen, aus Beton oder Steinzeug bestehen hingegen aus lokalen Rohstoffen, sind jedoch schwerer zu handhaben und zu transportieren. Diese Gegensätze bieten den Anlass, den Kanalbau hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus zu untersuchen. Das Ziel ist, geeignete Rohrwerkstoffe zu identifizieren, welche nachweislich geringere Auswirkungen auf das Treibhauspotenzial und den Primärenergiebedarf haben.

Die Umweltauswirkungen des Kanalbaus oder dessen Bestandteile waren bereits Teil zahlreicher Untersuchungen und Studien. Im deutschsprachigen Raum ist hierzu die Untersuchung von (Specht & Lorenz, 2009) zu nennen, welche jedoch nur die Herstellung der Rohrleitung und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energieaufwendungen enthält. Weitere Untersuchungen von (Petit-Boixa, et al., 2014), (Akhtar, et al., 2014), (Vahidi, Jin, Das, & Singh, 2015) beinhalten ebenfalls

vergleichende Bilanzierungen von Rohrwerkstoffen. Diese Untersuchungen wurden im Ausland durchgeführt, deshalb ist der geographische Geltungsbereich in der Regel auf den jeweiligen Ort der Untersuchung begrenzt, da standortspezifische Randbedingungen berücksichtigt werden und diese sich maßgeblich auf die Ergebnisse auswirken.

Weiter unterscheiden sich auch die Wahl der Methoden, Systemgrenzen und Bewertungssysteme von der vorliegenden Untersuchung. Deshalb ergänzt die Bilanzierung hier eine bestehende Lücke, indem lokale Bau- und Konstruktionsweisen und nationale Randbedingungen wie beispielsweise die Energiebereitstellung zur Herstellung und Transportentfernungen von Baustoffen berücksichtigt werden.

## **Methodik**

### Grundlagen

Die Bilanzierung des Treibhauspotenzials (engl. global warming potential - GWP) und des Primärenergiebedarfs (PE) wird in Anlehnung an die wissenschaftlich anerkannte Methode der Ökobilanzierung nach DIN ISO 14040 (DIN EN ISO 14040, 2021) entwickelt. Da es sich beim Produktsystem um einen Teil der Entwässerungsinfrastruktur und Ingenieurbauwerke handelt, kann die Untersuchung weiter in den Themenbereich der Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken, nach der Regelwerkreihe DIN EN 15643, eingeordnet werden. Die Bilanzierung des GWPs und PEs dient dazu die ökologische Qualität zu bewerten, deshalb orientiert sich die Untersuchung ergänzend an die Berechnungsverfahren nach DIN EN 15978 (DIN EN 15978, 2012). Die Berechnung der ökologischen Auswirkungen erfolgt mit Hilfe der frei zugänglichen, ökologischen Baudatenbank (Ökobaudat) des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat. Diese beinhaltet validierte Datensätze mit ökologischen Kennwerten von Baumaterialien und -techniken anhand verschiedener Wirkungsindikatoren. Ergänzend dazu dient die baubetriebliche Kalkulation des Kanalbaus dazu, das GWP und den PE der Konstruktionsphase genau zu erfassen und zu berechnen. Für die Bilanzierung wurde eine selbst entwickelte Tabellenkalkulation durchgeführt.

### Zieldefinition

Das Ziel der Untersuchung ist die vergleichende Bilanzierung des GWPs und des PEs beim Kanalbau und dem Einsatz verschiedener Rohrwerkstoffe. Die Bilanzierung ermöglicht eine Bewertung der ökologischen Auswirkungen eines gebauten, typischen Schmutzwasserkanals anhand des GWPs und des PEs über den gesamten Lebenszyklus der Infrastruktur. Die Ergebnisse bieten damit entscheidungsunterstützende Informationen bei der Planung des Kanalbaus.

### Funktionelle Einheit und Nutzungsdauer

Rohrleitungen stellen den zentralen Bestandteil des Kanalbaus dar, deshalb wird die funktionelle Einheit als 1m-langer Rohrleitungsabschnitt eines Kanals definiert. Die Nutzungsdauer des Kanals wird mit 50 Jahren veranschlagt, dies entspricht der unteren Grenze der Nutzungsdauer für neu-gebaute Kanäle gemäß der Kalkulationssätze nach DWA (DWA, 2012b).

