

RECHERCHE UND BEWERTUNG DES WISSENSSTANDS ZU ABRIEB IN ABWASSERROHREN AUS KUNSTSTOFF

Recherche und Bewertung des Wissensstands zu Abrieb in Abwasserrohren

Autoren: Jan Blömer, Jürgen Bertling

Kontakt: **Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT**
Osterfelder Straße 3
46047 Oberhausen

Korrespondenzautor:
jan.blömer@umsicht.fraunhofer.de

Ausgabe: August 2021

Nutzungsbedingung:

Zitierweise: Blömer, Jan; Bertling, Jürgen: Recherche und Bewertung des Wissensstands zu Abrieb in Abwasserrohren aus Kunststoff, Oberhausen, Fraunhofer UMSICHT (2021) 38 Seiten

DOI <https://doi.org/10.24406/umsicht-n-641004>

Erklärung zu Finanzierung, Verantwortlichkeiten und Nutzungsbedingungen

Die Erstellung des vorliegenden Berichts wurde von der Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e. V. (FBS) beauftragt.

Die zugrundeliegende Datenbasis wurde durch Recherche im Rahmen des Projekts gewonnen. Darüber hinaus wurden aber auch im erheblichen Umfang Ergebnisse der eigenen Vorlauftforschung von Fraunhofer UMSICHT, insbesondere der Konsortialstudie Mikroplastik in 2018 verwendet.

In der Formulierung dieses Berichts waren die Autoren frei; eine Einflussnahme durch den Auftraggeber oder Dritte fand nicht statt. Die Ergebnisse stellen nicht in jedem Fall die Sicht der beauftragenden Organisation, der FBS e. V. oder von Fraunhofer UMSICHT dar, sondern in erster Linie die Sichtweise der Verfassenden.

Es konnten keine umfassenden Daten zum Abrieb in Kunststoffrohren über die Lebensdauer recherchiert werden. Die gezeigten Ergebnisse sind erste Abschätzungen auf der Basis von plausiblen Annahmen. Diese sollen dazu dienen, eine erste Einschätzung der Relevanz des Mikroplastikabriebs in Abwasserrohren vornehmen zu können, um ggf. weitere Maßnahmen ergreifen zu können.

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt. Des Weiteren ist es unter einer Creative-Commons-Lizenz verfügbar (cc-by-nc-sa). Das Werk oder Teile davon dürfen für nicht-kommerzielle Zwecke vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden, sofern auf die Urhebenden (Verfassende, Herausgebende) verwiesen wird. Im Falle einer Verbreitung sind die gleichen Lizenzbedingungen, unter welche dieses Werk fällt, anzuwenden. Jede kommerzielle Verwertung ohne schriftliche Genehmigung der Verfassenden ist unzulässig. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in Systeme(n) der elektronischen Datenverarbeitung.

Inhalt

.....
Inhalt
.....

1	Vorbemerkung	5
2	Aufgabenstellung	9
3	Grundlegende Verschleißmechanismen	10
3.1	Verschleißverhalten von Polymeren	13
3.2	Ergebnisse aus der Literatur	14
4	Untersuchungsverfahren zum Abriebverhalten von Werkstoffen in wässrigen Medien	18
4.1.1	Verschleißtopf-Verfahren	18
4.1.2	ASTM C 1138	19
4.1.3	ASTM C 418	19
4.1.4	ASTM 779/C	20
4.1.5	Dresdener Verschleißtrommel	20
4.1.6	Verfahren nach Bania	21
4.1.7	Verschleißtrommel nach Vogel	22
4.1.8	Kreisförmiges Gerinne	22
4.1.9	Darmstädter Kipprinne	23
4.1.10	Verschleißtrommel nach Röhnisch und Vollmer	23
4.1.11	ASTM Slurry-Test	24
5	Abschätzungen der Emission an Kunststoffrohren	25
5.1	Emissionen während des Betriebs	25
5.2	Emissionen während der Verlegung	31
5.3	Bewertung	33
6	Literatur	34

1 Vorbemerkung

Kunststoffe sind in unserer Gesellschaft allgegenwärtig. Große Mengen davon gelangen jedes Jahr in die Umwelt¹. Fraunhofer UMSICHT arbeitet seit 2015 daran, den Erkenntnisstand rund um die Thematik Kunststoffemissionen zu verbessern. Der Schwerpunkt unserer Betrachtungen liegt auf den Quellen, Freisetzungsmechanismen, Emissionsmengen und den Eintragungspfaden in die Umwelt sowie auf der Entwicklung von Strategien und Technologien zur Vermeidung oder Rückhaltung der Emissionen.

In unserer Veröffentlichung »Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik – Ursachen, Mengen Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen« von Juni 2018 wurden die Problematik von Kunststoffeinträgen in die Umwelt und die Größenordnung der Kunststoffemissionen in Deutschland dargestellt². Insgesamt wurden ca. 70 Quellen für Mikroplastikemissionen identifiziert. Die (primären) Mikroplastikemissionen in Deutschland wurden auf 330.000 Tonnen pro Jahr geschätzt. Die Schätzungen zur Emission von Makroplastik (»Plastic Litter«) betragen 115.000 Tonnen pro Jahr. Die Menge an Mikroplastik in der Umwelt übersteigt somit die vielerorts sichtbare Menge an Makroplastik.

Der Begriff »Kunststoffe«, auch »Plaste«, »Technopolymere« oder umgangssprachlich »Plastik« genannt, bezeichnet eine Gruppe von Werkstoffen, die nicht in der Natur vorkommen, sondern vom Menschen synthetisiert werden³. Einzelne Monomereinheiten werden in Verkettungsreaktionen zu langkettigen Makromolekülen, den Polymeren, verknüpft⁴. Zusammen mit Additiven und Füllstoffen bilden sie den Kunststoff.

Es existieren auch natürliche Polymere (z.B. Cellulose oder Chitin). Von Kunststoffen ist dann die Rede, wenn die synthetisierten Polymere nicht natürlichen Ursprungs sind, natürliche Polymere chemisch modifiziert werden und/oder den natürlichen Polymeren weitere Zusatzstoffe (Additive und Füllstoffe) beigemischt werden, wodurch ein Werkstoff entsteht, der in dieser Form nicht mehr in der Natur vorkommt⁵.

Als Additive werden Zusatzstoffe bezeichnet, die chemisch an die Polymerketten gebunden, also im Kunststoff gelöst sind. Beigefügt werden sie, um bestimmte Eigenschaften beim Kunststoff zu erzeugen. Sie fungieren als Flammenschutzmittel, Elastifizierungshilfen, Weichmacher, Bindemittel, UV-Stabilisatoren und vieles mehr.

Als Füllstoffe oder auch Verstärkungstoffe werden Zusatzstoffe bezeichnet, welche die mechanischen, elektrischen oder verarbeitungstechnischen Eigenschaften eines Stoffs, in diesem Fall eines Kunststoffs, (stark) ändern oder beeinflussen. Im Gegensatz zu den Additiven sind sie nicht in der Polymermatrix gelöst, sondern liegen ungelöst im Kunststoff vor. Füllstoffe können sowohl organisch (z. B. Kork, Hanf, Holzmehl, Zellstoff, Kreide) als

¹ Geyer, Jambeck und Law (2017).

² Bertling, Hamann und Bertling (2018).

³ Frank et al. (2011).

⁴ Bonten (2016).

⁵ So zum Beispiel bei der Vulkanisation des Naturproduktes Kautschuk, dem Schwefel und verschiedene Additive beigemischt werden, wodurch ein elastomerer Kunststoff, auch Gummi genannt, entsteht.

auch anorganisch sein (z.B. Glasfaser, synthetische Silikate, Oxide, Hydroxide).

Gelangen Kunststoffabfälle in die Umwelt werden diese als Kunststoffemissionen bezeichnet. Kunststoffobjekte werden dabei in Makro- (größere Kunststoffteile) und Mikroplastik (kleinere Kunststoffteile) unterschieden.

Für den Begriff »Mikroplastik« existiert bisher keine einheitliche, wissenschaftliche Definition. Etwa seit dem Jahr 2000 taucht der Begriff in der wissenschaftlichen Fachliteratur auf⁶. Erstmals definiert wurde er im Jahr 2008 von der NOAA⁷. Durch die weite Verbreitung von Mikroplastik in der Umwelt, die Vielzahl möglicher Quellen und die daraus resultierende Relevanz der Thematik für verschiedene Bereiche des Lebens und der Wirtschaft, existieren heute zahlreiche unterschiedliche Definitionen von einer Vielzahl beteiligter Akteure mit teilweise differierenden Interessen.

Die bisherige Begriffsbildung erfolgte im Wesentlichen auf Basis physikalischer Eigenschaften (Form, Größe, Material) und pragmatischer Erwägungen (Abgrenzung zu Nanopartikeln, verfügbare Messtechnik etc.). Eine problemorientierte Begriffsschärfung zur Eingrenzung einer Ober- und Untergrenze und der relevanten Stoffgruppen sowie eine Verknüpfung mit human- und ökotoxikologischen Erkenntnissen hat es bisher nicht gegeben und ist noch Gegenstand der Forschung⁸.

Wichtige Kriterien, welche in die Begriffsdefinitionen einfließen und in denen sie sich unterscheiden, sind die chemische Zusammensetzung, der Aggregatzustand, die Löslichkeit, die Größe, die Form und Struktur, die Entstehungsart und in einigen Fällen auch die Farbe von Mikroplastik⁹. Die ersten drei Kriterien beschreiben dabei im Wesentlichen, welche Stoffgruppen zum Mikroplastik gezählt werden, während die restlichen Kriterien den Mikroplastik-Begriff weiter ausdifferenzieren.

Das am häufigsten herangezogene Kriterium zur Definition von Mikroplastik ist die Größe¹⁰. Durchgesetzt hat sich eine Obergrenze von 5 mm, die in den meisten Definitionen genannt wird. Entstanden ist diese Obergrenze eher aus pragmatischen Überlegungen und dem Wunsch heraus, sämtliche »kleinen« Kunststoffpartikel in die Definition einzuschließen. Auch wurde vermutet, dass kleine Kunststoffpartikel bei Aufnahme in den Organismus andere (Schad-)Wirkungen verursachen, als große Kunststoffteile¹¹.

Weiterhin sollten Kunststoffpellets, ein Zwischenprodukt in der Kunststoffindustrie, zwischen zwei und fünf Millimetern groß, einbezogen werden, die im Rahmen von Umweltmonitorings an zahlreichen Stränden auf der

⁶ Bspw. bei Thompson et al. (2004).

⁷ NOAA (2017).

⁸ Bertling, Hamann und Bertling (2018).

⁹ Hartmann et al. (2019).

¹⁰ Hartmann et al. (2019).

¹¹ Bertling, Hamann und Hiebel (2018).

Welt gefunden wurden¹². Aus wissenschaftlicher Sicht ist diese Obergrenze nur schwer begründbar^{13 14}, da einerseits Verknüpfungen zu human- und ökotoxikologischen Erkenntnissen fehlen und andererseits neue Technologietrends, wie beispielsweise Stäbchengranulate mit zehn Millimetern Durchmesser¹⁵, die Sinnhaftigkeit dieser Obergrenze infrage stellen¹⁶.

In vielen wissenschaftlichen Untersuchungen wird auch eine weitere Ausdifferenzierung der Größeneinteilung nach unten, bis in den Nanometerbereich, vorgenommen, da die Größe der Partikel entscheidenden Einfluss auf deren Verhalten in der Umwelt nimmt^{17 18 19 20}. Die verwendeten Einteilungen und Definitionen sind bislang jedoch nur mit wenigen experimentellen Daten und Erkenntnissen hinterlegt und in ihrer Verwendung nicht konsistent²¹.

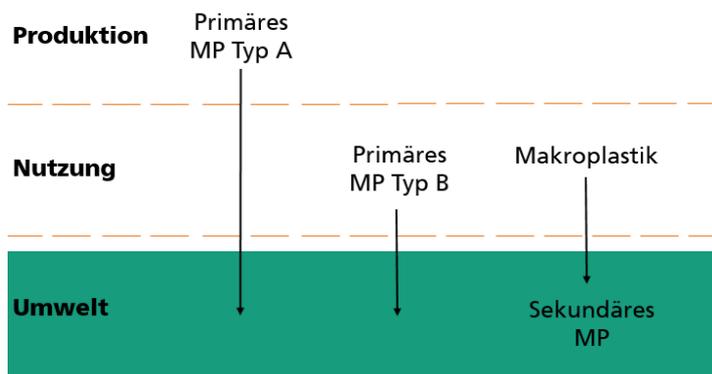


Abbildung 1: Einteilung von Mikroplastik in Abhängigkeit der Entstehungsebenen: Mikroplastik Typ A (intendiert), Mikroplastik Typ B (Abrieb und Verschleiß) und Sekundäres Mikroplastik (aus Makroplastik in der Umwelt) [eigene Darstellung]

Grundsätzlich lässt sich Mikroplastik nach der Entstehungsart in drei Kategorien aufteilen (Abbildung 1). Das Primäre Mikroplastik des Typs A wird schon bei der Herstellung eines Produkts (bewusst) als Mikroplastik zugegeben (z.B. Microbeads in Kosmetik, Kunststoffgranulat in Kunstrasenplätzen). Das Primäre Mikroplastik des Typs B entsteht bei der Nutzung eines Produkts durch Abrieb- und sonstige Verschleißprozesse (z. B. Abrieb von Reifen, Faserabrieb von Textilien beim Waschen). Das Sekundäre Mik-

¹² Bertling, Hamann und Bertling (2018).

