Überwachung der Pandemieviren SARS-CoV-2 über Abwasseranalysen

Monitoring of SARS-CoV-2 pandemic viruses via wastewater analyses

HANS-CHRISTOPH SELINKA

ZUSAMMENFASSUNG

Wie die COVID-19-Pandemie 2019/2020/2021 zeigt, können durch die Globalisierung jederzeit Pathogene, in diesem Fall das neue SARS-Coronavirus-2 (SARS-CoV-2), in Deutschland eingeschleppt und zu einer ernsten Gefahr für die Öffentliche Gesundheit werden. Das SARS-CoV-2 wird hauptsächlich über die Luft durch Tröpfchen und Aerosole sowie durch kontaminierte Oberflächen übertragen. Infizierte Personen scheiden das Virus und Abbauprodukte der Viren aber auch über den Stuhl aus. Mit Hilfe molekularbiologischer Analysen können diese Bestandteile im Abwasser nachgewiesen werden. Abwasseruntersuchungen auf SARS-CoV-2 können daher hilfreiche Informationen über den aktuellen Infektionszustand der Population geben, von der das Abwasser stammt und in Kombination mit der klinischen Diagnostik zur zeitnahen Planung und Umsetzung von Maßnahmen zum Infektionsschutz beitragen.

ABSTRACT

As shown by the COVID-19 pandemic 2019/2020/2021, pathogens, in this case the new SARS coronavirus-2 (SARS-CoV-2) may be introduced to Germany due to globalization and pose a serious threat to public health. The main transmission pathway of SARS-CoV-2 occurs by air via droplet infections, aerosols, as well as via contaminated surfaces. However, infected individuals also excrete viruses and debris of these viruses via feces, and viral components can be detected by molecular wastewater analysis. Wastewater monitoring of SARS-CoV-2 may therefore provide helpful information of the actual state of infection of the population producing this wastewater and, in addition to clinical diagnostics, contribute to timely initiation of measures for health protection.

DAS SARS-COV-2 UND DER WEG ÜBER DAS ABWASSER

Die Ende 2019 in der chinesischen Großstadt Wuhan (Provinz Guangdong) aufgetretene Epidemie mit schweren Viruserkrankungen, verursacht durch ein neues Coronavirus (2019-nCoV; ICTV 2020), verbreitete sich danach sehr schnell über mehrere Kontinente. Im März 2020 wurde sie von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zur COVID-19-Pandemie (COVID-19: coronavirus disease 2019) erklärt, die im Verlauf eines Jahres weltweit bereits mehr als 100 Millionen Infektionen und mehr als 2 Millionen Todesfälle verursacht hat und weiterhin anhält.

Coronaviren sind behüllte, zoonotische RNA-Viren, die sowohl Tiere als auch Menschen infizieren können. Unter Betrachtung im Elektronenmikroskop weisen diese Viren eine Oberflächenstruktur auf, die aufgrund hervorstehender Proteine (Spikes) aus der Hüllmembran eine Kronen-ähnliche (lateinisch: corona) Struktur aufweisen. Bisher waren sechs Arten der Coronaviren bekannt, die im Menschen Erkrankungen auslösen können.

Vorklärbecken einer Kläranlage. Foto: Selinka.

Neben den vier Arten (HCoV-OC43, HCoV-HKU1, HCoV-229E und HCoV-NL63), die beim Menschen relativ milde Infektionen verursachen, haben bisher vor allem das SARS-Coronavirus-1 und das im mittleren Osten aufgetretene MERS-Coronavirus (Middle east respiratory syndrom) die Aufmerksamkeit auf sich gezogen, da sie für Pandemien in den Jahren 2003 (SARS) und 2017 (MERS) mit jeweils circa 800 Todesfällen verantwortlich waren. Die Bezeichnung SARS-Viren bezieht sich darauf, dass diese Viren schwere akut-respiratorische Symptome (severe acute respiratory syndroms, SARS), also schwere Infektionen der Atemwege, verursachen. Das neu aufgetretene Pandemievirus SARS-CoV-2 ist die siebte Art der humanpathogenen Coronaviren.