### Produktsystem und Alternativen

Es wird ein Transportkanal mit typischen Parametern für die Schmutzwasser-Entwässerung untersucht. Hausanschlüsse, Einläufe und weitere Bestandteile der Entwässerungsinfrastruktur werden dabei nicht berücksichtigt.

Den Kern der Untersuchung stellen die Rohrleitungen mit einem Vergleich der Werkstoffe Beton, Stahlbeton (Stb), Steinzeug (Stz) und verschiedener Kunststoffe (PVC-U, PE-HD und PP) dar. Die Nennringsteifigkeitsklasse der untersuchten Kunststoffrohre beträgt mindestens SN 8. Die untersuchten Umweltwirkungen werden für die Größenkategorien DN 300 und DN 500 berechnet, um ein breiteres Anwendungsspektrum abzubilden.

Die Alternativen, Abmessungen und längenspezifische Gewichte der Rohrleitungen sind in der Tab. 1 dargestellt. Hieraus sind Unterschiede bei Gewicht und Abmessungen von biegesteifen- und Kunststoff-Rohrleitungen auf einen Blick festzustellen.

	<b>Beton</b>	<b>Stb</b>	<b>Stz</b>	<b>PVC</b>	<b>PEHD</b>	<b>PP</b>
DN300:						
ID/AD*	300/450	300/450	300/355	297/315	285/315	293/315
kg/lfm.	243	243	72,4	12	14	12
DN500:						
ID/AD*	500/670	500/650	496/581	470/499	452/500	467/500
kg/lfm.	430	373	174	28	36	28

\*Innendurchmesser (ID)/ Außendurchmesser (AD) in [mm]

Tab. 1: Abmessungen und Gewicht der Rohrleitungen

Ergänzend wird auch der Erd- und Oberbau berücksichtigt und dabei eine Sohltiefe von 3,5 m und Mindestabmessungen der Leitungsgräben mit senkrechten Grabenwänden gemäß DIN EN 1610 gewählt. Die Abmessungen des Leitungsgrabens sind demnach abhängig vom Außendurchmesser der Rohrleitungen, dabei wird angenommen, dass die Mindestabmessungen (AD + x) umgesetzt werden. Der Aufbau des Leitungsgrabens beinhaltet eine Typ-1 Bettung mit einer 20 cm dicken Bettungsschicht und eine Überdeckungshöhe über Rohrscheitel von 30 cm. Die Leitungszone (Bettung, Seitenverfüllung und Überdeckung der Rohrleitung) wird mit sandigem Liefermaterial verfüllt. Zur weiteren Verfüllung wird das Aushubmaterial verwendet und überschüssiger Aushub von der Baustelle abtransportiert. Die Dicke der abschließenden Asphaltsschicht beträgt 20 cm.

Ein weiterer integraler Bestandteil des Kanalbaus sind Kontrollschächte. Deshalb wird ein Kontrollschacht DN 1000 in Fertigteil Beton-Bauweise im Abstand von 39,1 m in die Bilanzierung einbezogen, dies entspricht dem durchschnittlichen Abstand von Schächten in Kanalnetzen in Deutschland (DWA, 2020d). Hilfsbaustoffe, wie beispielsweise der Verbau von Gräben, Baustelleneinrichtung und -sicherung werden ebenso wie die Herstellung von Baugeräten oder der Transport von Arbeitskräften und -geräten nicht berücksichtigt.

#### Lebenszyklusbetrachtung

Der Lebenszyklus gliedert sich gemäß DIN EN 15978 grundsätzlich in die Herstellungs-, die Errichtungs-, die Nutzungs- und Entsorgungsphase. Die Berechnung erfolgt für Module, welche diesen Phasen zugeordnet sind. Das GWP und der PE werden für die Module A1 bis A3, C2, C3 und D mit der Massenermittlung und vorhandenen Datensätzen der Ökobaudat berechnet. Die Berechnung für Modul A4 erfolgt je Baustoff und Baumaterial anhand der Massen, der Transportdistanzen und dem Transport-Datensatz der Ökobaudat. Je Baustoff und Baumaterial werden differenzierte Transportentfernungen gewählt, welche die Verfügbarkeit der Bauprodukte und deren Produktionsstandorte berücksichtigen (vgl. Tab. 2).

