Ökologischer Fußabdruck von Klärschlamm-Karbonisat und von Klärschlamm-Asche im Vergleich

Karin Heinrich (Berlin), Elisabeth Lorenz (Großenhain), Philipp Hagemann (Schwerin), Raymond Kick (Burgstädt) und Steffen Heinrich (Niederfrohna)

Zusammenfassung

Der Vergleich der ökologischen Fußabdrücke von Klärschlamm-Karbonisat mit Klärschlamm-Asche zeigt, dass die Pyrolysetechnologie gegenüber der Monoverbrennung in Größenordnungen überlegen ist. Anstatt bei der Monoverbrennung 243 kg CO_2/t Klärschlamm freizusetzen, findet sich mehr als die Hälfte des im Klärschlamm enthaltenen Kohlenstoffs als black carbon im Karbonisat wieder. In den Boden gebracht wird der pyrogene Kohlenstoff nicht als CO_2 emittiert, sondern bleibt über viele Jahrhunderte dort. Das entspricht einer effektiven CO_2-Bilanz von minus 45 kg CO_2/t Klärschlamm. Zusätzlich wirkt Klärschlamm-Karbonisat als Bodenverbesserungsmittel und grundwasserschonender Phosphatspender. Außerdem ist die Pyrolysetechnologie dezentral anwendbar und an die auf jedem Klärwerk ab einer Reinigungskapazität von 10 000 EW anfallenden Schlammengen individuell anpassbar. Somit wird die Schließung regionaler Stoff- und Energiekreisläufe möglich. Damit alle Vorteile wirken können, ist die Zulassung von Klärschlamm-Karbonisat als Düngemittel unerlässlich.

DOI: 10.3242/kae2020.03.002

Schlagwörter: Klärschlamm, Karbonisierung, Monoverbrennung, Pyrolyse, Kohlendioxid, Bilanz, Umweltbilanz

Abstract

A comparison of the ecological footprint of sewage sludge carbonisation product and sewage sludge ash

Comparing the ecological footprints of sewage sludge carbonisation product and sewage sludge ash shows pyrolysis to be superior to mono-incineration by orders of magnitude. While mono-incineration releases 243 kg CO_2/t of sewage sludge, pyrolysis binds over half of the carbon contained in sludge in the carbonisation product as black carbon. Worked into the ground, pyrolytic carbon stays there for centuries rather than being emitted as CO_2. This translates into an effective carbon footprint impact of –45 kg CO_2/t of sludge. In addition, sewage sludge carbonisation product improves the soil and provides crops with a groundwater-friendly source of phosphate. Pyrolysis is not restricted to large, centralised installations, either. This technology is scalable to the specific sludge volume at any wastewater treatment plant with a treatment capacity of 10,000 population equivalents upwards. This allows regional material and energy cycles to be closed. Sewage sludge carbonisation product must be approved for use as fertiliser in order to derive the maximum benefits.

Key words: sewage sludge, carbonisation, mono-incineration, pyrolysis, carbon dioxide, footprint, environmental footprint

1 Vorbemerkung

Die Folgen des Klimawechsels werden auch in Deutschland von Jahr zu Jahr deutlicher. So verwundert es auch nicht, dass das Thema Klimaschutz zwangsläufig einen starken Bedeutungszuwachs im Bewusstsein der Bevölkerung erfährt. Die politischen Entscheidungsträger bekommen dies recht heftig zu spüren. Nicht nur, dass freitags Schulkinder für den Klimaschutz demonstrieren. Immer mehr hängen auch Wahlergebnisse davon ab, ob und wie sich die wetteifernden Parteien dem Problem stellen. Folglich erwägen mittlerweile selbst konservative Parteien, eine ausdrückliche Pflicht zum Klimaschutz als Grundsatz ins deutsche Grundgesetz aufzunehmen. Unterdessen ist eilig ein Klimaschutzgesetz erlassen worden.

Gleichwohl findet man so gut wie nichts Brauchbares in der Fachliteratur, will man die naheliegende Frage beantworten, welche Auswirkungen die vom Gesetzgeber gutgeheißene mas-

Abb. 1: Karbonisat aus kommunalem Klärschlamm, pelletiert

Abb. 2: Asche von demselben kommunalen Klärschlamm

senhafte Verbrennung von kommunalem Klärschlamm hinsichtlich des Klimaschutzes hat und wie es diesbezüglich etwa mit der technologischen Alternative der pyrolytischen Karbonisierung steht.

Die vorliegende Studie will diese Lücke füllen. Sie befasst sich mit dem „ökologischen Fußabdruck" beider Verfahren. Zudem werden darüberhinausgehende Auswirkungen auf den Straßenverkehr quantifiziert.

2 Bilanzgrenzen

Gegenstand der Betrachtungen sind einerseits aus Klärschlamm durch pyrolytische Karbonisierung gewonnenes Karbonisat (Abbildung 1) und zum anderen Asche als Endprodukt der Klärschlammverbrennung (Abbildung 2) bzw. das daraus in Anlagen zur Phosphatextraktion erzeugte Phosphat-Düngemittel. Erstgenanntes Produkt entsteht bei der Erhitzung von weitgehend getrocknetem Klärschlamm unter Luftabschluss (Pyrolyse). Aber auch bei der Monoverbrennung von Klärschlamm bedarf es einer vorhergehenden Trocknung. Sie erfolgt in der Regel am Standort der großen zentralen Verbrennungsanlage.

Bei beiden Verfahren lässt sich die beim jeweiligen exothermen Wandlungsprozess anfallende Wärme für die nötige Trocknung des Klärschlammes nutzen. Wird weniger intensiv getrocknet, gelangt ein entsprechend feuchteres Trocknungsprodukt zur thermischen Wandlung. In jedem Fall entsteht ein praktisch vollkommen trockenes Endprodukt – ob Asche oder Karbonisat. Das heißt, das letztendlich gleichermaßen fehlende Wasser ist im Wege der vorweggenommenen mehr oder weniger weitgehenden Trocknung entfernt worden *und* während der thermischen Wandlung. Die Anteile der beiden verfahrenstechnischen Operationen spielen keine Rolle, denn der insgesamt physikalisch nötige Wärmebedarf für die Verdampfung der Wassermenge ist derselbe. Folglich unterscheiden sich die zu betrachtenden Alternativen Karbonisierung und Verbrennung diesbezüglich nicht. Somit geht es beim Vergleich lediglich um die thermische Wandlung von Klärschlamm und damit zusammenhängende relevante Sachverhalte.