¹³ Bertling, Hamann und Bertling (2018).

¹⁴ Hartmann et al. (2019).

¹⁵ EMS Grivory (2017).

¹⁶ Bertling, Hamann und Hiebel (2018).

¹⁷ Hartmann et al. (2019).

¹⁸ Besseling et al. (2016).

¹⁹ Hüffer et al. (2017).

²⁰ Scherer et al. (2017).

²¹ Vgl. hierzu Definitionen von: Gregory und Anrady (2003); Browne, Galloway und Thompson (2007); Moore (2008); Ryan et al. (2009); Costa et al. (2010); Desforges et al. (2014); Koelmans, Besseling und Shim (2015); Wagner et al. (2014); Arthur, Baker und Bamford (2008); European Commission (2011).

roplastik entsteht durch Verwitterungsprozesse erst nach der Nutzung eines Produkts aus Makroplastik in der Umwelt (z. B. eine weggeworfene Plastiktüte, die nach und nach zu Mikroplastik zerfällt).

Nach Bertling et al. 2018 definiert Fraunhofer UMSICHT Mikroplastik wie folgt:

»Mikroplastik« bezeichnet unter Standardbedingungen feste Fasern oder Partikel²² aus thermoplastischen, elastomeren oder duroplastischen Kunststoffen, die direkt oder indirekt durch menschliches Handeln in die Umwelt gelangen.

Nicht eingeschlossen in die Definition sind gelöste, dispergierte, gelartige, flüssige und natürliche Polymere sowie Sekundäres Mikroplastik. Diese sind, sofern sie durch menschliche Aktivitäten umgewandelt oder in andere Umweltkompartimente überführt wurden, ebenso wie Mikro- und Makroplastikemissionen, ein Teil der Gesamtproblematik anthropogener Polymere in der Umwelt, also jeglicher von Menschen in die Umwelt emittierter Polymere.

Die Identifikation von Emissionsquellen und den zugehörigen Entstehungsmechanismen von Mikroplastik sind noch nicht abgeschlossen. Es ist davon auszugehen, dass weitere, bisher unbekannte Quellen und Mechanismen existieren. Für etwa ein Drittel der bekannten Quellen und Mechanismen konnte, aufgrund mangelnder Daten, bisher keine Emissionsabschätzung durchgeführt werden.

²² Unter »Fasern und Partikel« werden alle denkbaren Formen von Mikroplastik zusammengefasst. Ein Ausschluss auf Grund der Form findet nicht statt.

2 Aufgabenstellung

Gegenstand dieser Untersuchung ist gemäß Angebot 097/2020/440/26:

- A) Es wird eine Literaturstudie zum Abrieb von Abwasserrohren insbesondere als Folge von partikelbeladenen Strömungen erstellt. Dazu wird der Wissensstand zum Abrieb an überströmten Kunststoffoberflächen (**Kap. 3**) sowie im Speziellen bei der Durchströmung von Rohren dargestellt. Wissenschaftliche Untersuchungen und standardisierte Testverfahren werden in einer Übersicht verglichen und kritisch evaluiert (**Kap 4**).
- B) Aufbauend auf den Rechercheergebnissen erstellen wir eine erste Abschätzung zur mengenmäßigen Relevanz des Problems *Rohrabrieb* im öffentlichen und privaten Abwasserkanalnetz im Vergleich zu anderen Mikroplastikquellen (**Kap. 5**).

3 Grundlegende Verschleißmechanismen

Reibung und Verschleiß sind Systemeigenschaften, d. h. es kommt auf das Zusammenspiel von Wandmaterial, Abrasivmaterial und umgebendem Medium an. Verschleiß bezeichnet allgemein den Materialverlust einer Oberfläche durch verschiedene Effekte.

In wässrigen Medien unterscheidet man Flüssigkeitserosion, Tropfenschlagerosion, Kavitationserosion und Hydroabrasion^{23,24} (Abbildung 2) In der Abwasserkanalisation mit relativ geringen Strömungsgeschwindigkeiten kommt der Hydroabrasion die höchste Bedeutung zu.

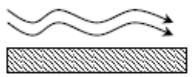
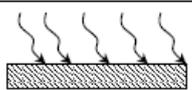
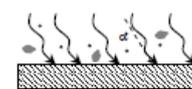
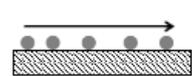
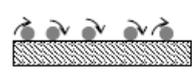
System	Tribologische Beanspruchung	Verschleissart	Beispiel
Festkörper, Flüssigkeit	Strömen 	Flüssigkeitserosion	Kanäle, befestigte Gerinne
	Stossen 	Tropfenschlagerosion	Wasserstrahlen von Oberflächen, Brunnen
	Schwingen Stahlblech, verankert 	Ermüdungsbruch	mit Stahlpanzern versehene Wehrkronen
	Stossen durch implodierende Dampfblasen Geschwindigkeit i.d.R. > 10 m/s 	Kavitation	Überlauf bei Dämmen
Festkörper, Flüssigkeit, Feststoffen	Strömen 	(Hydro-) Abrasivverschleiss	befestigte Gerinne, Wehre, Tosbecke;
	Strömen, Stossen $\alpha = \text{Anstrahlwinkel}$ 		
Festkörper, Feststoff	Gleiten 	Zweikörperabrasivverschleiss	Silos für Feststoffe, Greifer in Bunker, Fahrzeuge an Leitplanken an Strassen
	Stossen 		
	Rollen, Wälzen 	Roll-, Wälzverschleiss	Fahrbahnplatten, befahrene Industrieböden

Abbildung 2: Verschleißmechanismen ²⁵

²³ Helbig et al. (2005).

²⁴ Jacobs (2002).

²⁵ Jacobs (2002).

Der Verschleiß von Oberflächen kann durch unterschiedliche Mechanismen ausgelöst werden:

Abrasion

- Adhäsion
- Chemischer Verschleiß/Korrosion

Kunststoffe sind gegenüber den in Abwässern herrschenden Bedingungen chemisch sehr beständig. Adhäsiiver Verschleiß tritt im wässrigen Milieu auch nur selten auf. Der vorherrschende und in dieser Studie betrachtete Verschleißmechanismus ist die Abrasion.

Bei der Abrasion werden zunächst zwei Fälle unterschieden: Je nachdem, ob das schleißende Material (Härte H_A) weicher oder härter als der zu untersuchende Werkstoff (Rohrwand, Härte H_M) ist, spricht man von Tief- oder Hochlage des Verschleißes. Auch in der Tief- oder Hochlage ist Verschleiß möglich! Aber die Intensität ist in der Hochlage wesentlich höher (Abbildung 3).

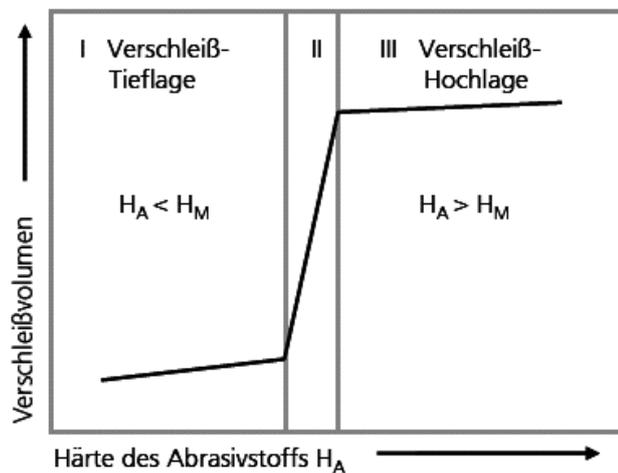


Abbildung 3: Verschleiß: Tief- und Hochlage in Abhängigkeit der Härte von Abrasivstoff und Werkstoff (Fraunhofer UMSICHT)

Im vorliegenden Fall liegt bei der Paarung von Kunststoffrohren mit Sand, Kies und Split als Abrasivstoff auf jeden Fall Hochlage vor; bei Betonrohren weisen die Zuschlagsstoffe dieselbe Härte wie der Abrasivstoff auf. Die Bindephase des Betons ist hingegen deutlich weicher als die Zuschlagstoffe, sodass diese zuerst ausgewaschen wird (Abbildung 4).

Bei der Abrasion unterscheidet man verschiedene Mechanismen, wie der Abrasionskörper in das Material eindringen kann. Dies hängt im Wesentlichen von der Härte und plastischen Verformbarkeit des Materials ab. Abbildung 5 zeigt die Mechanismen mit ansteigender Härte: Mikroflügen, Mikrospanen, Mikrozerrüttung, Mikrobrechen. Bei Kunststoffen tritt überwiegend Mikroflügen und Mikrospanen auf; bei Beton eher Oberflächenzerrüttung und Mikrobrechen.



Abbildung 4: Ausgewaschene Betonmatrix²⁶

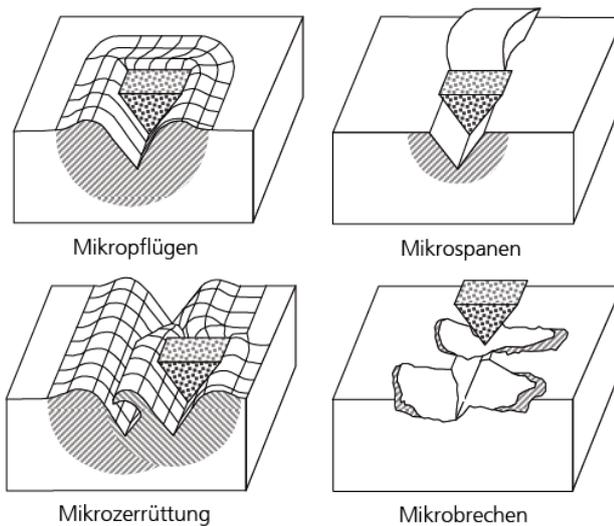


Abbildung 5: Abrasionsmechanismen²⁷

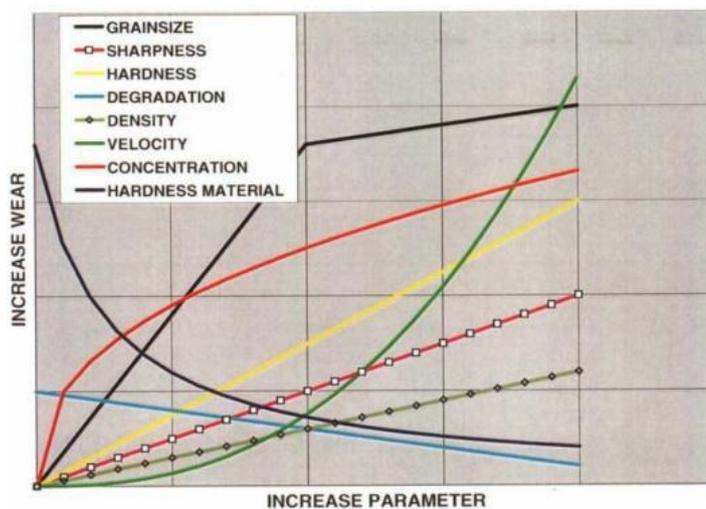


Abbildung 6: Qualitative Darstellung des Einflusses verschiedener Parameter auf das Verschleißverhalten²⁸ (entnommen²⁹)

²⁶ Jacobs (2002).

²⁷ Rechberger (2012)

²⁸ Thaletec GmbH (2011).

²⁹ Hönig (2013).

Abbildung 7 zeigt die zwei Typen der Hydroabrasion: Je nach Auftreffwinkel kann Prall- oder Gleitverschleiß auftreten. Kunststoffe haben in der Regel ein gutes Verschleißverhalten gegen Prall, da die Belastungsspitzen durch elastische und plastische Verformung abgefedert werden. Demgegenüber kann das Gleiten scharfkantiger Körper zu Mikrospanen führen.

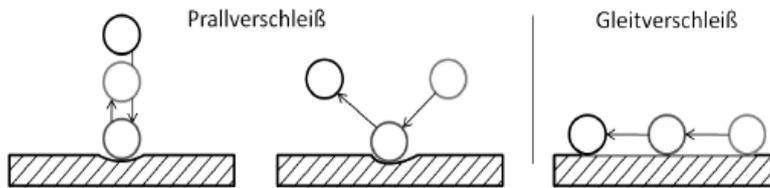


Abbildung 2-9: Wirkmechanismen der Hydroabrasion

Abbildung 7: Prall- und Gleitverschleiß³⁰

3.1 Verschleißverhalten von Polymeren

Die erstaunlich hohe Abriebfestigkeit vieler Polymere verwundert auf den ersten Blick, da Polymere eine geringe Härte und geringe Festigkeit aufweisen, so dass sie praktisch immer in Verschleiß-Hochlage (s. o.) angewandt werden.