<b>Sand-Kies</b>	<b>Asphalt</b>	<b>Beton/Stb</b>	<b>Kunststoff</b>	<b>Steinzeug</b>
30	50	50	350	350

Tab. 2: Transportentfernung verschiedener Baustoffe in km

In Modul A5, Errichtung und Einbau, werden Prozesse des Baubetriebs bilanziert. Die maßgeblichen Einwirkungen auf das GWP und den PE entstehen beim Kanalbau durch den Dieserverbrauch, der bei Betrieb der Baumaschinen verursacht wird. Hierfür werden Hauptbauleistungen identifiziert und den Bestandteilen (Rohrleitungen, Erd- und Oberbau sowie Schächte) zugeordnet. Mittels baubetrieblicher Ansätze wird sowohl der Geräteeinsatz als auch der Zeitaufwand kalkuliert und daraus der Dieserverbrauch berechnet. Die Berechnung des GWP und des PE erfolgt je Bauleistung über den berechneten Dieserverbrauch und den Aushub-Datensatz der Ökobaudat.

Da es sich um eine Freispiegel-Entwässerung handelt, fällt durch den Betrieb der Infrastruktur in der Regel kein nennenswerter, energetischer und stofflicher Aufwand an. Hinsichtlich der Instandhaltung besteht für alle Alternativen die Annahme, dass während der Nutzungsdauer von 50 Jahren keine Erneuerungs- oder Sanierungsmaßnahmen erforderlich werden. Instandhaltungsmaßnahmen, wie das Spülen der Rohrleitungen, werden aufgrund des geringen Aufwands vernachlässigt. Deshalb wird die gesamte Nutzungsphase in der Bilanzierung nicht berücksichtigt. In der Entsorgungsphase wird das Modul C1, Abbruch nicht berücksichtigt, da der Aufwand für den Abbruch von Kanälen hauptsächlich aus Erd- und Oberbauarbeiten zum Freilegen der Bestandsleitung besteht. Diese werden in der Regel den Erneuerungsarbeiten oder der Verlegung neuer Rohrleitungen zugerechnet.

Ergänzend werden die Recyclingmöglichkeiten (Modul D) der ausgebauten Materialien in Form von Gutschriften in der Bilanzierung berücksichtigt, um die mögliche Wiederverwendung von Baumaterialien hinsichtlich einer Kreislaufwirtschaft zu berücksichtigen.

#### Datenerfassung und Wirkungsabschätzung

Für die Sachbilanz werden Kenndaten von Baustoff und -produkt Herstellern verwendet, um die erforderlichen Gewichte oder Volumina zu ermitteln. Die Erd- und Oberbaumengen werden anhand der Mindest-Grabenabmessungen nach DIN EN 1610 für einen laufenden Meter Kanal berechnet. Grundlage für die baubetriebliche Kalkulation sind Kalkulationstabellen und Leistungsansätze von Baumaschinen. Die verwendeten ökologischen Baudaten weisen bereits Wirkungskategorien auf. Der aggregierte Output des Produktsystems stellt somit die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dar. Das GWP wird dabei in der Einheit  $[\text{kgCO}_2\text{-Äq.}]$  und der PE in der Einheit  $[\text{MJ}]$  je funktioneller Einheit, also je 1m-Rohrleitung, angegeben. Die Ergebnisse werden summiert für den gesamten Lebenszyklus berechnet und verglichen.

### Ergebnisse

Die Diskussion und Darstellung der Ergebnisse folgen zunächst für die Rohrleitungen als Hauptbestandteil und anschließend in Ergänzung des Erd- und Oberbaus und der Schächte.