Die Bilanzgrenze in dieser Weise zu ziehen, dagegen spricht auch nicht etwa das Argument, dass die bei der Karbonisierung abfallende Wärme für die vorgeschaltete Trocknung des Klärschlamms vielleicht nicht ganz ausreichen könnte. Schließlich bleibt ja ein nicht unerheblicher Teil der chemischen Energie des Klärschlamms im Karbonisat in Form von schwarzer Kohle übrig (black carbon), während bei der Verbrennung auch das letzte brennbare Quantum oxidiert wird (Abbildungen 1 und 2). Dem ist entgegenzuhalten, dass die Karbonisierung von Klärschlamm in der Regel dezentral, also am Anfallort des Klärschlamms erfolgt. Dort ist in hervorragender Weise ein energetischer Verbund mit dem Klärwerk möglich, indem etwa Abwärme aus der Klärgasverstromung eingebunden wird. Die sonst wertlose Niedertemperaturwärme findet für die Vorwärmung von Trocknungsluft Anwendung. Es können Kraft-Wärme-Kopplungen realisiert werden. Einheiten des Klärwerks fungieren als Pufferspeicher bzw. Abnehmer für überschießende Wärme (zum Beispiel Faulturm, Gebäudeheizungen). Außerdem hängt es vom konkreten Heizwert des jeweiligen Klärschlamms ab, ob die mit der Kohle ausgekreiste Energie tatsächlich prozesstechnisch ins Gewicht fällt oder nicht. Das könnte beispielsweise der Fall sein, wenn der Klärschlamm vorher einer ausgiebigen Faulung unterzogen worden ist. Dann findet sich ein Großteil der vorhergehenden energetischen Abreicherung des Schlamms als energiereiches Klärgas wieder. Klärgas wird in der Regel an Ort und Stelle verstromt, wobei stets Abwärme anfällt, die bei der Trocknung eine eventuell bestehende energetische Lücke füllen kann.

Es ist bedeutsam, dass die wenigen Klärschlamm-Verbrennungsanlagen überwiegend weitab vom Klärwerksstandort liegen. Eine Strom- oder Prozessdampfabgabe findet zumeist nicht statt. Was nützten also eventuelle Überschüsse an Wärme, wenn sie mangels geeigneten Verbundes keinen Verbraucher finden? Abgesehen davon kommen Monoverbrennungsanlagen vielfach nicht ohne Stützfeuerung zum Beispiel mit Kohle oder Erdgas aus.

Der Vergleich der beiden Alternativen Karbonisierung und Verbrennung beruht also auf derselben Ausgangsbasis (getrockneter Klärschlamm) und auf demselben Nutzen der jeweils erzeugten trockenen Endprodukte (Phosphat-Düngemittel). Das ist die Grundlage der folgenden Gegenüberstellung. Auffächerungen in vielleicht unterscheidbare Verfahrensdetails sind bewusst unterblieben. Denn sie tragen für die grundlegenden Aussagen zum ökologischen Fußabdruck von Karbonisat und von Asche-Phosphat nichts Wesentliches bei und führen zu unnötiger Verkomplizierung. Abgesehen davon könnten die da-

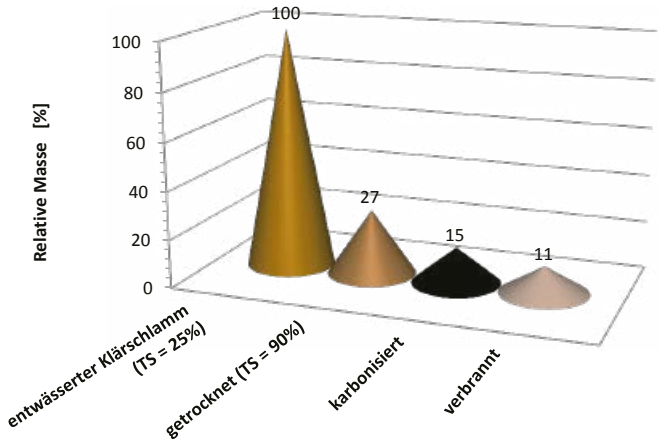


Abb. 3: Spezifische Massenreduktion durch thermische Operationen

raus sich ableitenden zahlreichen möglichen Fallgestaltungen nicht allumfassend betrachtet und einer vollständigen energetischen Beurteilung unterzogen werden.

3 Grunddaten, Annahmen und Berechnungsmethoden

3.1 Klärschlammaufkommen

In der Bundesrepublik Deutschland hatte im Jahr 2018 das Aufkommen an Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen bei einer Einwohnerzahl von 83,019 Millionen Einwohnern [1] rund 1,77 Millionen Tonnen betragen, ausgedrückt als Trockenmasse [2]. Der mit Entwässerungsmaschinen auf den Kläranlagen tatsächlich erreichte Trockensubstanzgehalt (TS) des Klärschlamms beträgt im Durchschnitt lediglich etwa 25 Prozent. Das heißt, kommunaler Klärschlamm, wie er zur Entsorgung anfällt, enthält immerhin noch ungefähr drei Viertel Wasser. Somit errechnet sich ein faktisches Schlammaufkommen von circa 7,08 Millionen Tonnen (Originalsubstanz). Das sind rund 85,3 kg pro Einwohner und Jahr.