Jedoch weisen sie gegenüber anderen Kanalbaumaterialien (Ziegel, Beton, Steingut, Guss) andere Eigenschaften auf, die sich letztlich verschleißmindernd auswirken:

- Die verwendeten Kunststoffe weisen im wässrigen Milieu keinerlei Korrosion auf.
- Im Auslieferungszustand besitzen sie die glattesten Oberflächen.
- Die hohe Elastizität und Plastizität ist bei Prallbeanspruchung von Vorteil, da punktuelle Belastungen durch Verformung oder Dämpfung auf einen größeren Bereich verteilt werden, und lokale Überlastungen vermieden werden.
Dies ist beispielsweise auch bei der mechanischen Zerkleinerung erkennbar: Der Energiebedarf ist bei Polymeren wesentlich höher (mehr als der Faktor 10) als bei mineralischen Werkstoffen.
- Durch die makromolekulare, in der Regel teilkristalline Struktur ergibt sich eine ausgeprägte räumliche Kraftverteilung. Dies beugt Oberflächenzerrüttung, die zu einer zeitlichen Entfestigung der Oberfläche führt, vor.

In der Bau-, Steine-, Erdenindustrie werden sogar Elastomere (Gummi), also besonders „weiche“ Werkstoffe erfolgreich als Schutzauskleidung eingesetzt.

³⁰ Hönig (2013).

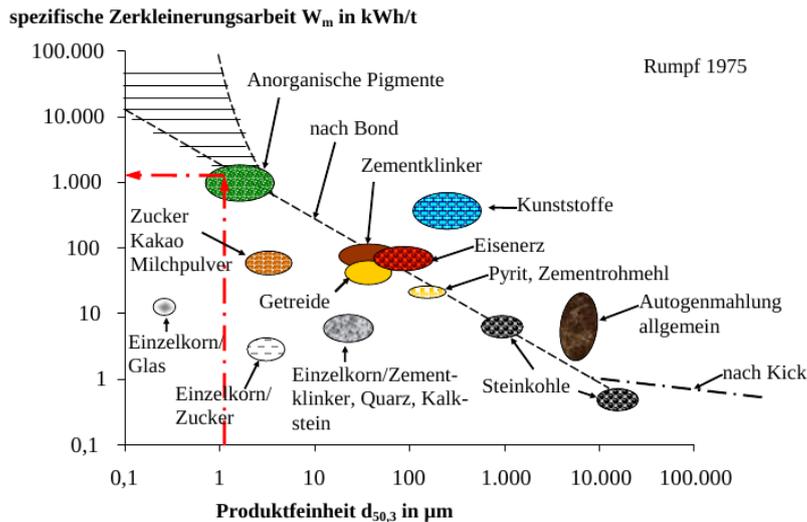


Abbildung 8: Spezifische Zerkleinerungsarbeit verschiedener Stoffe³¹

Bewertung

Aufgrund der gänzlich anderen Werkstoffeigenschaften ist bei der Auswahl eines Prüfverfahrens, das den Verschleiß durch Steigerung der Intensität im Zeitraffer ablaufen lassen soll, große Sorgfalt insbesondere beim Up-Scaling und der Übertragung in reale Verhältnisse zu verwenden. Durch die unterschiedlichen Verschleißmechanismen und -regime können die Übertragungsfunktionen bei verschiedenen Werkstoffen sehr komplex und unterschiedlich sein, sodass das Verhalten unter unterschiedlichen Randbedingungen kaum vergleichbar bzw. prognostizierbar ist.

3.2 Ergebnisse aus der Literatur

In der Literatur gibt es etliche Beiträge, die versuchen, systematische Zusammenhänge der Hydroabration von Polymeren abzuleiten. Bisher scheinen hierzu aber keine erfolgreichen Modelle entwickelt worden zu sein.

Stabik et al.³² führen Versuche mit Darmstädter Rinne durch. Materialien waren u. a. PVC-U und PP gefüllt mit CaCO_3 . Zunächst fällt auf, dass die axialen Verschleißprofile aufgrund der ungleichen Strömungsverhältnisse ungleichmäßig sind (Abbildung 9). PVC-U hat geringfügig besser abgeschnitten als das mit CaCO_3 gefüllte PP; dies wird auf die schlechte Anbindung des CaCO_3 an die Matrix zurückgeführt. Bei 400 000 Zyklen wurden durchschnittliche Abriebstiefen zwischen **0,28 und 0,54 mm** ermittelt.

³¹ Aus Vorlesungsskript MVT, Prof. Thomas, Magdeburg
<https://docplayer.org/71954522-Folie-2-1-prof-dr-j-tomas-lehrstuhl-fuer-mechanische-verfahrenstechnik.html>

³² Stabik, Makselon und Tomanek (2007).

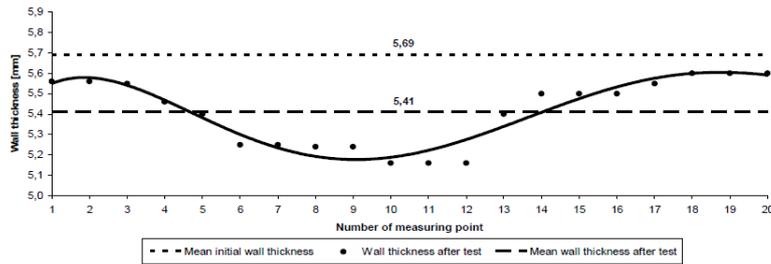


Abbildung 9: Axiales Verschleißprofil in der Darmstädter Rinne (Material PVC U) ³³

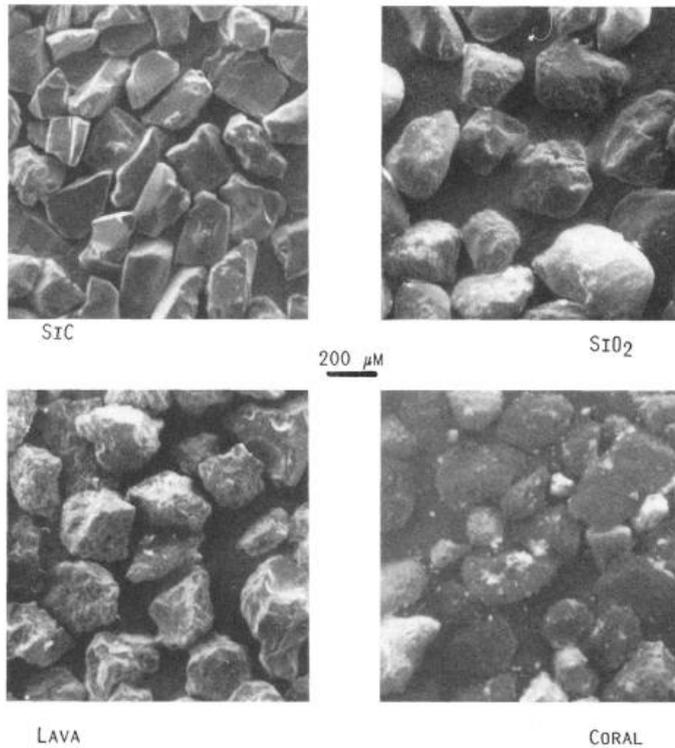


Abbildung 10: Verschleißkörper in den Versuchen nach Larsen-Bassen³⁴

Yabuki et al.³⁵ untersuchen die Eigenschaften von PE-Abwasserleitungen. Sie leiten das folgende qualitative Modell ab: Bei senkrechtem Auftreffen (90°) ist der Verschleiß gering; allerdings bei leichten Abweichungen aus der Senkrechten (70°-80°) ergibt sich bei niedrigen Geschwindigkeiten (<= 2m/s) bereits der maximale Verschleiß. Bei diesen niedrigen Geschwindigkeiten weist PE sehr gute Verschleißigenschaften auf, die sich gut mit Materialkennwerten korrelieren ließen (fracture energy and Young modulus).

Bellow et al.³⁶ und Budinski et al.³⁷ untersuchen den trockenen Polymerverschleiß in einer Pin-on-Disk-Konfiguration. Er konnte keine Gesetzmäßigkeit zwischen Verschleiß und Materialkennwerten (Reibkoeffizient, Härte, Festigkeit) abgeleitet werden.

³³ Stabik, Makselon und Tomanek (2007).

³⁴ Larsen-Bassen und Tadjavar (1988).

³⁵ Yabuki et al. (2000).

³⁶ Bellow und Viswanath (1993).

³⁷ Budinski (1997).

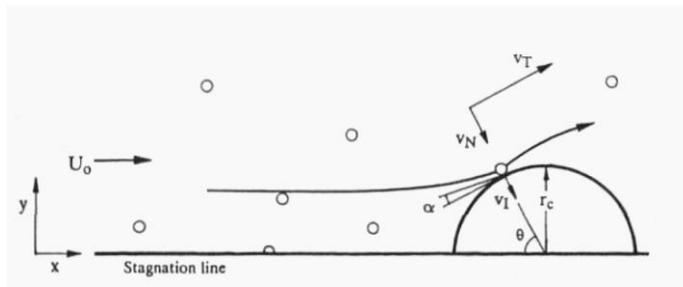


Abbildung 11: Strömungsverhältnisse am Zylinder beim Versuch nach Clark et al.³⁸

Einer der ersten Übersichtsartikel zur Polymerabrasion stammt von Lancaster³⁹. Er geht nicht auf Hydroabrasion ein, betont aber, dass das Materialverhalten plastisch, elastisch bzw. starr ausschlaggebend ist.

Larsen-Bassen et al.⁴⁰ untersuchen den Einfluss verschiedener Abrasivkörper in einer Suspension hinsichtlich des Verschleißverhaltens (Abbildung 10). Die Abtragsrate kann um den **Faktor 1000** variieren; das Ranking der Polymere in Bezug auf ihre Verschleißneigung bleibt aber erhalten.

Schulte⁴¹ betrachtet das Verhalten von Kunststoffrohren im Abwasser in der Praxis. Hochrechnungen aus Messungen an eingebauten Rohren lassen einem maximalen Abtrag von **0,5mm in 100 Jahren** bei PVC-U-Rohren erwarten. Allerdings ist die Beanspruchungsintensität in den untersuchten Rohren unbekannt gewesen.

Clark et al.⁴² bewegen zylindrische Proben durch eine abrasive Suspension. Hierbei ergeben sich über den Umfang automatisch verschiedene Angriffswinkel der Strömung zwischen dem Staupunkt (0°) und der Stelle des Durchmessers (90°) (Abbildung 12). Die größte Abrasion erfolgt im Bereich von 20–30°.

³⁸ Clark und Wong (1995)

³⁹ Lancaster (1969).

⁴⁰ Larsen-Bassen und Tadjavar (1988).

⁴¹ Schulte (2002).

⁴² Clark und Wong (1995).

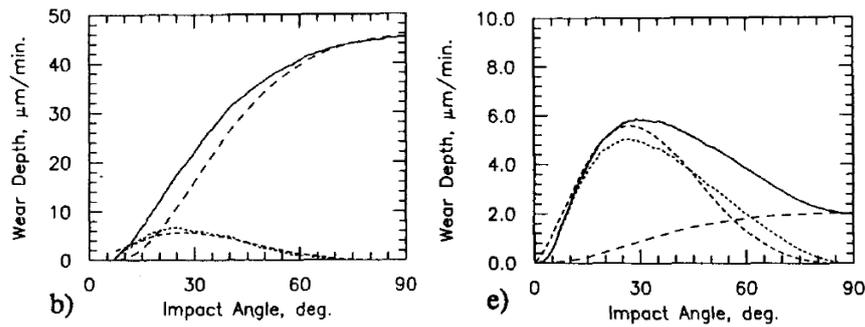


Abbildung 12: Winkelabhängiger Abtrag für (b) spröde Materialien (Al_2O_3) und duktile Materialien (Kupfer)⁴³

Shook et al. ⁴⁴untersuchen den Abrieb in Pipelines, d. h. Rohren, die vollständig gefüllt sind und keinen freien Wasserspiegel aufweisen. Der Abrieb erfolgt dennoch ausschließlich in der „unteren Halbschale“ zwischen 90 und 270°.

Azimian und Lichti entwickeln numerischen Modelle (gekoppelte CFD- und DEM-Simulationen) und Strömungsmessmethoden, um Hydroabrasion zu beschreiben^{45,46,47}.