#### Ergebnisse der Rohrleitungen

Die Rohrleitungs-Bilanzierung macht deutlich, dass die biegesteifen Rohrleitungen ein geringeres GWP und einen geringeren PE aufweisen. Je größer die Rohrleitung, desto größer werden auch Unterschiede in den Bilanzierungsergebnissen (vgl. Fig. 1).

In der Größenkategorie DN 300 weist die Rohrleitung aus Stz das geringste GWP auf, gefolgt von den Werkstoffen Beton und Stb. Bei den Kunststoffrohren erzielt der Werkstoff PP das geringste GWP, gefolgt von PE und PVC-U. Die quantitative Betrachtung zeigt, dass in der Größenkategorie DN 300 Stz-Rohre ein um etwa 30 % geringeres GWP aufweisen als Rohre aus Kunststoff. Die Unterschiede werden größer, wenn man die Ergebnisse der Größenkategorie DN 500 untersucht. Das geringste GWP hat hier der Werkstoff Stb, wobei das GWP dabei etwa nur 50 % des GWP der Kunststoffe ausmacht.

Bei Vergleich des PE erzielen die Werkstoffe Beton und Stb wesentlich geringere Werte als Stz und die Kunststoffe. In beiden Größenkategorien zeigt der Werkstoff Beton den geringsten PE. Dabei liegt das Einsparpotenzial in der Größenkategorie DN 300 bei etwa 50 % und in der Größenkategorie DN 500 sogar bei 70 %. Der PE der Rohrleitung aus Stz kann zwischen den Werten der Werkstoffe Beton/Stb und den Kunststoffen eingeordnet werden.

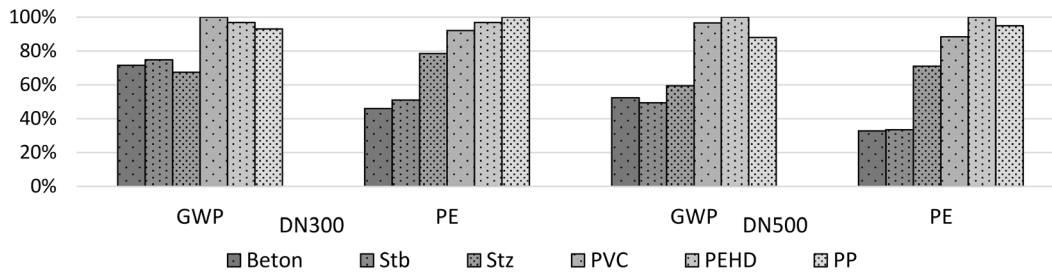


Fig. 1: Der Vergleich der Rohrleitungen zeigt Einsparpotenzial bei den biegesteifen Rohrwerkstoffen auf

Die Ergebnisse sind plausibel, da Beton- oder Stb-Rohre aus lokal verfügbaren Rohstoffen hergestellt werden und bei Produktion der Rohre vergleichsweise energiearme Prozesse, wie das Aushärten des fließfähigen Betons, stattfinden. Auch die Entsorgung der biegesteifen Rohrleitungen geht mit einem geringeren Aufwand einher. Weiter werden auch die Erkenntnisse der Studien von (Specht & Lorenz, 2009) und (Petit-Boixa, et al., 2014) bestätigt, die ebenfalls biegesteifen Rohrleitungen geringere Umweltwirkungen ausweisen.

#### Ergebnisse für den gesamten Kanal

Werden die Berechnungen des GWP und der PE der Rohrleitung, des Erd- und Oberbaus und der Schächte zusammengeführt, schwindet das Einsparpotenzial deutlich. Kunststoffrohre haben geringere Wandstärken als biegesteife Rohre und deshalb sind gem. DIN EN 1610 auch kleinere Leitungsgräben erforderlich. Folglich ist auch der Aufwand des Erd- und Oberbaus und damit auch das GWP und der PE geringer als bei den biegesteifen Rohrleitungen. Zusätzlich wirkt sich auch die Bilanzierung des Schachts relativierend aus, da diese trotz des Abstands von knapp 40 m einen nennenswerten Anteil der untersuchten Umweltwirkungen des Kanalsystems ausmachen.