Die Übertragung dieser respiratorischen Coronaviren erfolgt hauptsächlich über Tröpfchen, Aerosole und durch direkten engen Kontakt. Als bekannt wurde, dass einige infizierte Patienten auch infektiöse Viren über ihre Fäkalien ausscheiden können (Xiao et al. 2020), verbreitete sich die Sorge einer Übertragung über den fäkal-oralen Infektionsweg. Da Coronaviren mit einer empfindlichen Hüllmembran umgeben sind (sogenannte „behüllte Viren“), sind sie aber in der Umwelt nicht so stabil wie unbehüllte Viren und werden im Abwasser schon auf dem Weg zur Kläranlage größtenteils beschädigt und dadurch inaktiv. Bereits frühere Untersuchungen mit anderen Coronaviren haben gezeigt, dass diese behüllten Viren im warmen Abwasser nur sehr kurze Zeit überleben und innerhalb von 48 bis 72 Stunden um mehr als drei

Zehnerpotenzen reduziert werden (Gundy et al. 2009). Zusätzlich erfolgt in der Kläranlage für die meisten Viren eine deutliche Reduktion von Viruspartikeln um circa ein bis zwei Zehnerpotenzen, unter anderem durch die Entfernung suspendierter Feststoffe, an die behüllte Viren eine stärkere Bindung aufweisen als nicht-behüllte Viren (Ye et al. 2016). Im Ablauf von Kläranlagen wurden daher bisher keine infektiösen SARS-CoV-2 nachgewiesen und Infektionen über den Wasserkreislauf erscheinen derzeit, auch nach Einschätzung der WHO, sehr unwahrscheinlich.

Ein regelmäßiges Monitoring von SARS-CoV-2 im behandelten Abwasser erscheint daher aus infektionsepidemiologischer Sicht nicht notwendig. Durch den molekularbiologischen Nachweis von Viren im unbehandelten Abwasser kann man aber einen guten Überblick über die Infektionssituation in der von der Kläranlage erfassten Bevölkerung gewinnen.

NACHWEIS VON VIREN IM ABWASSER

Viren, die von Menschen ausgeschieden werden, können über das Abwasser zurück in die Umwelt gelangen, können sich dort aber ohne Wirtszellen nicht weiter vermehren. Das Abwasser kann daher, abhängig vom Eintrag der Viren, zahlreiche humanpathogene Viren in sehr unterschiedlichen Konzentrationen enthalten. Die häufigsten Nachweise humanpathogener Viren im Abwasser betreffen unbehüllte enterale Viren mit RNA-Genom (z. B. Noroviren, Enteroviren, Rotaviren, Astroviren sowie Hepatitis-A- und Hepatitis-E-Viren) oder stabile unbehüllte Viren mit DNA-Genom (z. B.: Adenoviren, Parvoviren, Papillomaviren oder Polyomaviren), die bei der Ausscheidung über den Magen-Darm-Trakt nicht vollständig zerstört werden.

Über behüllte Viren wie das SARS-CoV-2 im Abwasser ist dagegen weit weniger bekannt. Behüllte Viren sind aufgrund ihrer empfindlichen Hüllmembran in der Umwelt deutlich weniger stabil als unbehüllte Viren, obwohl gerade diese behüllten Viren in viele Krankheitsausbrüche der letzten Jahrzehnte involviert waren, jedoch nie direkt über den Wasserweg (Ye et al. 2016). Daher wurden die meisten Methoden zum Nachweis von Viren aus der Umwelt für unbehüllte Viren optimiert, während es für behüllte Viren noch keine zuverlässigen Nachweisverfahren gibt.

Nachweise von Viren in der aquatischen Umwelt erfolgen in zwei prinzipiellen Schritten. Zunächst muss aufgrund der meist geringen Virenkonzentrationen im Wasser eine Aufkonzentrierung der Viren erfolgen. Dabei werden oft mehrere Liter Wasser auf wenige Milliliter aufkonzentriert. Dies ist ein kritischer Schritt, da es bisher kein Verfahren gibt, das für alle Viren anwendbar ist und die Aufkonzentrierung daher für jedes Virus optimiert werden muss. Im zweiten Schritt erfolgt dann der eigentliche Nachweis der Viren mit virologischen (Zellkultur) und molekularbiologischen Methoden.

METHODEN ZUM NACHWEIS VON SARS-COV-2 IN WASSERPROBEN

Die Konzentrationen an Viren und Genfragmenten von SARS-CoV-2 im Abwasser weisen aufgrund sehr variabler Ausscheidungsraten in Abhängigkeit vom Infektionszustand der Personen, der Anzahl infizierter Personen sowie der Qualität und den Fließbedingungen der Abwassersysteme eine große Variabilität auf. Im Gegensatz zu intakten Viruspartikeln können RNA-Genomfragmente der SARS-CoV-2 nicht mehr zu Infektionen führen. Viren und Genfragmente treten auch im Abwasser oft nur in sehr geringen Konzentrationen auf. Daher kommt beim Nachweis von SARS-CoV-2 der Aufkonzentrierung der Wasserproben eine große Bedeutung zu. Seit März 2020 wurden zahlreiche Methoden zur Aufkonzentrierung dieser behüllten Viren aus Wasserproben, zum Beispiel über Präzipitation mit Polyethylenglycol (PEG), Ultrazentrifugation oder Filtration über spezielle Filtersäulen beschrieben und weltweit erste

SARS-CoV-2-Prävalenzdaten in der Umwelt ermittelt (Corpuz et al. 2020; Ahmed et. al. 2020; Kumar et al. 2020; Medema et al. 2020; Westhaus et al. 2020).