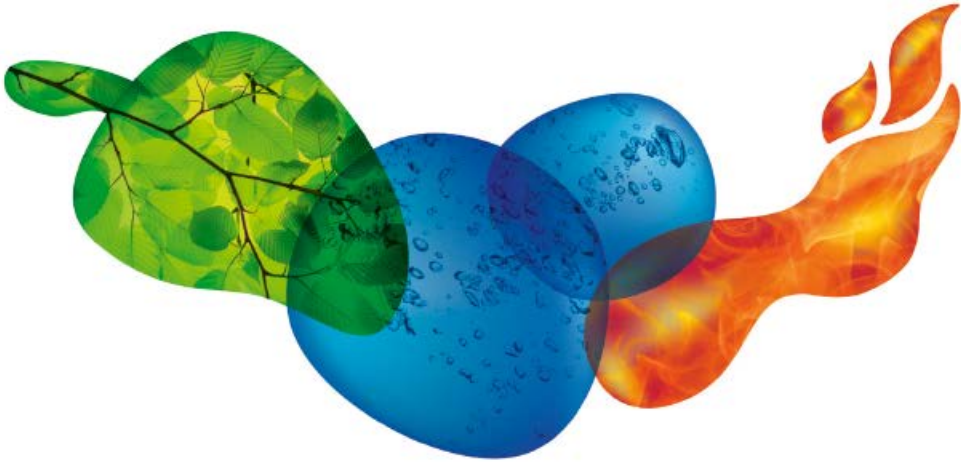
3.2 Massenbilanz

Wie jahrelange großtechnische Versuche zeigen [3], ergibt sich für die Karbonisierung von Klärschlamm folgende Massenbilanz: Aus 100 kg mechanisch entwässertem Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von 25 % verbleiben nach der Trocknung auf einen TS-Gehalt von 90 % noch 27 kg „Trockengut“. Darin sind also noch 2,7 kg (10 %) Wasser enthalten. Wird dieser weitgehend getrocknete Klärschlamm nun karbonisiert, verringert sich die Masse weiter auf circa 15 kg. Das sich ergebende mineralische Produkt (Karbonisat) ist nahezu trocken (circa 99,9 % TS). Würde das „Trockengut“ nicht karbonisiert, sondern stattdessen verbrannt, erhielte man etwa 11 kg Asche. Sie ist ebenfalls praktisch vollkommen trocken. Die graphische Darstellung (Abbildung 3) veranschaulicht die beschriebene Massenreduktion im Wege der Karbonisierung bzw. Verbrennung.

Messe München
Connecting Global Competence

Umwelttechnologien für die Zukunft.

Lösungen und Innovationen für eine nachhaltige Ressourcenwirtschaft – auf der IFAT 2020.



Online-Ticket jetzt sichern!
ifat.de/tickets

4.–8. Mai 2020 • Messe München

Weltleitmesse für Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Rohstoffwirtschaft

IFAT

ifat.de

3.3 Zusammensetzung

Was den Kohlenstoffgehalt von Klärschlamm angeht, gibt es nur wenige Literaturangaben. Vodegel et al [4] ermittelten für einen kommunalen Faulschlamm einen C-Gehalt der Trockenmasse von 33 %. Andere fanden in Klärschlämmen 21,56 % C bei einem Wasseranteil von 80 % [5] – das entspricht rund 27 % Kohlenstoff in der Trockene – und Schneider [6] in vier verschiedenen kommunalen Klärschlämmen C-Anteile von 23,08 % bis 33,52 % im Trockenstoff. Der Mittelwert daraus beträgt rund 28 % Kohlenstoff. Eine Elementaranalyse vom eigenen ausgefaulten Klärschlamm (trocken) ergab einen Kohlenstoffgehalt von 25,2 % [7]. Dieser Wert liegt im unteren Bereich der vorgenannten Spanne und wird als zurückhaltender Ansatz den angestellten Berechnungen zugrunde gelegt. Denn nicht- oder nur teilweise stabilisierter Klärschlamm, wie er für Klärwerke im Kapazitätsbereich um 25 000 EW und kleiner typisch ist, beinhaltet naturgemäß mehr Kohlenstoff.

Geht man von einem ordnungsgemäßen und vollständigen Verbrennungsprozess aus, enthält die Asche keinerlei Kohlenstoff. Dies gilt auch für die Verbrennung von Klärschlamm.

Der Kohlenstoffgehalt von Karbonisat aus Klärschlamm entspricht etwa dem Glühverlust. Der Glühverlust der beim Zweckverband Frohnbach im großtechnischen Maßstab erzeugten Karbonisate liegt im Bereich von 17,6 % bis 29,8 % [8]. Der Mittelwert beträgt 25,5 %. Im Allgemeinen macht der Gehalt an pyrogenem Kohlenstoff in Klärschlammkarbonisaten etwa 25 % aus [9]. Dieser etwas niedrigere Wert wird den Berechnungen zugrunde gelegt (zurückhaltender Ansatz).

Der Phosphatgehalt der erzeugten Karbonisate liegt im Bereich von 9,2 % bis 12,6 % [8]. Der Mittelwert beträgt 10,3 %. Der abgerundete Wert von 10 % geht in die Berechnung ein (zurückhaltender Ansatz).

Nach dem Gesetz der Erhaltung der Masse kann der Glührückstand von Karbonisat – also Klärschlammasche – nicht mehr Phosphat enthalten als das Karbonisat, denn es kommt ja kein Phosphor hinzu. Unterstellt man zudem, dass bei der Erhitzung des Karbonisats auch nichts von dem darin enthaltenen chemisch stabilen Phosphat verschwindet, so erhöht sich angesichts des beim Glühen (Verbrennen) eintretenden Masseverlustes von circa 15 % auf rund 11 % (laut vorgenannter Massenbilanz; Pkt. 3.2) die Phosphatkonzentration entsprechend von circa 10 % auf rund 13 %.

3.4 Transportentfernungen

Für die Karbonisierung von Klärschlamm wird der Transportaufwand mit Null angenommen. Denn solche Anlagen sind für dezentralen Betrieb wie geschaffen und für den Bedarf des jeweiligen Klärwerks bedarfsgerecht skalierbar. Zudem kommt das Verfahren ohne gesonderte Phosphorrückgewinnung aus. Das erzeugte Karbonisat eignet sich gut als umweltschonender Phosphatdünger in der Landwirtschaft und hat hervorragende Eigenschaften insbesondere zur Verbesserung des Bodens. So können die im Umkreis des Klärwerkes tätigen Landwirte und Gärtner das ohne Weiterverarbeitung anwendungsfertige Produkt von dort individuell abholen. Der regionale Stoffkreislauf wird geschlossen. Lange Vertriebswege entfallen. Es entsteht kein entsorgungsbedürftiger Abfall.

Bei der zentralen Verbrennung wird davon ausgegangen, dass der entwässerte Klärschlamm im Mittel etwa 150 km zur nächstgelegenen Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage zu transportieren ist. Dort erfolgen die Trocknung (mit der Abwärme aus der Verbrennung) und die Oxidation. In Deutschland gibt es nur wenige solcher speziellen und für große Durchsätze bestimmten Verbrennungsanlagen. Sie liegen überwiegend im Westteil der Republik. Künftig wird sich die Zahl der Anlagen von derzeit rund zwei Dutzend um vielleicht ein Drittel erhöhen. Dies führt sicherlich zu einer besseren Erreichbarkeit als gegenwärtig. Diese Vermutung ist bei der angenommenen mittleren Entfernung bereits berücksichtigt.