Monographien

- M. Farshad: Plastic pipe systems: Failure Investigation an diagnostics, Elsevier 2007
(Diese Monographie wurde nicht in die Erstellung dieses Berichts mit einbezogen.)
- IBK Bericht 1999: Das *Institut Bauen mit Kunststoffen* (sic!) erstellt eine Bewertung des Langzeitverhaltens von Kunststoffrohren. Hierzu werden teilweise Rohre herangezogen, die bereits in den 1930er Jahren eingebaut wurden.
(Kopie vorhanden).

⁴³ Clark und Wong (1995).

⁴⁴ Shook, McKibben und Small (1990).

⁴⁵ Azimian und Bart (2015).

⁴⁶ Azimian, Lichti und Bart H. J. (2014).

⁴⁷ Lichti, Azimian und Bart (2013).

4 Untersuchungsverfahren zum Abriebverhalten von Werkstoffen in wässrigen Medien

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Verfahren aufgeführt, die ein Abriebverhalten abbilden. Die Übertragbarkeit des Tests auf tatsächliche Lastfälle in der Kanalisation wird diskutiert. Die Zusammenstellung ist eine Erweiterung der bei Vogel gegebenen⁴⁸. Die meisten der angegebenen Untersuchungsmethoden beziehen sich aber auf Verschleißuntersuchungen an Betonbauteilen.

4.1.1 Verschleißtopf-Verfahren

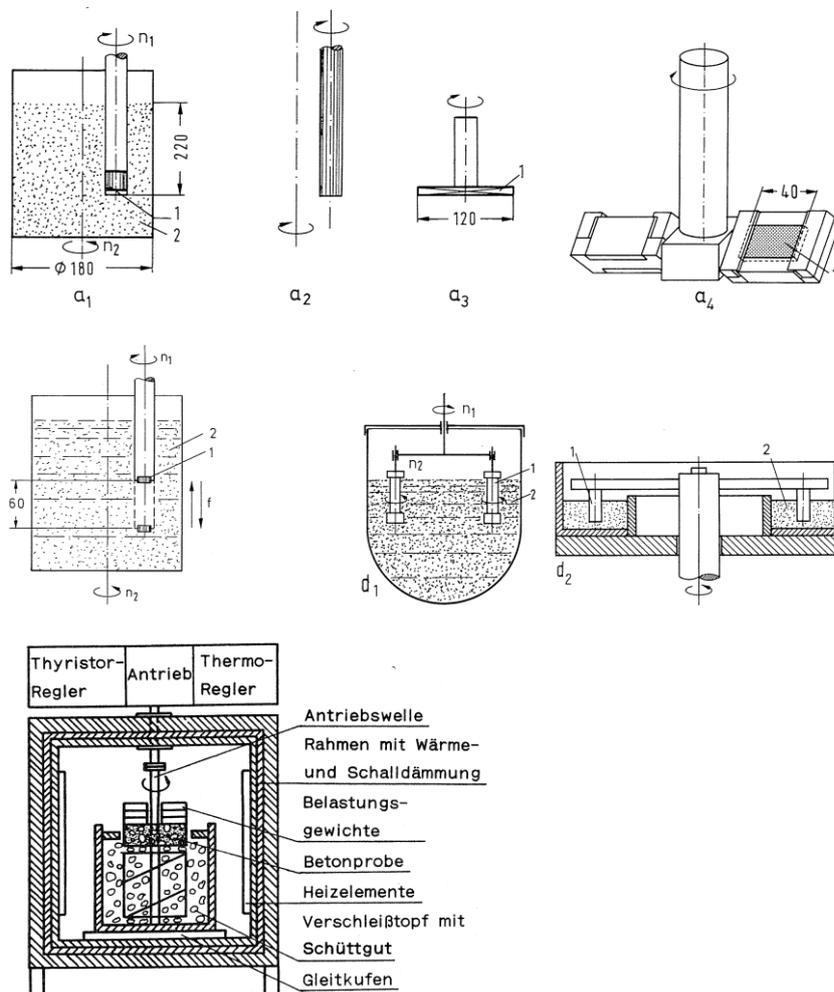


Abbildung 13: Verschleißtopfverfahren nach Uetz (1986) (oben, Mitte) und Kunterding (1991) (unten)

In einer Ausführung⁴⁹ wird der zylindrische oder balkenförmige Probekörper an einer Rührwelle befestigt und in einer Abrasivstoff-Wasser-Mischung zum Rotieren gebracht. In einer anderen Ausführung⁵⁰ wird ein (trockenes) Schüttgut durch einen Wendelrührer auf die Probe zu- und dann unter Druck daran langbewegt (Abbildung 13).

⁴⁸ Vogel (2011).

⁴⁹ Uetz (1986).

⁵⁰ Kunterding (1991).

Bewertung:

Beim Rotieren einer balkenförmigen Probe in einer abrasiven Suspension wird sehr viel Abrieb an den Kanten erzeugt. Die genaue Beanspruchung ist unklar und hat wenig Ähnlichkeit mit der Belastungssituation in einem durchströmten Rohr, so dass zwar vergleichende Werte erhalten werden, aber ein Up-Scaling schwierig erscheint. Deshalb ist Übertragbarkeit nur begrenzt möglich. Das zweite Verfahren erfolgt trocken und unter Druck; auch hier ist eine Übertragbarkeit schwierig.

4.1.2 ASTM C1138

Bei dem von Liu⁵¹ entwickelten Verfahren werden Stahlkugeln in einem zylindrischen Gefäß in Wasser aufgerührt. Die Materialprobe liegt am Boden des Gefäßes. Das Verfahren ist nach ASTM genormt⁵².

Bewertung

Die Stahlkugeln sind glatt und relativ groß, sodass eher Oberflächenzerrüttung als Mikrospanen untersucht wird, d. h. tendenziell würden Kunststoffe hier vermutlich besser bewertet werden als Beton.

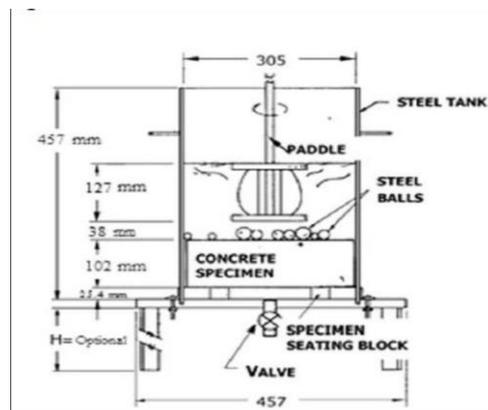


Abbildung 14: Verfahren nach ASTM C1138

4.1.3 ASTM C 418⁵³

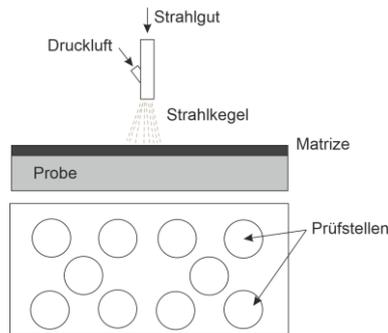
Bei diesem Verfahren werden 600g Silika-Sand innerhalb von einer Minute mit festgelegtem Druck auf die Oberfläche gestrahlt. Der Volumenabtrag wird an sechs Stellen gemessen. Üblicherweise wird ein senkrechter Aufprall gewählt, aber flachere Anstellwinkel sind möglich, um nicht nur Prall sondern auch Gleitverschleiß zu messen.

⁵¹ Liu (1981).

⁵² ASTM C1138.

⁵³ ASTM C418 1998.

Abbildung 15: Verfahren
 nach ASTM C418



Bewertung

Die Versuchsdauer ist sehr kurz und die Partikel sind sehr hoch beschleunigt, sodass sie eine sehr hohe Aufprallenergie aufweisen. Deshalb ist die Übertragung auf einen Abwasserkanal fraglich, obwohl Alexander⁵⁴ das Verfahren generell für Hydroabrasivverschleiß vorgeschlagen hat.

4.1.4 ASTM 779/C⁵⁵

Die flachen Probekörper sind horizontal ausgerichtet. Darauf wird ein senkrecht angebrachtes Rührwerk angebracht, an dessen Ende unterschiedliche Belastungskörper befestigt sind: rotierende Zylinder, rotierende Stachelwalzen oder Kugeln. Der Probekörper kann nass oder trocken sein, aber im Probenraum befindet sich keine Flüssigkeit. Die übliche Versuchsdauer beträgt 30 oder 60 Minuten.

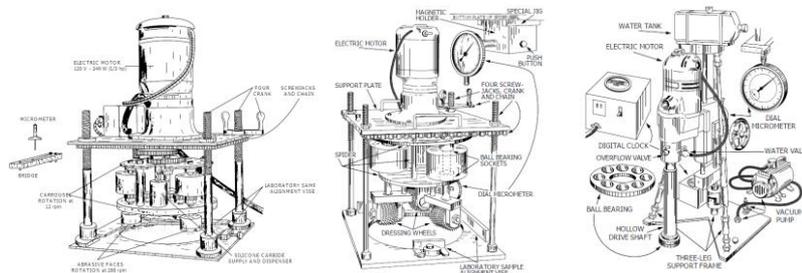


Abbildung 16: Verfahren
 nach ASTM 779/C

Bewertung

Die Übertragung auf das Abrasionsverhalten ist nur bedingt gegeben: Bei Methode A und B sind die Belastungskörper geführt, die Kugeln in Methode C sind relativ groß und nicht scharfkantig, d. h. es wird überwiegend der Verschleißmechanismus *Oberflächenzerrüttung* und nicht *Mikrospanen* abgebildet.

4.1.5 Dresdner Verschleißtrommel

Auf die Innenseite der rotierenden Trommel werden die ebenen Verschleißproben angebracht. Standardmäßig werden trockene Stahlkugeln

⁵⁴ Alexander (1984).

⁵⁵ ASTM C779C (2000). (Bilder von <https://www.astm.org/Standards/C779>)

als Belastungsmaterial verwendet. Es ist sicherlich denkbar, diese Konfiguration auch mit einer abrasiven Suspension zu betreiben⁵⁶.

Bewertung

Wenn die Trommel mit einer Abrasionsflüssigkeit gefüllt ist, kommt dies dem Realfall relativ nahe. Der Trommeldurchmesser sollte möglichst groß gewählt werden, damit die Steigung dort nicht zu hoch wird und es zu lawinenartigen Abgängen kommt, die einen anderen Verschleißmechanismus als eine Rohrströmung hervorrufen können.

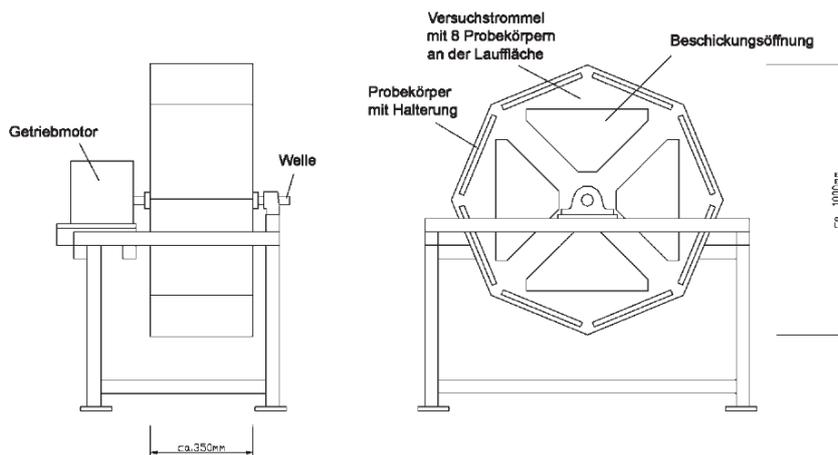


Abbildung 17: Prinzip der Dresdner Verschleißtrommel

4.1.6 Verfahren nach Bania

Bania entwickelt einen Apparat, bei dem kleine (würfelförmige) Proben an einem Rührwerk befestigt und durch eine wässrige, abrasive Suspension bewegt werden⁵⁷.

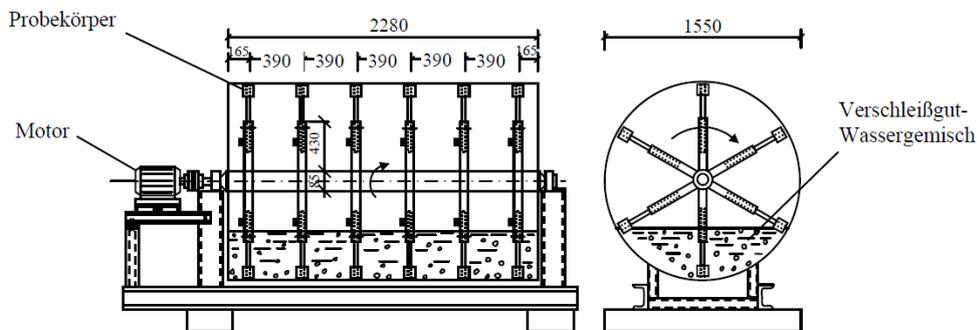


Abbildung 18: Verfahren nach Bania (Abb. entnommen Vogel (2009)).