	DN 300		DN 500	
	GWP*	PE*	GWP*	PE*
Beton	171,9	<b>1390</b>	245,1	2033
Stb	174,2	1436	<b>237,6</b>	<b>2019</b>
Stz	<b>157,6</b>	1582	244,3	3002
PVC	174,9	1663	291,5	3250
PEHD	172,6	1707	297,2	3141
PP	170,1	1736	278,5	2730

\*GWP in [in [kg CO<sub>2</sub> Äq. / lfm.] / PE in [MJ / lfm.]

Tab. 3: Bilanzierungsergebnisse des GWP und des PE der Kanalsysteme mit verschiedenen Rohrwerkstoffen

Unter Berücksichtigung aller Bauteile erzielt in der Größenkategorie DN 300 die Variante mit Rohren aus Steinzeug das geringste GWP, während die Alternativen ein etwa um 10 % höheres GWP aufweisen (vgl. Fig. 2).

In der Größenkategorie DN 300 und unter den gewählten Randbedingungen können Einsparungen von Treibhausgasemissionen, durch die Verwendung alternativer Rohrwerkstoffe demnach als gering bezeichnet werden. In der Größenkategorie DN 500 weisen die Systeme mit biegesteifen Rohrleitungen in etwa das gleiche GWP auf. Hier besteht gegenüber den Systemen mit Kunststoff eine nennenswerte Einsparung von etwa 20 %.

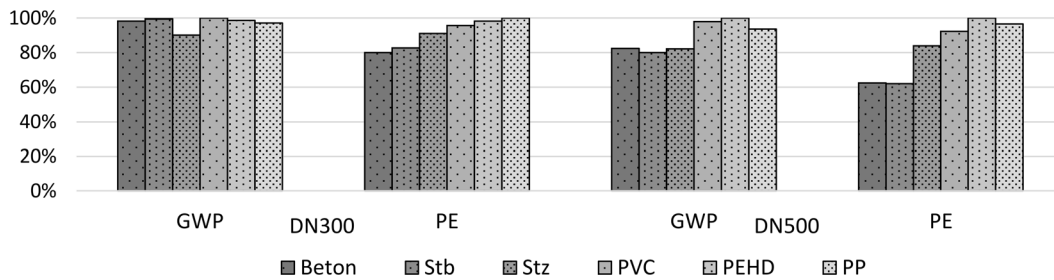


Fig. 2: Bei Bilanzierung aller Bestandteile liegen die Ergebnisse deutlich näher aneinander

Hinsichtlich des PE sind die Einsparpotenziale hingegen wesentlich größer. In der Größenkategorie DN 300 erzielen Kanalsysteme mit Beton- und Stb die besten Ergebnisse, denn der PE fällt etwa um 20 % geringer aus als bei den Kanalsystemen mit Kunststoffrohren. In der Größenkategorie DN 500 beträgt das Einsparpotenzial sogar bis zu 40 %.

Bei Betrachtung eines gesamten Kanalsystems ist der Anteil der untersuchten Bestandteile besonders interessant. Bemerkenswert ist dabei Beitrag des gesamten Erd- und Oberbaus, denn dieser macht in der Größenkategorie DN 300 bei den Systemen mit biegesteifen Rohrleitungen den Großteil des GWP und des PE aus (vgl. Fig. 3).