Danach muss die Asche von der zentralen Klärschlammverbrennungsanlage zu einer zentralen Anlage zur Phosphatrückgewinnung geschafft werden. Heute findet man in Deutschland noch keine solcher Anlagen, die es über das Versuchsstadium hinaus geschafft hat. Aber auch künftig wird es nur äußerst wenige davon geben. Wie auch immer – die im Durchschnitt mit der Asche zurückzulegende Transportstrecke wird schätzungsweise nicht weniger als 250 km betragen.

Schließlich ist das in der Phosphat-Raffinerie erzeugte Phosphatprodukt zu Düngemittel-Großhändlern zu bringen. Von da aus wird es vertrieben. Bis zum Anwender liegen im Mittel mindestens 150 km.

Nichtsdestoweniger muss auch der bei der Phosphatextraktion übrigbleibende Asche-Abfall entsorgt werden. Dies wird wohl zum großen Teil durch Verbringung in ehemalige Bergbaugruben erfolgen müssen. Die mittlere Transportentfernung wird auf 250 km geschätzt.

Die vier Entfernungen addieren sich zu einer reinen Transportstrecke von insgesamt 800 km. Bei den Transporten spielen aber auch Leerfahrten eine große Rolle. Die leer zurückzulegenden Entfernungen werden auf 100 % der Strecke der Lastfahrt geschätzt, denn entsprechende Rückfrachten, die die Kontamination der Ladefläche erlauben, gibt es nicht. Diese zusätzlichen Entfernungen bzw. Leerfahrten werden bei der leitfadengemäßen Berechnung [10] der Kraftstoffverbräuche bzw. Emissionen mitberücksichtigt, allerdings mit einem Anteil von lediglich 60 % der Lastfahrten.

Technologisch bedingte Nebentransporte etwa für die Anlieferung von Reaktionspartnern zur Durchführung der Phosphatextraktion aus der Asche (zum Beispiel Schwefelsäure, Magnesium, Ammonium) und für das Fortbringen von Abprodukten (zum Beispiel Gips) sind nicht berücksichtigt worden.

3.5 Jahres-Transportlasten

Geht man davon aus, wie es der politische Wille der Bundesregierung zu sein scheint, dass nahezu das gesamte republikweite Jahresaufkommen an Klärschlamm früher oder später zentralen Klärschlammverbrennungs- und Phosphatrückgewinnungsanlagen zugeführt wird, lassen sich anhand der vorgenannten Massenbilanz (Punkt 3.2) die jeweiligen Jahresmengen errechnen. 7,08 Millionen Tonnen kommunalen Klärschlamms (im Jahr 2018) würden zu 798 013 Tonnen Asche verbrannt. Daraus entstünden 691 611 Tonnen Asche-Abfall und 106 402 Tonnen Phosphat als Produkt.

Die auf diesem Wege errechnete Jahresmenge an Phosphat erscheint plausibel, hält man sich die entsprechende vom Umweltbundesamt veröffentlichte Abschätzung des theoretischen Rückgewinnungspotenzials an Phosphor für das gesamte kommunale Klärschlammaufkommen im Jahr 2017 von rund 1,8 Millionen Jahrestonnen (TS) in Form von Asche aus der Mono-

verbrennung vor Augen [11]. Sie beläuft sich auf 50 000 t P/a. Umgerechnet in die für Düngemittel vorgeschriebene Oxidform als Standardangabe für Nährstoffe – hier Diphosphorpentoxid („Phosphat“) – entspricht dies jährlich 114 570 t P_2O_5. Mit dem aktuellen Klärschlammanfall ins Verhältnis gesetzt (2018, [2]), errechnet sich ein Potenzial von 112 661 t P_2O_5/a. Der Unterschied zum Ergebnis der eigenen Berechnung (106 402 t/a) beträgt weniger als sechs Prozent.

Auf die Einwohnerzahl bezogen ergibt sich folgendes: Aus den pro Kopf und Jahr anfallenden 85,3 kg Klärschlamm werden im Weg der Verbrennung 9,6 kg Asche. Davon sind 8,3 kg als Asche-Abfall zu entsorgen, und 1,3 kg bleiben als Phosphatprodukt übrig.

3.6 Transporttouren

Entsprechend der jahrzehntelangen Praxis muss davon ausgegangen werden, dass die Transporte auch künftig fast ausnahmslos per Lastkraftwagen (Last-/Sattelzug) mit 24 bis 40 Tonnen zulässiger Gesamtmasse als sogenannte Massengut-Transporte erfolgen werden, und zwar überwiegend auf Autobahnen mit im Durchschnitt mittlerem Längsneigungsprofil. Als Frachtgewicht je Lastkraftwagen ist mit 20 bis 26 Tonnen zu rechnen. Die mittlere Auslastung wird eher im unteren Bereich liegen, also bei 20 Tonnen.

Die Anzahl der nötigen Fuhren errechnet sich durch Division der jeweiligen Jahrestransportlasten durch das Frachtgewicht eines Lastkraftwagens (LKW). Je kleiner das Frachtgewicht ist, desto mehr Fahrten sind erforderlich, um die gegebene Menge fortzuschaffen.

Der Ressourcenverbrauch durch Inanspruchnahme der Verkehrsinfrastruktur (zum Beispiel vorzeitige Wiederherstellung verschlissener Autobahnen, Brücken, Tankstellen, Rastplätze usw.) ist bei der vergleichenden Betrachtung sowohl energetisch als auch hinsichtlich der damit verbundenen Emission von Treibhausgasen unbeachtet geblieben.