Bewertung

Das Verschleißgut-Wassergemisch kann auf das Abwasserproblem eingestellt werden (Rotationsgeschwindigkeit, Abrasivkörper)

Bei den kleinen Probekörpern wird viel Kantenverschleiß auftreten und die Aussagekraft für die Übertragung auf Rohre ist begrenzt.

⁵⁶ Helbig et al. (2005).

⁵⁷ Bania (1989).

4.1.7 Verschleißtrommel nach Vogel

Vogel entwickelte die Trommel nach Bania weiter⁵⁸. Der Grundgedanke ist gleich; es wurden nur konstruktive Dinge geändert, um einen besseren Versuchsablauf zu gewährleisten.

Bewertung:

Diese ist mit der Bewertung des Verfahrens nach Bania identisch.

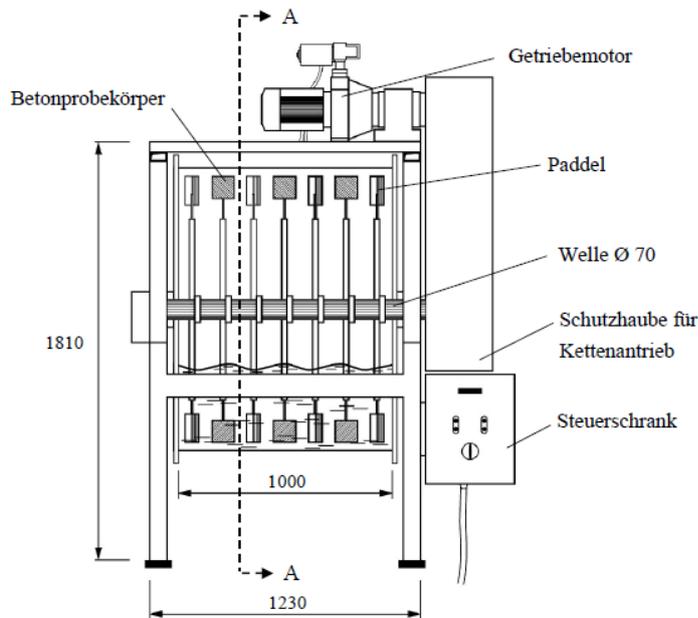


Abbildung 19: Verschleißtrommel nach Vogel

4.1.8 Kreisförmiges Gerinne

Pat und Reinhard haben ein kreisförmiges Gerinne vorgeschlagen⁵⁹. In der Rinne wird durch ein Rührwerk eine Ringströmung erzeugt.

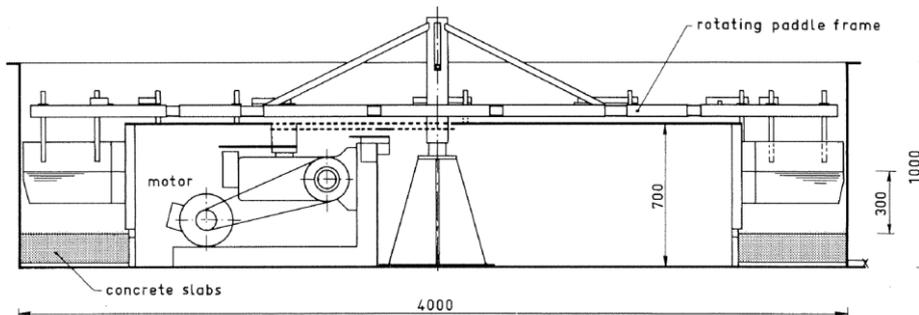


Abbildung 20: Kreisförmiges Gerinne (Pat und Reinhardt)

Bewertung

Das Fließverhalten in dem Gerinne kommt dem Realfall sehr nahe. Einzig Klemmkorn und Turbulenzen an den Paddeln können für Abweichungen sorgen. Dies könnte man ggf. durch Neigung und Antrieb des Gerinnes

⁵⁸ Vogel (2011).

⁵⁹ Pat und Reinhardt (1979).

eliminieren. Eventuell ließe sich eine Strömung auch durch eine Taumelbewegung realisieren.

4.1.9 Darmstädter Kipprinne

Das Verfahren hat Eingang in verschiedene Normen zur Bewertung der Verschleißbeständigkeit von Kanalbauwerkstoffen gehalten. In DIN EN 295-3 wird die Verschleißbeständigkeit von Steinzeugrohren bewertet und in DIN 19565-1 die von glasfaserverstärktem Polyesterharz. Für Kunststoffrohre (PE, PP) wird ebenfalls DIN EN 295-3 verwendet.

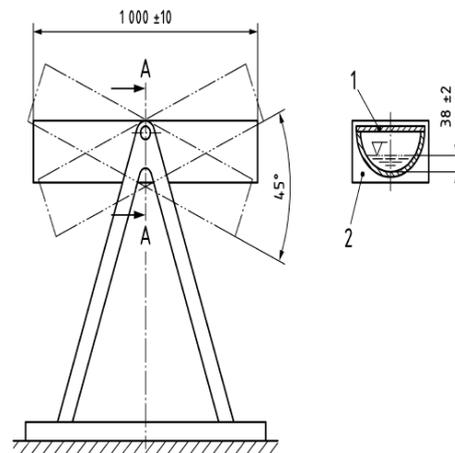


Abbildung 21: Darmstädter Kipprinne (aus DINEN295-3)

Bewertung:

Vorteilhaft ist, dass Tests an original (halbierten) Originalrohren durchgeführt werden können, und Probekörper nicht erforderlich sind. Das Strömungsverhalten ist relativ nah am realen Verhalten, abgesehen davon, dass die Rinne bis zu 22,5° geneigt wird und die Strömung nicht über die volle Versuchslänge konstant ist (Abbildung 9). Das Abrasivgut prallt auf die Stirnplatten und wird dort ggf. zusätzlich geschädigt.

Die Füllung mit den Abrasivstoffen ist in der Norm festgelegt. Durch ein anderes, abrasiveres Material (z. B. Split als Streumittel) würde der Abtrag insgesamt gesteigert. Darüber hinaus würde sich ggf. das Verhältnis der Abtragsraten unterschiedlicher Wandmaterialien zueinander verschieben; da scharfkantiges Abrasivgut Mikrozerspanen begünstigt, aber die Änderung sich nicht so stark auf die Oberflächenzerrüttung auswirkt.

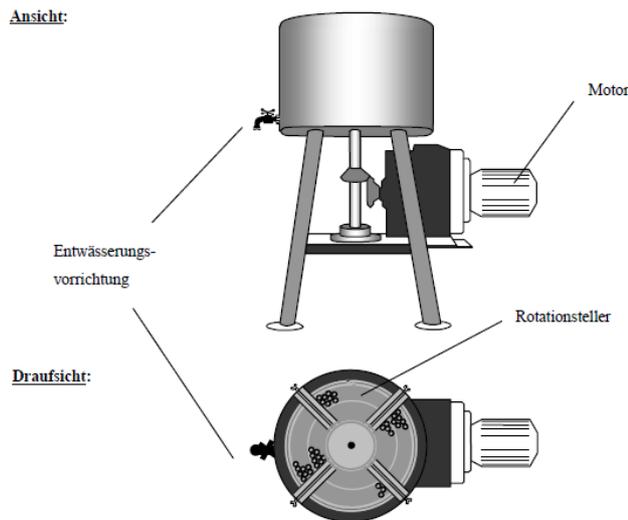
In der Normung findet sich kein Hinweis, wie die ermittelten Werte in tatsächliche Abriebswerte mit der Lebensdauer umgerechnet werden. Die Werte dienen lediglich als relativer Vergleich.

4.1.10 Verschleißtrommel nach Röhnisch und Vollmer

Das von Röhnisch⁶⁰ vorgestellte Gerät gleicht in seiner Beanspruchung der zirkulären Rinne.

⁶⁰ Röhnisch A. und Vollmer (1970). (entnommen Vogel 2009)

Abbildung 22: Verschleiß-
trommel nach Röhnisch



Bewertung

Die Beanspruchungsart kommt den realen Verhältnissen im Abwasserkanal nahe. Einzig unter den Strömungsbrechern könnte es zu Klemmungen mit sehr hohen Belastungen kommen. Alternativ könnte eventuell der Rotationssteller geneigt werden, sodass die Suspension durch die Schwerkraft zurückschwappt.

Ein Test mit originalen Rohrsegmenten ist nicht möglich.

4.1.11 ASTM Slurry-Test⁶¹

Flache Materialproben liegen auf dem Boden einer mit einer Abrasionsflüssigkeit gefüllten Wanne. Darüber werden Stahlplatten durch einen Exzenterantrieb linear bewegt. Die Suspension wird durch die Bewegung unter die Gegenplatten gespült und verursacht dort den Verschleiß.

Für den Vergleich der Messungen sind zwei Versuchsarten und zwei Kennzahlen definiert:

- Miller Number: Hier wird die Abrasivität der Slurry gegen ein Referenzmaterial bewertet.
- SAR Number (Slurry Abrasion Respons) Hier wird die Abrasion des Materials gegenüber einer Slurry bewertet.

Bewertung

Die Partikel bewegen sich nicht frei, sondern eine Suspension befindet sich in einem Spalt zwischen Werkstoff und einem Stahlkörper. Die erhaltenen Kennzahlen sind für einen relativen Vergleich geeignet; eine Extrapolation auf die Lebensdauer erscheint schwierig.

⁶¹ ASTM G75 15

5 Abschätzungen der Mikroplastik-Emission an Kunststoffrohren

Betrachtet werden die Emission durch den Verschleiß während des Betriebs und die Schnittverluste während des Verlegens.

5.1 Emissionen während des Betriebs

Die Verschleißbeständigkeit von Baustoffen für Abwasserrohre wurde bislang vor allem durch Versuche mit der „Darmstädter Kipprinne“ nach DIN EN 295-3 und DIN 19565-1 ermittelt. Die Ergebnisse werden als Abriebs-tiefe in Millimetern angegeben (Abbildung 23). Die Werte, die von FBS⁶² und KRV⁶³ angegeben werden, liegen in derselben Größenordnung – es gibt aber gewisse Abweichungen. Ungeklärt bleibt, wie die Werte aus Laborversuchen in bestimmte Abriebswerte über die Lebensdauer umgerechnet werden können.

Für diese Abschätzung wird als Annahme festgelegt, dass die Abriebswerte bei 400 000 Zyklen einer Lebensdauer von **50 bis 100 Jahren** entsprechen. Für die Thermoplaste (PEHD, PVC-U, PP) ergibt sich ein Abrieb von **0,2 bis 0,4 mm**; für GFK ein Abrieb von **0,8 bis 1,1 mm** (Abbildung 23). Schulte hat in Betrieb befindliche PVC-U Rohre ausgewertet und gibt einen maximalen Abtrag von 0,5 mm in 100 Jahren an, wobei die Beanspruchung der Rohre unbekannt ist⁶⁴.

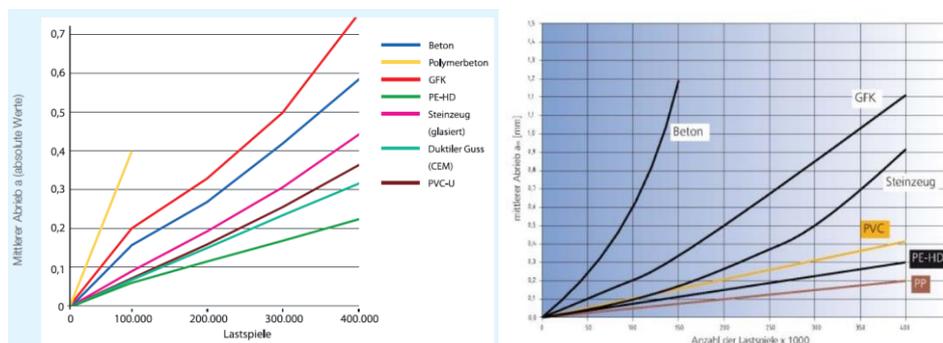


Abbildung 23: Abrieb in Darmstädter Rinne, Quelle FBS (links), KRV (rechts)

5.1.1 Erste überschlägige Berechnung der Emissionsmengen im öffentlichen Kanalnetz

Das Kanalnetz in Deutschland gliedert sich in einen öffentlichen Teil, der umfassend dokumentiert ist und in einen privaten Bereich, über den viel weniger Angaben bestehen. Die folgenden Daten stammen aus DWA2020⁶⁵: Die Länge des Kanalnetzes beträgt ca. 594 000 km (für die Berechnung des Abriebs wird im weiteren Verlauf der Untersuchung eine Länge von **564.000 bis 624.000 km** angenommen). Der Anteil an Kunststoffrohren beträgt 17,7 % (es wurde eine Spannweite von **14 – 22 %**

⁶² FBS: Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre (www.fbsrohre.de).