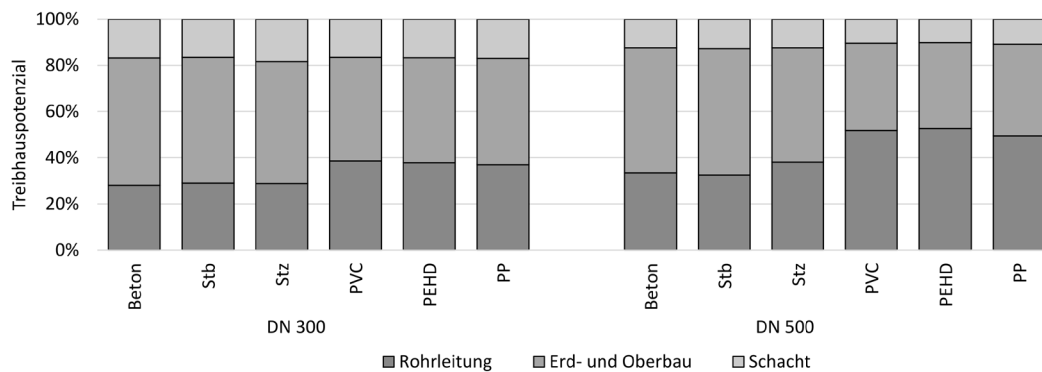


Fig. 3: Der Vergleich der Bestandteile zeigt den großen Einfluss des Erd- und Oberbaus auf das gesamte Treibhauspotenzial

Auch bei Systemen mit Kunststoffrohren kann der Erd- und Oberbau als bedeutender Treiber des GWP und des PE identifiziert werden. Die Rohrleitungen weisen einen ebenso maßgeblichen Anteil am GWP und vor allem am PE auf. Bei größeren Rohrdurchmessern verlagern sich die Anteile des GWP und des PE zur Rohrleitung und einhergehend nehmen auch die Anteile der Herstellungsphase zu. Dies kann insbesondere bei den Kunststoffrohren festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen auch, dass der Anteil der Schächte am GWP und PE nicht zu vernachlässigen ist, was vor allem in der Größenkategorie DN 300 zu beobachten ist.

Die differenzierte Untersuchung der Konstruktionsphase zeigt, dass der Großteil auf den Einbau auf der Baustelle entfällt. Die Transporte der Bauprodukte und Baustoffe haben je nach Werkstoff einen relativ kleinen Anteil am gesamten GWP und am PE von etwa 8 bis 15%. Dies stellt einen Unterschied zu den Ergebnissen von (Petit-Boixa, et al., 2014) dar, in denen deutlich höhere Anteile der Transporte angegeben werden. Eine mögliche Begründung ist, dass bei der vorliegenden Berechnung der Transportdatensatz der ÖkobaDat angewendet wird. Dieser beinhaltet einen EURO-4 LKW mit einer 85 % Gewichtsauslastung im Speditionsverkehr. Beim Transport von Rohren ist insgesamt von einer geringeren Gewichtsauslastung auszugehen, da bedingt durch den Querschnitt, viel „Luft“ transportiert wird. Auch der Transport von Baustoffen kann sich hinsichtlich der Auslastung, der Größe der LKWs aber auch durch die Anzahl der Leerfahrten vom Speditionsverkehr unterscheiden. Um die Berechnung zu konkretisieren, sind jedoch genauere Angaben zur Gewichtsauslastung und zum Einsatz der LKWs erforderlich, daraus kann jedoch ein interessantes Forschungsfeld für zukünftige Untersuchungen des Rohrleitungsbaus abgeleitet werden.

**Fazit**

Die Bilanzierung umfasst den Vergleich des Treibhauspotenzials (GWP) und des Primärenergiebedarfs (PE) für den Kanalbau mit alternativen Rohrwerkstoffen, bei dem typische Randbedingungen und Parameter für den Bau eines Schmutzwasserkanals berücksichtigt werden. Dies ist von besonderem Interesse, da der Betrieb bzw. die Nutzung des Kanals geringe, bis keine Auswirkungen auf das GWP und den PE hat und negative Auswirkungen nur minimiert werden, wenn bereits bei der Planung ökologische Aspekte durch den Einsatz geeigneter Baustoffe, -materialien und -verfahren berücksichtigt werden. Bisherige Untersuchungen hierzu beziehen sich nicht auf den deutschen Raum oder beinhalten keine gesamtheitliche Betrachtung des Kanalbaus.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass unter den gesetzten Randbedingungen der Einsatz von Beton- oder Stahlbetonrohren bei dem Bau von Abwasserkanälen meistens zu einem geringen GWP und einem deutlich geringen PE führen. Der Einsatz von Kunststoffrohren hingegen, schlägt sich laut Untersuchung in höheren Werten bei GWP und PE nieder. Dies wird damit begründet, dass die Herstellung und Entsorgung der Kunststoffrohre mit einem erhöhtem GWP und deutlich größerem PE einhergehen, welche nicht durch Einsparungen beim Transport und beim Einbau auf der Baustelle kompensiert werden. Es ist jedoch erforderlich lokale Randbedingungen, Bautechniken und den erforderlichen Baugeräteeinsatz genau zu berücksichtigen, da sich beispielsweise die Dimensionen der Rohrleitungen und die Abmessungen der Leitungsgräben eindeutig auf die Ergebnisse auswirken und folglich auch die Einsparpotenziale variieren.