3.7 Straßenverschleiß

Allerdings lässt sich der erhebliche volkswirtschaftliche Schaden des Ressourcenverbrauchs anhand der geltenden Bemessungsvorschrift für Straßen recht gut abschätzen [12], was bei dieser Gelegenheit geschehen soll. Ihr zufolge sind Bundesautobahnen in der Regel nach der sogenannten Belastungsklasse Bk100 zu dimensionieren. Folglich soll der Oberbau der Straße bis zu 100 Millionen 10-Tonnen-Achsübergänge überstehen. Übrigens spielt der Verkehr von Personenkraftwagen (PKW) für die Schädigung der Straße faktisch keine Rolle, weil jene lediglich etwa ein Zehntel dieser Achslast aufbringen und die Last nach der Vierte-Potenz-Regel bekanntlich ungefähr zur vierten

Potenz als Faktor zur Beanspruchung der Straße führt. Daraus ergibt sich, dass ein zweiachsiger PKW mit zwei Tonnen Gesamtgewicht erst mit 20 000 Überfahrten so viel Schaden anrichtet wie ein einziger vierachsiger 40-Tonnen-LKW mit nur einer Passage.

Der Oberbau von Autobahnen soll zumeist 30 Jahre halten. Das heißt für die Belastungsklasse Bk100, dass über diesen Nutzungszeitraum rund 25 Millionen 40-Tonnen-LKW mit vier Achsen die Straße benutzen können. Gleichmäßig auf die Zeitspanne von 30 Jahren verteilt, sind das rund 833 000 LKW-Überfahrten pro Jahr und rund 2800 an jedem Werktag.

Setzt man die mit dem Klärschlamm zusammenhängenden jährlichen Transport-Touren mit dieser der Straßenbemessung zugrundeliegenden Zahl der LKW-Überfahrten ins Verhältnis und multipliziert diesen Wert mit der mittleren Jahresfahrstrecke je Tour, so errechnet sich die Länge der Fahrspur oder Richtungsfahrbahn der Straße, die aufgrund dieses LKW-Verkehrs jährlich grundhaft zu erneuern ist.

3.8 Jahres-Kraftstoffverbrauch

Als Antrieb für schwere LKW dient heute praktisch ausnahmslos der Dieselmotor. Dies wird auch noch eine Weile so bleiben. Deshalb ist bei den Berechnungen bezüglich des Treibstoffs für Transportfahrzeuge von in Deutschland üblichem Dieselkraftstoff (DK) mit seinen hier vorgegebenen Beimischungen aus nachwachsenden Rohstoffen auszugehen. Dieser Kraftstoff wurde bei den leitfadengemäßen Berechnungen [10] zugrunde gelegt. Demnach beträgt der für die vorliegenden Transportverhältnisse zutreffende mittlere spezifische Bedarf 0,02 Liter je km und Tonne Transportlast. (Der Wert entspricht einem Verbrauch von 40 Litern DK auf 100 km und beinhaltet eine Pauschale für Leerfahrten von 60 % der Lastfahrt.)

Die transportbedingten Jahres-Kraftstoffverbräuche ergeben sich durch Multiplikation des spezifischen DK-Bedarfs mit der jeweiligen Transportstrecke und der zugehörigen Jahres-Transportlast für Klärschlamm, Asche, Asche-Abfall und Phosphatprodukt.

3.9 Jahres-Emissionen durch Kraftstoffverbrauch

In die Berechnungen der transportbedingten Treibhausgasemissionen fließen die nach der vorstehend beschriebenen Methodik ermittelten jeweiligen Transportmengen und -entfernungen für Klärschlamm, Asche, Asche-Abfall und Phosphatprodukt in gleicher Art und Weise ein. Allerdings wird hier auf standardisierte spezifische Treibhausgasemissionen zurückgegriffen, ausgedrückt in kg CO_2 je Liter Kraftstoff und Tonne Transportlast [10]. Demnach beträgt die hier maßgebende mittlere spezifische Emission 0,059 kg CO_2 je km und Tonne Transportlast. (Der Wert entspricht einer spezifischen Freisetzung von 2,94 kg CO_2 je verbrauchten Liters an Dieselkraftstoff.)

3.10 Jahres-Emissionen durch Kohlenstoffverbrennung

Bei vollständiger Oxidation entsteht aus jedem Mol Kohlenstoff ein Mol Kohlendioxid. Aus dem Verhältnis der molaren Massen (44 g/mol CO_2 dividiert durch 12 g/mol C) errechnet sich ein Quotient von 3,67 g/mol CO_2 je g/mol C. Multipliziert mit der eingesetzten Kohlenstoffmasse ergibt sich die bei der Reaktion entstehende Masse an Kohlendioxid.

Für die Berechnungen der Treibhausgasemissionen aufgrund der Verbrennung von Klärschlamm wurde auf dessen Kohlenstoffgehalt zurückgegriffen (Punkt 3.3). Die Ermittlung der bei der Karbonisierung von Klärschlamm vermiedenen CO_2-Emissionen erfolgte dementsprechend anhand des Gehalts an Kohlenstoff im Karbonisat (Punkt 3.3).

4 Ergebnisse

4.1 Zentrale Verbrennung und zentrale Ascheaufbereitung

Die zentrale Verbrennung von kommunalen Klärschlämmen in Monoverbrennungsanlagen mit anschließender Ascheaufbereitung zwecks Phosphatrückführung ebenfalls in speziellen zentralen Anlagen sowie die Verteilung des erzeugten Phosphatdüngers ist mit außerordentlich hohem Aufkommen an Schwerverkehr (40-Tonner) insbesondere auf Autobahnen verbunden. Je nach praktischer Auslastung von maximal 26 Tonnen oder minimal 20 Tonnen je Fahrt sind jährlich etwa 334 000 bis 434 000 Touren anzunehmen. Das entspricht im Mittel rund 1100 bis 1450 LKW-Fahrten pro Werktag.

Mit solchen schweren LKW wären jährlich rund 56 Millionen bis 73 Millionen Straßenkilometer mit realen Transportlasten von 20 bis 26 Tonnen je Tour zu absolvieren. Die Inanspruchnahme (Verkehrsdichte, Verschleiß) der Straßenverkehrsinfrastruktur durch diese Transporte bedeutet einen erheblichen Nachteil für den Ressourcen- und Klimaschutz. Sie zieht den jährlichen grundhaften Ersatzneubau von ungefähr 87 km Fahrspur bzw. Richtungsfahrbahn einer soliden Autobahn nach sich.

Hinzu kommen die durch den Kraftstoffverbrauch bedingten Emissionen an Kohlendioxid von jährlich rund 85 300 t. Durch die Verbrennung des Klärschlamms entstehen bundesweit Kohlendioxid-Emissionen von rund 1,6 Millionen Tonnen im Jahr. Insgesamt summieren sich die direkten Emissionen auf jährlich rund 1,72 Millionen Tonnen CO_2. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei den Monoverbrennungsanlagen eine Strom- oder Dampfabgabe in der Regel nicht stattfindet.