⁶³ KRV: Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie (www.krv.de).

⁶⁴ Schulte (2002).

⁶⁵ Berger et al. (2020).

angenommen). Eine tendenzielle Zunahme über die vergangenen Jahre ist dabei erkennbar.

In Deutschland werden Abwassersysteme sowohl als Mischsystem (bei dem Regen- und Schmutzwasser gemeinsam geführt werden) als auch als Trennsystem ausgeführt (bei dem Regen- und Schmutzwasser getrennt geführt werden). Die Längen betragen: 133 000 km Regenwasserkanäle, 247 000 km Mischwasserkanäle und 214 000 km Schmutzwasserkanäle. Die erosive Belastung in diesen Kanälen ist unterschiedlich (s. u.), was zu unterschiedlichen Erosionsraten führt.

Für die Berechnung des Abriebs ist die Benetzungsfläche der Rohrwand maßgebend. Der Verschleiß tritt dabei gravitationsbedingt am stärksten in der Sohle der Rohre auf. Shook⁶⁶ zeigte, dass der Abrieb bei vollgefüllten Rohren ausschließlich in der unteren Halbschale (90° bis 270°) erfolgt. Für die üblicherweise teilgefüllten Rohre im Abwassersystem wird angenommen, dass im Mittel etwa ein **Viertel der Rohrwand** einem gleichmäßigen Verschleiß unterliegt. Demnach wird der Bereich von 135° bis 225° als Verschleißfläche angenommen (Scheitelpunkt der Rohre entspricht 0°).

Zurzeit sind thermoplastische Kunststoffrohre eher bei kleineren Durchmessern anzutreffen. Es konnten allerdings keine für den Bereich der öffentlichen Entwässerungsnetze repräsentativen zweidimensionalen Verteilungen ermittelt werden, die gleichzeitig nach Material und Durchmesser unterscheiden, sondern jeweils nur die getrennten Verteilungen nach Material und Durchmesser recherchiert werden. Hingegen stellten zwei Städte aus NRW netzbezogene Daten zur Verfügung. Dabei weisen fast alle Kunststoffrohre einen Durchmesser kleiner als 500 mm auf. Der Mittelwert des Durchmessers aus diesen Verteilungen wird für die Berechnungen zugrunde gelegt. Der gewichtete Mittelwert der Verteilung beträgt **390 mm** und hiermit wird die Verschleißbreite berechnet.

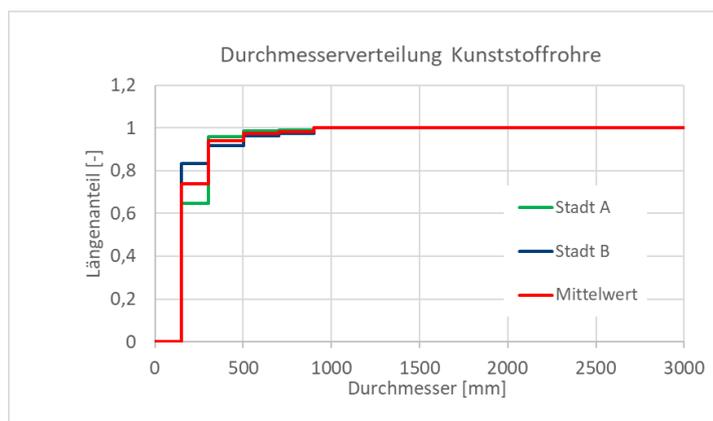


Abbildung 24: Durchmesserverteilung Kunststoffrohre

Als Dichte des Wandmaterials wird **1000 kg/m³** angenommen, dies entspricht in etwa PE und PP; PVC hat mit 1300 kg/m³ eine etwas höhere Dichte.

⁶⁶ Shook (1990).

Mit diesen Werten wird der zu erwartende Abrieb an Kunststoffrohren auf Basis numerischer Berechnungen (Monte-Carlo-Simulationen) abgeschätzt (Abbildung 25). Der Abrieb berechnet sich nach:

$$\begin{aligned} \text{Abrieb/Jahr [t/a]} = & \\ & \text{Kanalnetzlänge} \\ & \times \text{Anteil Kunststoffrohre} \\ & \times \text{Verschleißbreite (= } \pi/4 \times \text{Durchmesser)} \\ & \times \text{Verschleißtiefe (400 000 Zyklen)} \\ & / \text{Lebensdauer} \end{aligned}$$

1000 zufällige Konfigurationen werden berechnet, wobei die Parameter jeweils gleichverteilt aus den oben im Text angegebenen Intervallen um die Mittelwerte der verschiedenen Parameter angenommen werden, um etwaige Unsicherheiten mit abzubilden. Die Abbildungen zeigen sodann die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ergebnisse.

Aus Abbildung 25 ergibt sich, dass bei den getroffenen Annahmen der wahrscheinlichste **Abrieb ca. 120 t/a** und der maximal zu erwartende Abrieb **ca. 300 t/a** beträgt. Die blaue Kurve ist eine logarithmische Normalverteilung, die an die berechneten Ergebnisse angepasst wurde. Sie gibt die Ergebnisse gut wieder.

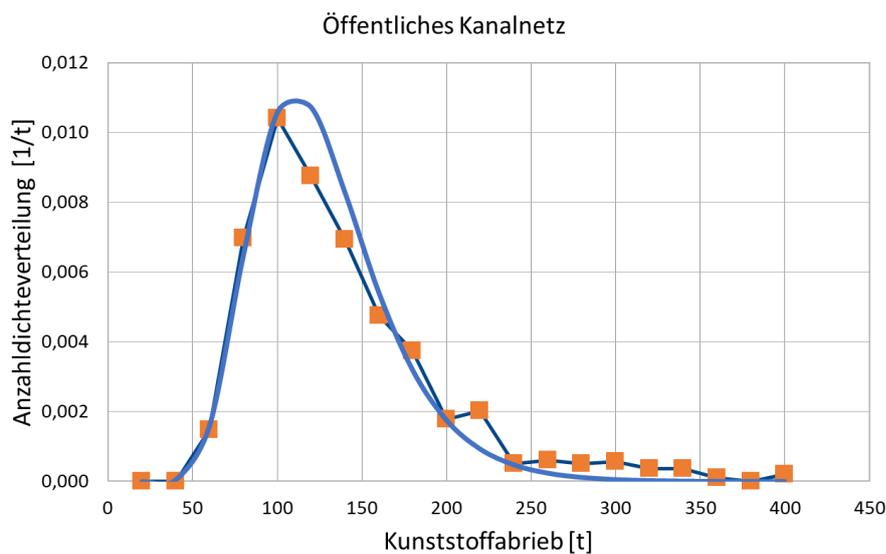


Abbildung 25: Abgeschätzter Abrieb an thermoplastischen Abwasserrohren im öffentlichen Netz (ohne GFK)

5.1.2 Berücksichtigung unterschiedlicher Kanalsysteme und der Reinigungsleistung von Kläranlagen im öffentlichen Kanalnetz

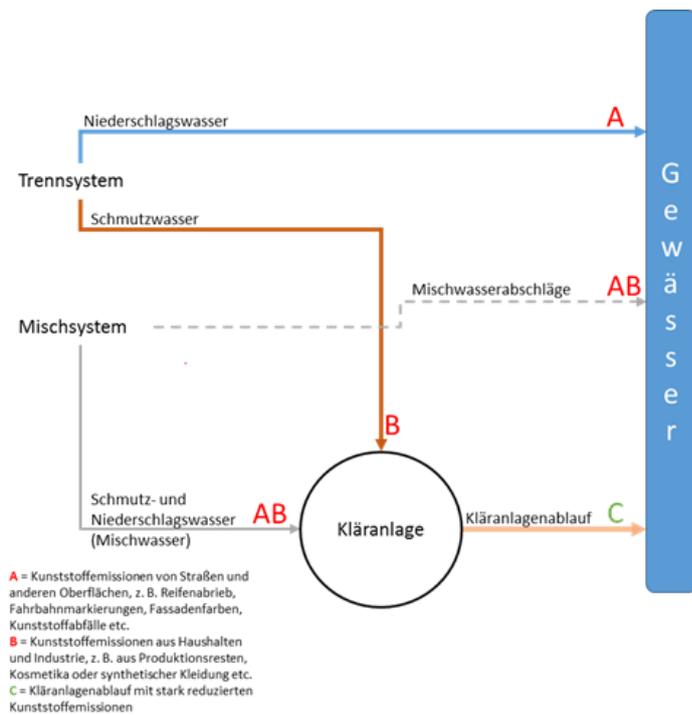
Durch die Ausführung als Misch- bzw. als Trennsystem ergeben sich 3 unterschiedliche Kanalarten

- Regenwasserkanäle
- Mischwasserkanäle
- Schmutzwasserkanäle

In diesen Kategorien ergeben sich zum einen unterschiedliche Belastungen in den Kanalrohren: Die partikulären, schleißen Bestandteile stammen überwiegend aus dem Niederschlagswasser und finden sich deshalb in Regen- und Mischkanälen. Zum anderen werden reine Regenwasserkanäle meist ungeklärt oder nur durch einfache Absetzbecken in die Vorfluter eingeleitet (Abbildung 26).

Höhere Fracht schleißender Materialien { 133 000 km Regenwasserkanäle
 247 000 km Mischwasserkanäle } Angeschlossen an
 214 000 km Schmutzwasserkanäle } Abwasserbehandlungsanlagen

Abbildung 26: Aufteilung der Kanalrohlänge nach Kanalsystemen (Fraunhofer UMSICHT)



Durch beide Effekte ergibt sich eine Minderung der zuvor berechneten Mengen an Kunststoffabrieb, die schließlich in die Umwelt abgegeben werden.

Wichtig ist hierbei auch die Beachtung der Bilanzgrenze: Bei einer Ökobilanz (LCA, Life Cycle Analysis) werden die Emissionen erst beim Übergang von der Technosphäre in die Ecosphäre betrachtet. Für das Abwassersystem bedeutet dies, dass erst die Emissionen bei der Einleitung in die Vorfluter gezählt werden, bzw. die Emissionen durch die stoffliche Verwertung von Klärschlamm.

Bertling et al.⁶⁷ haben in ihrer Studie, die vor allem die Quellen identifizieren und beschreiben soll, einen anderen Standpunkt eingenommen: Jede Emission, die nicht unmittelbar durch den Verursacher beseitigt wird, wird gewertet, um unzulässige »Verschiebungen« der Verantwortung zu verhindern.

Dies zeigt sich beispielsweise bei Reifenabrieb: Hier müsste genau unterschieden werden, ob und an welche Art von Abwassersystem ein Straßen-

⁶⁷ Bertling et al. (2018).

abschnitt angeschlossen ist und wie viel Reifenabrieb im Straßennebenraum in der Umwelt deponiert wird. Deshalb wird beim Reifenabrieb in der Regel die gesamte Menge betrachtet.

Bei dem Abrieb der Kunststoffrohre ist die die Sachlage anders zu sehen, da es sich hierbei um ein geschlossenes, technisches System (Abwasserbehandlung) handelt und Kläranlagen zu diesem System gehören. Kläranlagen weisen gute Abscheideraten für Mikroplastik auf, allerdings kann bei Starkregenereignissen häufig nicht die gesamte Abwassermenge geklärt werden, sondern es werden Abschlüge direkt in den Vorfluter abgeleitet. Zudem werden in Deutschland Klärschlämme teilweise (ca. 16 %) ⁶⁸ noch auf Felder aufgebracht und das Mikroplastik somit wieder freigesetzt.

Für die Abschätzung des Einflusses der Art des Kanalsystems und der Reinigungsleistung der Kläranlagen werden folgende Korrekturfaktoren (Wirkungsgrade) abgeschätzt:

- Faktor für Regenwasserkanäle (keine Änderung) 1,0
- Rückhalt von Mikroplastik in Kläranlagen 0,95⁶⁹
- Mischwasserabschlag (Regenüberlauf) 0,1⁷⁰
- Abriebsintensität in Schmutzwasserkanälen unbekannt
- Anteil der Klärschlammasbringung 0,16⁷¹

Wenn man für die Abriebsintensität in Schmutzwasserkanälen zunächst **0,5** ansetzt (Sensitivitätsanalyse s. u.) ergibt sich mit diesen Werten und mittels der Längenverteilung folgender Korrekturfaktor:

$$f_{korr} = \frac{133000}{1 * \frac{594000}{594000}} + 0,5 * \left(\frac{214000}{594000} * ((1 - 0,95) + 0,95 * 0,16) \right) + 1,0 * \left(\frac{247000}{594000} * ((1 - 0,1) * ((1 - 0,95) + 0,95 * 0,16) + 0,1) \right)$$

$$f_{korr} = 1 * \frac{133000}{594000} + 0,101 * \frac{214000}{594000} + 0,282 * \frac{247000}{594000}$$

$$f_{korr} = 0,38$$

⁶⁸ Bertling et al. (2021).

⁶⁹ Bertling et al. (2018).