Bemerkenswert ist der Anteil des Erd- und Oberbaus und der Anteil der Errichtungsphase, deshalb ist eine genaue Analyse des Baubetriebs und eine differenzierte Berücksichtigung der Konstruktionsweise ebenso wichtig wie die "cradle to gate-Untersuchung" der Bauprodukte. Neben dem Einsatz ökologisch sinnvoller Bauprodukte ist es ratsam auch den Einsatz der Baugeräte und deren Dieselverbrauch zu fokussieren. Gleichzeitig bedeutet dies, dass ein besonderer Wert auf den fachgerechten Einbau gelegt werden muss, um eine lange Nutzungsdauer der Infrastruktur zu gewährleisten, denn umfangreiche Erneuerungsmaßnahmen schlagen sich wiederum deutlich auf das GWP und den PE nieder. Eine gezielte Bündelung verschiedener Bauarbeiten, wie die Erneuerung von Straßen oder parallele Leitungsarbeiten erhöhen die Effizienz und helfen insgesamt dabei bauliche Eingriffe und daraus folgende negative ökologische Auswirkungen zu minimieren.

Die Ökobilanzierung des Kanalbaus bietet vielfältige Möglichkeiten für weitere, ergänzende Untersuchungen. Diese können beispielsweise mit einer Berechnung weiterer Wirkungskategorien wie dem Versauerungspotential oder dem Wasserverbrauch ergänzt werden. Erneute, differenzierte Untersuchungen hinsichtlich der Transporte sind von besonderem Interesse, da die erzielten Ergebnisse von bisherigen Ergebnissen einer anderen Studie abweichen. Auch bieten weitere Bestandteile des Kanalbaus, wie alternative Verfüllbaustoffe oder Verbaumaßnahmen ein interessantes Forschungsfeld. Einhergehende Berechnungen der Lebenszykluskosten runden die Bewertung der Kanalsysteme hinsichtlich der Nachhaltigkeit ab und können förderlich sein, dass die erzielten Ergebnisse auch in der Praxis Anwendung finden.

## Literatur

Akhtar, S., Reza, B., Hewage, K., Shahriar, A., Zargar, A., & Sadiq, R. (2014). *Life cycle sustainability assessment (LCSA) for selection of sewer pipe materials*. In *Clean Techn Environ Policy* (S. 973-992). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

DIN EN 15978. (2012). *DIN EN 15978:2012-10 - Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden*. Berlin: Beuth.

DIN EN ISO 14040. (2021). *DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth.

DWA. (2009b). *Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2009*. Hennef.

DWA. (2012b). *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen*. Hennef.

DWA. (2016). *Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2015. Korrespondenz Abwasser, 6/2016*.

DWA. (2020d). *Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2020*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

Petit-Boixa, A., Sanjuan-Delmása, D., Gasola, C. M., Villalba, G., Suárez-Ojedac, M. E., Gabarrella, X., & Josad, A. R. (2014). *Environmental Assessment of Sewer Construction in Small to Medium Sized Cities Using Life Cycle Assessment*. *Water Resources Management* 28.

Specht, E., & Lorenz, N. (2009). *Werkstoffe für den Kanalbau - Wieviel CO2 muss sein?* In 23. Oldenburger Rohrleitungsforum 5./6. Februar. Vulkan Verlag.

Vahidi, E., Jin, E., Das, M., & Singh, M. Z. (2015). *Comparative Life Cycle Analysis of Materials in Wastewater Piping Systems*. *Procedia Engineering* 118 ( 2015 ), S. 1177 – 1188.