Zusätzliche Emissionen ergeben sich durch Chemikalienverbrauch und Prozessführung bei der Ascheaufbereitung. Eine weitere Belastung stellen die annähernd 692 000 Jahrestonnen an Ascheabfall dar. Sie müssen Jahr für Jahr entsorgt werden und binden auf Dauer teuren Deponieraum.

4.2 Karbonisierung

Bei der alternativen Karbonisierung von Klärschlamm wird der überwiegende Teil des im Klärschlamm enthaltenen Kohlenstoffs mineralisiert und bei Verwendung beispielsweise als P-Düngemittel auf Dauer im Boden gebunden. Denn mit trockenen Verfahren (zum Beispiel Pyrolyse, Vergasung) gewonnene Kohle ist wesentlich beständiger als jene, die mit nassen Verfahren (zum Beispiel HTC = hydrothermale Karbonisierung) erzeugt wurde. Für Pyrolysekohle können im Freiland Standzeiten von mehr als hundert bis über tausend Jahre angenommen werden [13]. Also bleibt der Kohlenstoff im Karbonisat über viele Jahrhunderte hinweg sequestriert, das heißt dauerhaft im Boden gespeichert und eingelagert. Auf jede Tonne kommunalen Klärschlamms entfallen etwa 138 kg CO_2, deren Freisetzung auf diesem Wege verhindert wird.

Der Anteil der CO_2-Sequestrierung beträgt rund 60 Prozent. Folglich ist das Verfahren nicht nur klimaneutral, sondern über die gesamte Prozessstrecke ergibt sich sogar der Vorteil einer negativen Treibhausgasbilanz. Dieser bilanzielle Gewinn beträgt rund –45 kg CO_2 je Tonne kommunalen Klärschlamms.

Außerdem gibt es nahezu keinen Transportaufwand, weil sich die gesamte Prozesskette zur Klärschlammwandlung dezentral am Anfallort erledigen lässt, und zwar in der Regel unter Abgabe von Nutzwärme für betriebliche Zwecke im Klärwerk. Überdies ist die Pyrolyse ein einstufiges Verfahren. Es kommt ohne gesonderte Phosphorrückgewinnung aus. Im Gegenzug sind bei der Weiterverarbeitung von Klärschlamm-Asche komplizierte Prozesse erforderlich, deren Energiebedarfe unverhältnismäßig hoch sind. Denn je nach Verfahren benötigt das Phosphor-Recycling aus Aschen zusätzlich zum Beispiel Phosphorsäure zum Auswaschen oder Koks für das Schmelzen im Ofen. Das erzeugte Klärschlamm-Karbonisat hingegen kann ohne weiteres als umweltfreundlicher Ersatz für Phosphat-Mineraldünger aus importierten Erzen ohne deren hohe Uranbelastungen dienen und von den regional tätigen Landwirten selbst abgeholt werden. Das heißt, die Straßen werden nicht mehrbeansprucht, was einen weiteren erheblichen Vorteil hinsichtlich des Ressourcen- und Klimaschutzes bedeutet.

Die durch Karbonisierung mögliche spezifische Einsparung beträgt rund 198 kg CO_2 je Tonne kommunalen Klärschlammes. Auf die gesamte Bundesrepublik angewendet ergäbe dies eine Vermeidung von etwa 1,4 Millionen Tonnen Kohlendioxid jährlich.

Bei der pyrolytischen Klärschlammkarbonisierung entsteht so gut wie kein Abfall. Die im Karbonisat enthaltenen Mineralien gehen zurück aufs Feld, wo sie ursprünglich herstammen (Nahrung). Es ergibt sich ein vernünftiger regionaler Stoffkreislauf.

5 Vergleich

In Abbildung 4 sind die für jede Variante ermittelten spezifischen Treibhausgasemissionen graphisch veranschaulicht und gegenübergestellt. Man erkennt, dass bei der Variante „Monoverbrennung“ (rechte Säule) der auf den Transport entfallende Anteil an Emissionen (violett eingefärbter Säulenabschnitt) gegenüber dem infolge der Verbrennung (darunterliegende rot dargestellte Fläche) äußerst gering ist. Er macht lediglich knapp fünf Prozent des Gesamten aus. Angesichts des bei diesem zentralistischen System zu treibenden immensen absoluten Transportaufwands mag dieser Befund zunächst überraschen. Die Gegenüberstellung verdeutlicht jedoch umso mehr, wie gravierend die mit der eigentlichen Verbrennung des im Klärschlamm enthaltenen Kohlenstoffs verbundene Freisetzung von Treibhausgasen ausfällt. Sie dominiert bei Weitem.

Die linke Säule (Variante „Karbonisierung“) hat eine geringfügig kleinere Gesamtfläche als die rechte Säule, weil es auf-

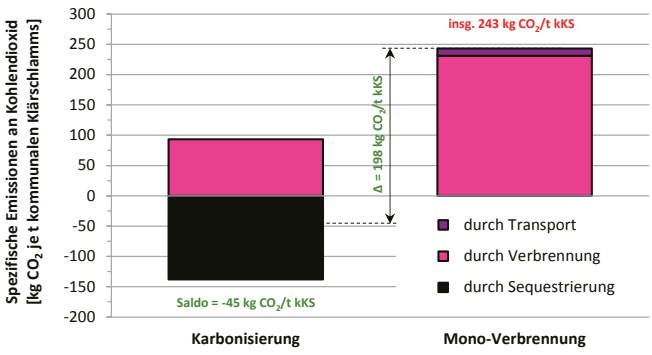


Abb. 4: Spezifische Treibhausgasemissionen im Vergleich

grund des dezentralen Prinzips hier so gut wie keinen Transportaufwand gibt. Der entscheidende Unterschied wird jedoch durch die in den Negativbereich ragende schwarzgefärbte Säulenbasis dargestellt. Sie repräsentiert den im Karbonisat enthaltenen pyrogenen Kohlenstoff als verhinderte Treibhausgasemission und fällt flächenmäßig größer aus als der darüberstehende Säulenabschnitt (rot), der für die Freisetzung steht.