⁷⁰ Bertling et al. (2018).

⁷¹ Bertling et al. (2018).

Für Regenwasserkanäle ergibt sich keine Änderung; bei Schmutzwasserkanälen gelangen nur ca. 10 % der zuvor berechneten Menge Mikroplastikabriebs in die Umwelt und bei Mischwasserkanälen nur ca. 28 %. Insgesamt erreicht nur rund 38 % der zuvor berechneten Menge die Umwelt.

Abbildung 27 zeigt die Auswirkung der Variation der Abriebsintensität in Schmutzwasserkanälen auf die berechnete Reduktion der Mikroplastikemissionen (Sensitivitätsanalyse): Bei einem Wert von 1 (keine Verminderung) reduziert sich die Emission auf 41%; bei einem Wert von 0 (kein Abrieb) ändert sich der Wert auf 34%. (Bei einem Wert von 0,5 zeigt das Diagramm die zuvor berechnete Korrektur von 38 %). Dies zeigt, dass die Reinigungsleistung der Kläranlagen allein bereits eine Reduktion auf 57 % erreicht (rote Kurve). Bei Annahme einer vollständigen Emissionsfreiheit der Schmutzwasserkanäle wird eine weitere (maximale) Reduktion um 16 Prozentpunkte erreicht.

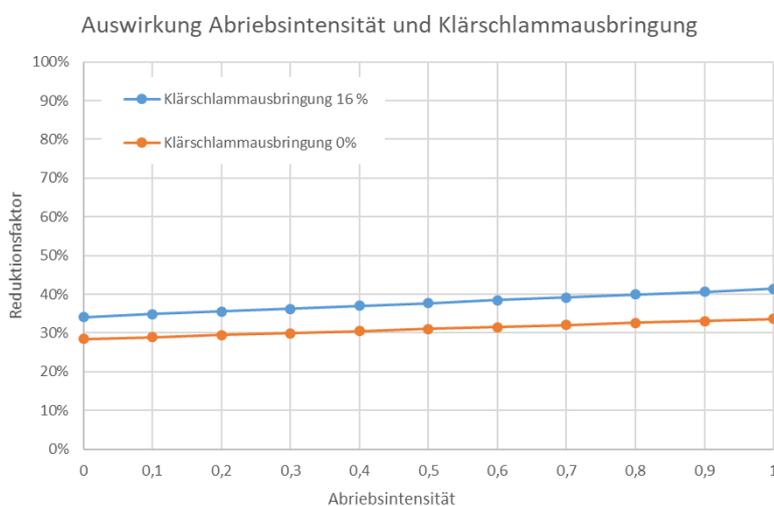


Abbildung 27: Auswirkung der Abriebsintensität in Schmutzwasserkanälen und der Klärschlammausbringung

Darüber hinaus ist die weitere Reduzierung der Klärschlammausbringung in Deutschland bereits gesetzlich verankert. Wenn der Klärschlamm vollständig verbrannt wird (wie z. B. dies bereits in der Schweiz geschieht) sinkt der Korrekturfaktor auf ca. 30 % (relativ unabhängig von der angenommenen Intensität).

Ausgehend von einem gesamten Reduktionsfaktor von 0,38, sinkt die Annahme für die wahrscheinlichste **Emissionsmenge** auf **ca. 46 t/a** und die für den maximalen Abrieb auf **ca. 114 t/a**.

5.1.3 Abschätzung der Emissionsmengen im privaten Kanalnetz

Die Länge des privaten Kanalnetzes ist nur schwer abzuschätzen; angegeben wird eine um den **Faktor von 1,5 bis 2,0** größere Länge gegenüber dem öffentlichen Kanalnetz (s. o.).

Angenommen wird hier, dass es sich vorwiegend um den Anschluss von Wohnbebauung oder Parkplatzentwässerung handelt, d. h. eher kleinere Durchmesser verwendet werden und diese vermehrt in Kunststoff ausgeführt werden. Angenommen wird folglich ein Kunststoffanteil von **70 bis**

100 % bei eine Sohlenbreite zwischen **8 und 24 cm**, d. h. Rohrdurchmesser von 100 mm – 300 mm.

Mit diesen Annahmen ergibt sich ein wahrscheinlichster Abrieb von **ca. 500 t/a** und ein maximaler Abrieb von **1200 t/a für die privaten Entwässerungsnetze** (Abbildung 28). Die blaue Kurve ist eine angepasste logarithmische Normalverteilung.

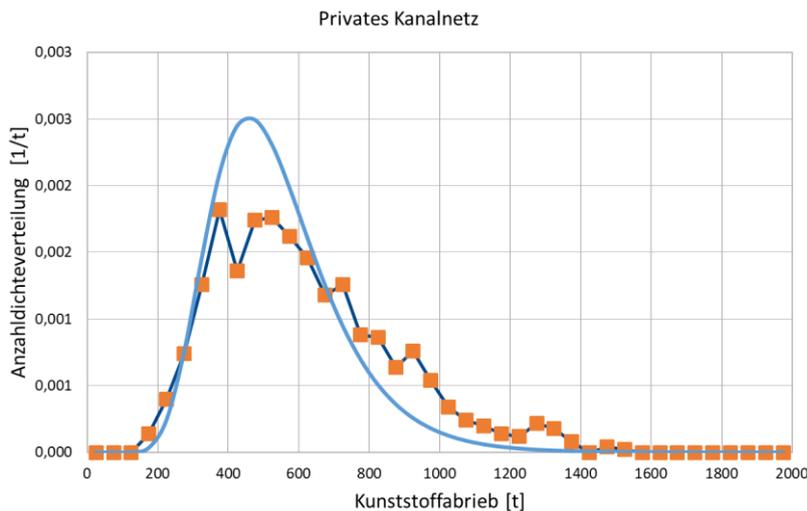


Abbildung 28: Abgeschätzter Abrieb an thermoplastischen Abwasserrohren im privaten Kanalnetz. (ohne GFK)

5.1.4 Berücksichtigung unterschiedlicher Kanalsysteme und der Reinigungsleistung der Kläranlagen im privaten Kanalnetz

Analog der Abschätzung im öffentlichen Kanalnetz muss auch im privaten Kanalnetz nach Misch-/Trennsystem unterschieden und die Reinigungsleistung der Kläranlagen berücksichtigt werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die Längsverteilung im privaten Netz dem des öffentlichen Netzes entspricht, da die meisten privaten Leitungen in das öffentliche Kanalnetz münden. Unberücksichtigt bleibt hierbei allerdings, dass im privaten Bereich vermehrt Regenwasserversickerungen oder Regenwassernutzungsanlagen auf den Grundstücken angelegt werden.

Unter dieser Voraussetzung gelten dieselben Abschätzungen für die Verminderung, wie oben für das öffentliche Kanalnetz, d. h. eine Reduktion auf 38 %.

Dann ergibt sich ein wahrscheinlichster Abrieb von **ca. 190 t/a** und ein maximaler Abrieb von **456 t/a** für die privaten Abwassernetze.

5.2 Emissionen während der Verlegung

Zusätzlich zu den Emissionen während des Betriebs sind noch die Emissionen beim Einbau der Rohre, als Bestandteil des Lebenszyklus, zu berücksichtigen.

Kunststoffrohre werden während des Einbaus häufig vor Ort abgelängt und neu gefast. In der Regel wird dies ohne besondere Vorkehrungen

durchgeführt und die Späne verbleiben im Rohr oder zum größten Teil im umgebenden Erdreich.

Zusätzlich zu den obigen Annahmen werden die Folgenden getroffen:

Die Verteilung (Abbildung 24) zeigt, dass 73 % Kunststoffrohre im öffentlichen Netz einen Durchmesser bis 300mm und 93 % einen Durchmesser kleiner als 500mm aufweisen. Für die verbleibenden 7 % wird ein Durchmesser von 1000mm angenommen. Hieraus wird ein gewichteter mittlerer Durchmesser von **390 mm** berechnet. Im privaten Bereich wird von einer Durchmesserverteilung von **100 – 200 mm** ausgegangen.

Üblicherweise werden die Kanalsysteme durch Aneinanderfügen von Rohrstücken und Formteilen realisiert. Nur bei Anpassungsarbeiten werden ggf. Rohre vor Ort passend abgelängt. Im öffentlichen Bereich wird von einem Trennschnitt alle **10 – 30 m** und im privaten Bereich alle **5 – 20 m** ausgegangen. Die Wandstärke im öffentlichen Bereich beträgt **3 – 15 mm**, im privaten Bereich **3 – 5 mm**. Die Schnittbreite wird auf **3 mm** vereinheitlicht. (Alle Parameter werden unabhängig voneinander variiert; dies ist sicherlich eine Vereinfachung, da z.B. Durchmesser und Wandstärke voneinander abhängig sind.)

Die Emission durch Trennvorgänge (Ablängen, Anbohren, Schneiden, Schleifen etc.) errechnet sich nach:

$$\begin{aligned} \text{Schnittverluste [t/a]} = & \\ & \text{neu verlegte Rohrlänge/Abstand zwischen Schnitten} \\ & * 3,14 * \text{Durchmesser} \\ & * \text{Wandstärke} \\ & * \text{Schnittbreite} \end{aligned}$$

Im öffentlichen Bereich liegen die wahrscheinlichsten Verluste im Bereich **3 t/a** und die maximalen Verluste bei ca. **10 t/a**. Im privaten Bereich ist der wahrscheinlichste Wert **ca. 6 t/a** und der maximale **25 t/a**.

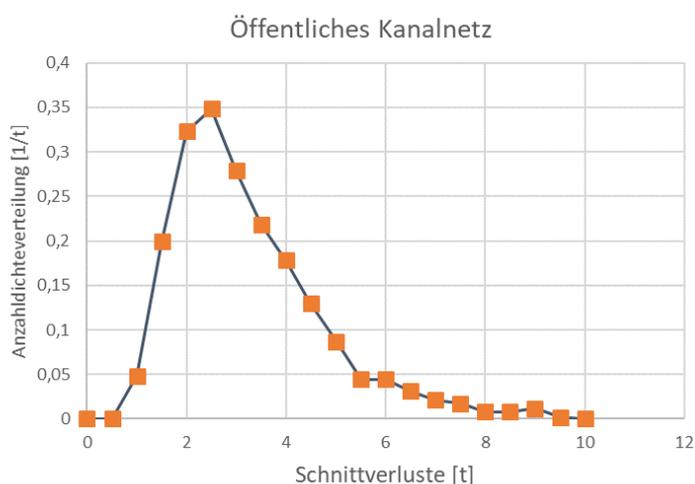
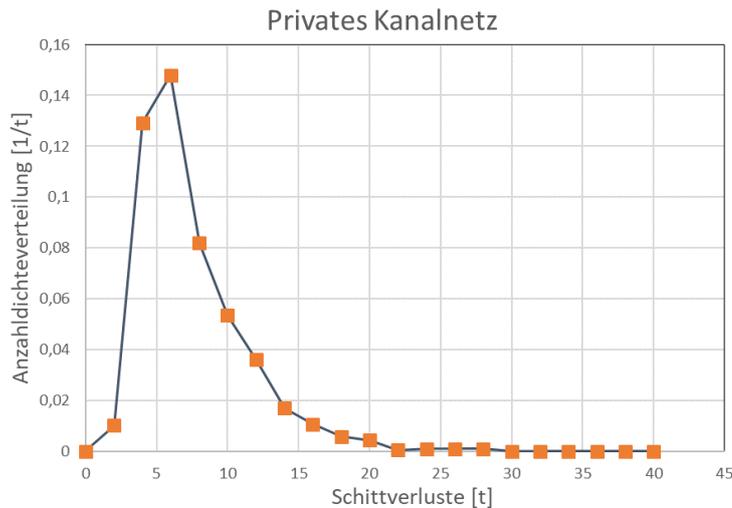


Abbildung 29: Jährliche Schnittverluste bei der Verlegung von Kunststoffrohren im öffentlichen Kanalnetz

Abbildung 30 Jährliche Schnittverluste bei der Verlegung im privaten Kanalnetz



5.3 Bewertung

Die Abschätzungen zeigen, dass zurzeit die Mengen an Kunststoffabrieb im Vergleich zur Gesamtmenge der Mikroplastikemissionen (vergl. Vorbemerkung) eher gering sind.

Die getroffenen Annahmen hinsichtlich der Übertragbarkeit der Laborversuche und der Lebensdauer müssen kritisch validiert werden. Hier können sowohl Abweichungen nach oben als auch nach unten auftreten.

Ungeklärt ist der Verbleib der Rohre am Ende ihrer Lebensdauer: Werden die Rohre ausgebaut und sachgerecht entsorgt oder verbleiben sie in der Erde? Bei in der Erde verbleibenden Rohren müsste geklärt werden, wie dieser Verbleib zu bewerten ist. Handelt es sich um einen Umwelteintrag oder bleibt es Bestandteil der Technosphäre? Im letzteren Fall müssten allerdings die Emissionen über die Nutzungsdauer fortgeschrieben werden und dabei gleichzeitig noch eine langfristige Fragmentierung durch nachfolgende Bauarbeiten und sonstige Erdbewegungen berücksichtigt werden. Ökopool geht zur Zeit von einem Verbleib von 1-10 % der Rohre im Erdreich aus⁷².