Beim zentralistischen System („Monoverbrennung“) addieren sich rund 231 kg CO_2 je Tonne Klärschlamm durch Verbrennung und etwa 12 kg CO_2 je Tonne Klärschlamm infolge von Transportprozessen zu einer spezifischen Gesamtemission von 243 kg CO_2 je Tonne Klärschlamm.

Die bei einer Karbonisierung erspart bleibende Treibhausgasemission beträgt rund 198 kg CO_2 je Tonne Klärschlamm. Auf die gesamte Bundesrepublik angewendet, entspräche die Einsparung dem Bindungsvermögen eines Buchenwaldes mit rund 48 Millionen Bäumen oder einer Waldfläche von circa 943 000 Hektar, also einem quadratischen Waldgebiet von rund 97 km mal 97 km Ausdehnung. Diese Waldfläche macht etwa ein Zwölftel des gesamten Waldbestandes der Bundesrepublik Deutschland aus.

Auf den Wald als Vergleichsnormal wird zurückgegriffen, weil Holz ein beachtlicher Kohlenstoffspeicher ist. Zudem gilt Wald in seiner Urform als wesentlicher Ausgangspunkt für die erdgeschichtliche Entstehung von Kohle-, Gas- und Ölvorkommen, die nach Meinung der Wissenschaft als „fossile Brennstoffe“ zu Kohlendioxid oxidiert Hauptverursacher für den Klimawandel sind. Abgesehen davon steht die Herstellung von Holzkohle als die älteste Anwendung für den verfahrenstechnischen Prozess der Pyrolyse.

Schließlich gilt Buchenwald als diejenige robuste Waldform, die ehedem ganz Europa bedeckt haben soll. Abbildung 5 zeigt einen in üblicher Weise bewirtschafteten Buchenwaldbestand, wie man ihn heute hier und da vorfinden kann. Sie verschafft eine optische Vorstellung vom in Bezug genommenen Vergleichsobjekt.

Zur vorstehenden vergleichenden Betrachtung sei Folgendes angemerkt:

Erstens:
Eine Buche, 120 Jahre alt und circa 35 m hoch, hat einen Stammdurchmesser von 50 cm in 1,3 m Höhe und beinhaltet samt Krone und Wurzel einen Feststoffgehalt von insgesamt etwa 1,9 Tonnen. Diese Trockenmasse enthält ungefähr zur Hälfte Kohlenstoff, also circa 950 kg. Bei Verbrennung würden daraus rund 3,5 Tonnen Kohlendioxid frei (Faktor 3,67). Das

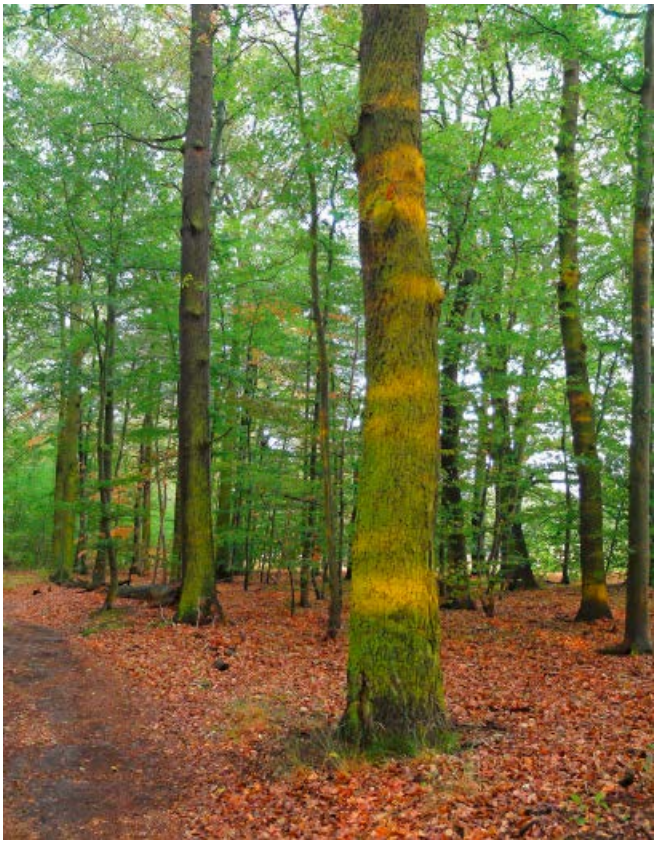


Abb. 5: Ansicht eines Buchenwaldes in üblicher Bewirtschaftungsform

heißt, dass die Buche jährlich im Mittel 29 kg CO_2 bindet bzw. gebunden hatte. [14]

Zweitens:
Deutschland hat eine Waldfläche von 11,4 Millionen Hektar. Die Waldbäume in Deutschland verkörpern 1,2 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Die jährliche Speicherungskapazität dieser Bäume an Kohlendioxid beträgt etwa 17 Millionen Tonnen. [15]

6 Wertung und Gesamtzusammenhang

Die Natur zeigt eine Vielzahl von Strategien, die im Zusammenspiel wirken. Dies sollte Vorbild bei der Auswahl von Techniken und Verfahren unter Berücksichtigung möglichst aller Aspekte sein. Denn naturwissenschaftliche, ökologische und ökonomische Zusammenhänge existieren unabhängig davon, ob sie unerkannt bleiben oder – egal ob bewusst oder versehentlich – vernachlässigt wurden. Sie verursachen über kurz oder lang entsprechende Wirkungen, die dann zumeist überraschen und schwer ins Gewicht fallen. Dies gilt nicht nur für den Umgang mit Atomenergie, Kunststoffen, Pflanzenschutzmitteln, Antibiotika, der Flächenversiegelung usw. in der Vergangenheit, sondern ebenso für die ins Auge gefasste flächendeckende Klärschlammverbrennung.

Setzt man ein zentralistisch organisiertes System von Monoverbrennungsanlagen und Phosphat-Raffinerien für kommunalen Klärschlamm republikweit um, ergäbe sich ein Mehr an Schwerverkehr von ungefähr 73 Millionen Kilometern im Jahr. Sie verteilten sich auf jährlich etwa 434 000 LKW-Fuhren. Sie

würden jedes Jahr aufgrund der starken Belastung rechnerisch rund 87 Kilometer an Straßen zerstören. In Anbetracht der Gesamtlänge des bundesdeutschen Autobahnnetzes von rund 13 000 km [16] mag diese Strecke vielleicht als kurz erscheinen. Die damit verbundene wirtschaftliche Hypothek ist jedoch enorm. Nach der bekannten Faustregel, dass der Bau eines Kilometers Autobahn im Mittel rund 10 Millionen Euro kostet, und weiterhin angenommen, es sei nur eine einzige Richtungsfahrbahn betroffen, weshalb auch nur die Hälfte der Baukosten anfällt, errechnet sich eine dauernde zusätzliche Finanzlast für den ständigen Ersatzneubau in Höhe von circa 435 Millionen Euro im Jahr – also jährlich fast eine halbe Milliarde. Überdies nähme man eine Treibhausgasemission von insgesamt rund 1,7 Millionen Jahrestonnen an CO_2 in Kauf.

Demgegenüber ließe sich durch pyrolytische Karbonisierung des Klärschlamms die enorme Menge von etwa 1,4 Millionen Tonnen im Jahr an CO_2-Emissionen einsparen. Sie entspricht dem jährlichen Bindungsvermögen bezüglich Kohlendioxids von rund 8,3 Prozent des gesamten deutschen Waldbestandes. Zudem käme die dezentral betreibbare Karbonisierung ohne diese gewaltige Verkehrsbelastung aus. Überdies wäre sie aus volkswirtschaftlicher Sicht günstiger und nicht zuletzt der Verbesserung der natürlichen Bodenfunktionen dienlich. Hier sind vor allem die Erhöhung der Wasserhaltekapazität, die Bodenlockerung, die Verringerung von Erosionsanfälligkeit und Nährstoffauswaschung sowie die Verbesserung der Aktivität von Mikroorganismen im Boden zu nennen. Diese Aspekte gewinnen vor allem in der Landwirtschaft angesichts zunehmender langanhaltender Trockenperioden sowie Starkregenereignisse von Jahr zu Jahr an Bedeutung.

Es ist jetzt äußerst wichtig, die durch Bundesgesetz vorgegebene Strategie nochmals zu überprüfen, um erhebliche vermeidbare Schäden zu verhindern, deren Folgen jedermann zu tragen hat. Dabei ist die Zulassung von Klärschlamm-Karbonisat als Düngemittel notwendig.

7 Thesen

Abschließend ist festzustellen, dass die Pyrolyse-Technologie gegenüber der Monoverbrennung ökonomisch, ökologisch und technologisch überlegen ist. Sie lässt sich den individuellen Bedürfnissen und Größenordnungen der kommunalen Aufgabenträger anpassen und öffnet gerade hinsichtlich zu erreichender Umwelt- und Klimaschutzziele neue Zukunftsperspektiven. Das Endprodukt – Klärschlamm-Karbonisat – ist vielseitig und ohne Gesundheitsrisiken einsetzbar. Mit der pyrolytischen Karbonisierung können neue Maßstäbe bei den Themen Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und Schließung von regionalen Stoffkreisläufen gesetzt werden. Deshalb sollte die Düngemittelverordnung die bodenbezogene Verwendung von Klärschlamm-Karbonisat schnellstmöglich zulassen.

Literatur

[1] *https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1217/umfrage/entwicklung-der-gesamtbevoelkerung-seit-2002*, aufgerufen am 9. Juli 2019

[2] „Trendresearch prognostiziert massiven Zubau von Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen“, *EUWID Wasser und Abwasser*, 2019, Nr. 3, S. 11

[3] *Trocknung und Verwertung des auf der zentralen Kläranlage Niederfrohna anfallenden Faulschlammes*, Studie, INFRAPLAN Ingenieure GmbH, 2013

[4] Vodegel, S., Müller, F.: *DBU-Grundsatzstudie: Technologiebewertung thermo-chemischer Konversionsverfahren von Klärschlamm als Alternative zur Verbrennung unter besonderer Berücksichtigung der Potenziale zur Nährstoffgewinnung*, Az. 32919/01, Projektnummer 603547, CUTEC Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2017, S. 78

[5] *www.gemis.de/de/doc/prd/%7B808A1F02-BE1B-4475-80A1-84AE6849E9BF%7D.htm*, aufgerufen am 11. Juli 2019

[6] Schneider, K.: *Verbleib organischer und anorganischer Nähr- und Schadstoffe bei der hydrothermalen Karbonisierung von Klärschlamm*, Bachelorarbeit, FH Jena, 2010, S. 33, 42, 47, 48, *www.cilb-jena.mpg.de*, aufgerufen am 10. Juli 2019

[7] Teil-Prüfbericht 1490654-532656, AWV-Dr. Busse GmbH, Plauen, 2019

[8] *Auswertung der Klärschlammanalysen für die Pyrolyse-Versuche im Maßstab 1:1 vom 14. und 16. Februar 2018 sowie vom 19. März 2018*, Zweckverband Frohnbach

[9] Helmut Gerber (Pyreg GmbH), persönliche Mitteilung am 3. Juli 2019

[10] Schmied, M., Knörr, W.: *Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik*, Deutscher Speditions- und Logistikverband e. V. (Hrsg.), Bonn, 2011, S. 9, 31, 32

[11] Umweltbundesamt: *Klärschlammentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*, Dessau-Roßlau, 2018, S. 49

[12] RStO 12 „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen“, Köln, 2012

[13] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden*, Dessau-Roßlau, 2016, S. 80, 235

[14] *https://www.wald.de/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-ein-baum/#more-399*; aufgerufen am 11. Juli 2019

[15] *https://www.sdw.de/waldwissen/wald-faq/index.html*, aufgerufen am 12. Juli 2019

[16] *https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2972/umfrage/entwicklung-der-gesamtlaenge-des-autobahnnetzes*, aufgerufen am 5. August 2019

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Karin Heinrich
Beuth Hochschule für Technik Berlin
Luxemburger Straße 10, 13353 Berlin

Dipl.-Ing. Elisabeth Lorenz
AZV „GKA Großenhain“
Skassaer Straße 50, 01558 Großenhain

Dipl. Wirtsch.-Ing. Philipp Hagemann
Ingenieurbüro Hagemann
Gartenhöhe 3, 19053 Schwerin

M. Sc. Raymond Kick
INFRAPLAN Ingenieure GmbH
Neugasse 5–9, 09217 Burgstädt

Dr.-Ing. Steffen Heinrich
Zweckverband Frohnbach
Limbacher Straße 23, 09243 Niederfrohna