Der Anteil an Kunststoffrohren am öffentlichen Kanalnetz ist noch relativ gering – die Abriebsmengen würden proportional mit einem wachsenden Anteil ebenfalls steigen.

In Nordamerika und Skandinavien ist der Kunststoffanteil bereits wesentlich höher. Wenn man von einer Verdreifachung des Kunststoffanteils auf ca. 50 % ausgehen würde, würde sich die Abschätzung der Emission im Betrieb auf den wahrscheinlichsten Wert von **180 t/a** und einen Maximalwert von **450 t/a** für das öffentliche Kanalnetz erhöhen.

Im Vergleich zu Reifen stellen Emissionen aus Kunststoffrohren nur eine geringfügige Quelle dar, im Vergleich zu Kosmetik ist die Quelle allerdings von gleicher Größenordnung. Darüber hinaus gelten die emittierten Polymere PE und PVC als besonders schwer abbaubar.

⁷² Jespen et al. (2020).

6 Literatur

- ALEXANDER, M.G., 1984. Towards standard tests for abrasion for abrasion resistance of concrete - Report on a limited number of tests studied, with a critical evaluation. *Materiaux et Constructions*, **18**(106). Materiaux et Constructions.
- ARTHUR, C., J. BAKER und H. BAMFORD, 2008. *Proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects, an fate of microplastic marine debris*.
- ASTM - C 1138-89, *Standard Test method für Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)*.
- ASTM 799/C 779M-00:2000, *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*.
- ASTM C 418-98:1998, *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting*.
- ASTM G75 15, *Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)*.
- AZIMIAN, M. und H.J. BART, 2015. LDA Study of Particulate Flow in a channel with deformed Surface Locations and with Flow Conditioner. *Open J. Fluid Dyn.*, **5**, 353-363. *Open J. Fluid Dyn.*
- AZIMIAN, M., M. LICHTI und BART H. J., 2014. Investigation of Particulate Flow in a Channel by Application of CFD, DEM and LDA PDA. *The Open Chem. Eng. J.*, **8**, 1-11. *The Open Chem. Eng. J.*
- BANIA, A., 1989. *Bestimmung des Abriebs und der Erosion von Betonen mittels eines Gesteinsstoff-Wassergemisches*. Dissertation.
- BELLOW, D.G. und N.S. VISWANATH, 1993. An Analysis of the wear of polymers. *Wear*, **162-164**, 1048-1053. *Wear*.
- BERGER, C., FALK C., HETZEL F., J. PNNEKAMP, S. RODER und J. RUPPELT, 2016. Zustand der Kanalisation in Deutschland. Ergebnisse der DWA Umfrage 2015. Sonderdruck. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, **63**(6), 2-12. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*.
- BERTLING, J., L. HAMANN und M. HIEBEL, 2018. *Mikroplastik und synthetische Polymere in Kosmetikprodukten sowie Wasch-, Putz- und Reinigungsmitteln* [online]. Fraunhofer UMSICHT. Oberhausen [Zugriff am: 30. August 2019]. Verfügbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/umsicht-studie-mikroplastik-in-kosmetik.pdf>
- BERTLING, J., T. ZIMMERMANN und L. RÖDIG, 2021. Kunststoffe in der Umwelt: Emissionen in landwirtschaftlich genutzten Böden. [online] Fraunhofer UMSICHT. Oberhausen <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-633611.html>
- BERTLING, J., L. HAMANN und R. BERTLING, 2018. *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen*.
- BESSELING, E., J.T.K. QUIK, M. SUN und A.A. KOELMANS, 2016. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study [online].

Environmental pollution (Barking, Essex : 1987). ISSN 1873-6424. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.envpol.2016.10.001

BONTEN, C., 2016. *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen*. 2. Auflage. München: Hanser.

BROWNE, M.A., T. GALLOWAY und R. THOMPSON, 2007. Microplastics - an emerging contaminant of potential concern? *Integr. Environ. Assess. Manage.*, (3), 430-437. *Integr. Environ. Assess. Manage.*

BUDINSKI, K.G., 1997. Resistance of particle abrasion of selected polymers. *Wear*, **203-204**, 302-309. *Wear*.

CLARK, H.M. und K.K. WONG, 1995. Impact angle, particle energy and mass loss in erosion by dilute slurries. *Wear*, **186-187**, 454-464. *Wear*.

COSTA, M.F., IVAR DO SUL, J. A., J.S. SILVA-CAVALCANTI, M.C. ARAUJO, A. SPENGLER und P.S. TPURINHO, 2010. On the importance of size of plastic fragments and pellets on the strandline: a snapshot of Brazilian beach. *Environ Monit Assess*, (168), 299-304. *Environ Monit Assess*.

DESFORGES, J.P., M. GALBRAITH, N. DANGERFIELD und P.S. ROSS, 2014. Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean [online]. *Mar. Pollut. Bull.*, (79), 94-99. *Mar. Pollut. Bull.* [Zugriff am: 23. April 2019]. Verfügbar unter: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24398418>

EMS GRIVORY, 2017. *Das Produktportfolio der LFT-Produkte* [online] [Zugriff am: 24. November 2017]. Verfügbar unter: <http://www.emsgrivory.com/de/produkte-und-maerkte/produkte/grivory-grilamid-und-grilon-lft/tab-elemente/>

EUROPEAN COMMISSION, 2011. *Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial (20011/696/EU)*.

FRANK, A., B. HERR, H. RUSE und G. SCHULZ, 2011. *Kunststoff-Kompendium. Herstellung, Aufbau, Verarbeitung, Anwendung, Umweltverhalten und Eigenschaften der Thermoplaste, Polymerlegierungen, Elastomere und Duroplaste*. 7. Auflage. Würzburg: Vogel.

GEYER, R., J.R. JAMBECK und K.L. LAW, 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made [online]. *Science Advances*, **3**(7), e1700782. ISSN 2375-2548. Verfügbar unter: doi:10.1126/sciadv.1700782

GREGORY, M.R. und A.L. ANRADY, 2003. Plastics in the marine environment. *Plastics and the Environment*. *Plastics and the Environment*.

HARTMANN, N.B., T. HÜFFER, R.C. THOMPSON, M. HASSELLÖV, A. VERSCHOOR, A.E. DAUGAARD, S. RIST, T. KARLSSON, N. BRENNHOLT, M. COLE, M.P. HERRLING, M.C. HESS, N.P. IVLEVA, A.L. LUSHER und M. WAGNER, 2019. Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris [online]. *Environmental science & technology*, **53**(3), 1039-1047. ISSN 1520-5851. Verfügbar unter: doi:10.1021/acs.est.8b05297

HELBIG, U., H.-B. HORLACHER, C. SCHMUTTERER und T. ENGLER, 2005. Möglichkeiten zur Erhöhung der Festigkeit abrasionsbeanspruchter Betonoberflächen bei wasserbaulichen Anlagen. *Bautechnik*, **82**(12), 869-877. *Bautechnik*.

HÖNIG, T., 2013. *Hydroabrasion beim Rühren*. Diplomarbeit. Bernburg.

- HÜFFER, T., A. PRAETORIUS, S. WAGNER, F. von der KAMMER und T. HOFMANN, 2017. Microplastic Exposure Assessment in Aquatic Environments: Learning from Similarities and Differences to Engineered Nanoparticles [online]. *Environmental science & technology*, **51**(5), 2499-2507. ISSN 1520-5851. Verfügbar unter: doi:10.1021/acs.est.6b04054
- JACOBS, F., 2002. *Betonabrasion im Wasserbau*.
- JESPEN, D., T. ZIMMERMANN, L. SPENGLER, L. RÖDIG, R. Bliklen, J. Wagner, K. STRUCK, L. HIESTERMANN und H. SCHULZ, 2020, Kunststoffe in der Umwelt - Erarbeitung einer Systematik für erste Schätzungen zum Verbleib von Abfällen und anderen Produkten aus Kunststoffen in verschiedenen Umweltmedien, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kunststoffe-in-der-umwelt-erarbeitung-einer>
- KOELMANS, A.A., E. BESSELING und W.J. SHIM, 2015. Nanoplastics in the aquatic environment [online]. Critical review. *Marine Anthropogenic Litter*, 325-340. Marine Anthropogenic Litter [Zugriff am: 23. April 2019]. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16510-3_12
- KUNTERDING, R., 1991. *Beanspruchung der Oberfläche von Stahlbetongewölben durch Schüttgüter*. Dissertation: Univ. Karlsruhe (TH).
- LANCASTER, J.K., 1969. Abrasive Wear of Polymers. *Wear*, **14**, 223-239. Wear.
- LARSEN-BASSEN, J. und A. TADJAVAR, 1988. Slurry Abrasion of Polymers under simulated submarine conditions. *Wear*, **122**, 135-149. Wear.
- LICHTI, M., M. AZIMIAN und H.J. BART, 2013. Untersuchung von Hydroabrasion in einer Rohrströmung mit CFD und LDA. *Chem. Ing. Tech.*, **85**, 1428. Chem. Ing. Tech.
- LIU, T.C., 1981. Abrasion Resistance of Concrete. *ACI Journal*, (9/10), 341-350. ACI Journal.
- MOORE, C.J., 2008. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. *Environ. Res.*, (108), 131-139. Environ. Res.
- NOAA, 2017. *What are microplastics?* [online] [Zugriff am: 6. November 2017]. Verfügbar unter: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/microplastics.html>
- PAT, M.G. und H.W. REINHARDT, 1979. Erosion of Concrete. *Heron*, **24**(3). Heron.
- RECHBERGER, M. 2012 *Dissertation Fraunhofer UMSICHT*.
- RÖHNISCH A. und E. VOLLMER, 1970. *Ein Beitrag zur einheitlichen Beurteilung der Abriebsfestigkeit der im Wasser und Rohrleitungsbau verwendeten Baustoffe*. Mitteilungen für die Baupraxis, Schriftenreihe des Ingenieurbüros Röhnisch.
- RYAN, P., C.J. MOORE, J.A. VAN FRANEKER und C.L. MOLONEY, 2009. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Philosophical Transactions of the royal Society*, (364), 1999-2012. Philosophical Transactions of the royal Society.
- SCHERER, C., N. BRENNHOLT, G. REIFFERSCHIED und M. WAGNER, 2017. Feeding type and development drive the ingestion of microplastics by freshwater invertebrates. *Scientific reports*, (7). ISSN 2045-2322.

SCHULTE, H.B. Kanalrohrsystem aus PVC-U für Grundleitungsbereiche und in der kommunalen und industriellen Abwasserentsorgung. In:KRV-Heft Juli 2002

SHOOK, C.A., M. MCKIBBEN und M. SMALL, 1990. Experimental Investigation of Some Hydrodynamic Factors Affecting Slurry Pipeline Wall Erosion. *Cand. J Chem. Eng.*, **68**(1), 17-23. *Cand. J Chem. Eng.*

STABIK, J., M. MAKSELON und H. TOMANEK, 2007. Erosion resistance testing of plastic pipes. *Jamme*, **25**(2), 47-50. *Jamme*.

THALETEC GMBH, 2011. *Modellierung und Minimierung des Hydroabrasionsverschleißes beim Rühren in emallierten Rührbehältern*.

THOMPSON, R.C., Y. OLSEN, R.P. MITCHELL, A. DAVIS, S.J. ROWLAND, A.W.G. JOHN, D. MCGONIGLE und A.E. RUSSELL, 2004. *Lost at Sea: Where Is All the Plastic?*

UETZ, H., 1986. *Abrasion und Erosion - Grundlagen, Betriebliche Erfahrungen, Verminderung*: Carl Hanser Verlag.

VOGEL, M., 2011. *Schädigungsmodell für die Hydroabrasionsbeanspruchung zur probabilistischen Lebensdauerprognose von Betonoberflächen im Wasserbau*. Dissertation. Karlsruhe: KIT.

WAGNER, M., C. SCHERER, D. ALVAREZ-MUNOZ, N. BRENNHOLT, X. BOURRAIN, S. BUCHINGER, E. FRIES, C. GROSBOIS, J. KLASMEIER, T. MARTI, S. RODRIGUEZ-MOZAZ, R. URBATZKA, A.D. VETHAAK, M. WINTHER-NIELSEN und G. REIFFERSCHIED, 2014. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environmental Science Europe*, (26), 12. *Environmental Science Europe*.

YABUKI, A., K. SUGITA, M. MATSUMURA, M. HIRASHIMA und M. TSUNAGA, 2000. The anti slurry erosion properties of polyethylene for sewerage pipe use. *Wear*, **240**, 52-58. *Wear*.