Die molekularbiologischen Nachweise durch Amplifikation viraler Genbereiche erfolgen dabei meist über PCR-Testsysteme, wie sie auch in der klinischen Diagnostik verwendet werden. Zielbereiche dieser Tests liegen in Genabschnitten, in denen sich SARS-CoV-2 von anderen Coronaviren unterscheidet, zum Beispiel im Bereich des Nukleokapsids (N), des Spike-Proteins (S), der Polymerase-Region (E) und anderer Genbereiche (Stange et al. 2021). Dabei muss immer darauf geachtet werden, dass mindestens zwei verschiedene Genbereiche der Viren (z. B. zwei Genbereiche der N-Region, N1 und N2, oder zwei Abschnitte der N- und E-Genbereiche der Viren) amplifiziert werden, damit eine eindeutige Unterscheidung zwischen dem SARS-CoV-2-Pandemievirus und anderen bereits vorhandenen harmlosen humanen Coronaviren gewährleistet ist (Corman et al. 2020).

Mit diesen Methoden können SARS-CoV-2 auch in Abwasser nachgewiesen werden. Die Methoden liefern – je nach Fragestellung – einfache Positiv-/Negativ-Ergebnisse oder Messdaten, die in komplexe Methoden der Abwasser-basierten Epidemiologie einfließen.

ABWASSER-BASIERTE EPIDEMIOLOGIE

Die Abwasser-basierte Epidemiologie (engl. wastewater-based epidemiology, WBE), die sich in den letzten 20 Jahren rapide fortentwickelt hat, ist eine Methodik der Umweltwissenschaften, die durch das Monitoring von chemischen und mikrobiologischen Parametern, die über Ausscheidungen der Menschen in das Abwasser gelangen, wertvolle Informationen über den Gesundheitszustand einer Population ermitteln kann. Diese Methodik erzielte bisher ihre größten Erfolge in den Gebieten des Drogen-Screenings im Abwasser (Gushgari et al. 2019), in der Früherkennung von Infektionsausbrüchen durch Hepatitis-A-Viren und Noroviren (Hellmer et al. 2014) sowie der Erkennung eines klinisch unerkannten Poliovirusausbruchs in Israel im Jahr 2018 (Brouwer al. 2018).

Wie in ABBILDUNG 1 schematisch dargestellt ist, kann durch den Nachweis bestimmter humanpathogener Viren (z. B. SARS-CoV-2) im kommunalen Abwasser gezeigt werden, dass in der Population, von der das Abwasser stammt, bereits Infektionen mit diesem Virus aufgetreten sind, ohne die Personen selbst zu testen. Dieser Ansatz einer Wasser- beziehungsweise Abwasser-basierten Epidemiologie kann als kosteneffektive und nicht-invasive Voruntersuchung dem öffentlichen Gesundheitsdienst frühzeitig wichtige erste Informationen über die Ausbreitung einer Infektion geben, bevor schwere Erkrankungen über Arzt- und Krankenhausbesuche offensichtlich werden. Über molekularbiologische Abwasseranalysen als Grundlage der WBE können also wertvolle Erkenntnisse für die Erkennung und Überwachung eines lokalen Infektionsgeschehens erhalten und für die Planung effizienter Maßnahmen des Gesundheitsschutzes verwendet werden (TABELLE 1).

Mit den oben genannten Methoden zum Nachweis von SARS-CoV-2 in Wasserproben wurden auch in Deutschland vom Umweltbundesamt (UBA) und anderen Institutionen Abwasserproben untersucht. Dabei konnte der bisherige Verlauf der Pandemie zeitnah durch ein Abwassermonitoring verfolgt werden. Zum Abwassermonitoring von SARS-CoV-2 bildeten sich in kürzester Zeit nationale und internationale Netzwerke aus Forschung, Technik und Politik, wie zum Beispiel die Zusammenarbeit deutscher Forschungsinstitutionen durch Initiativen des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) und der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA), die JCR Umbrella Studie der Europäischen Kommission (EU Science Hub, 2020) und Expertenkonsultationen der WHO.

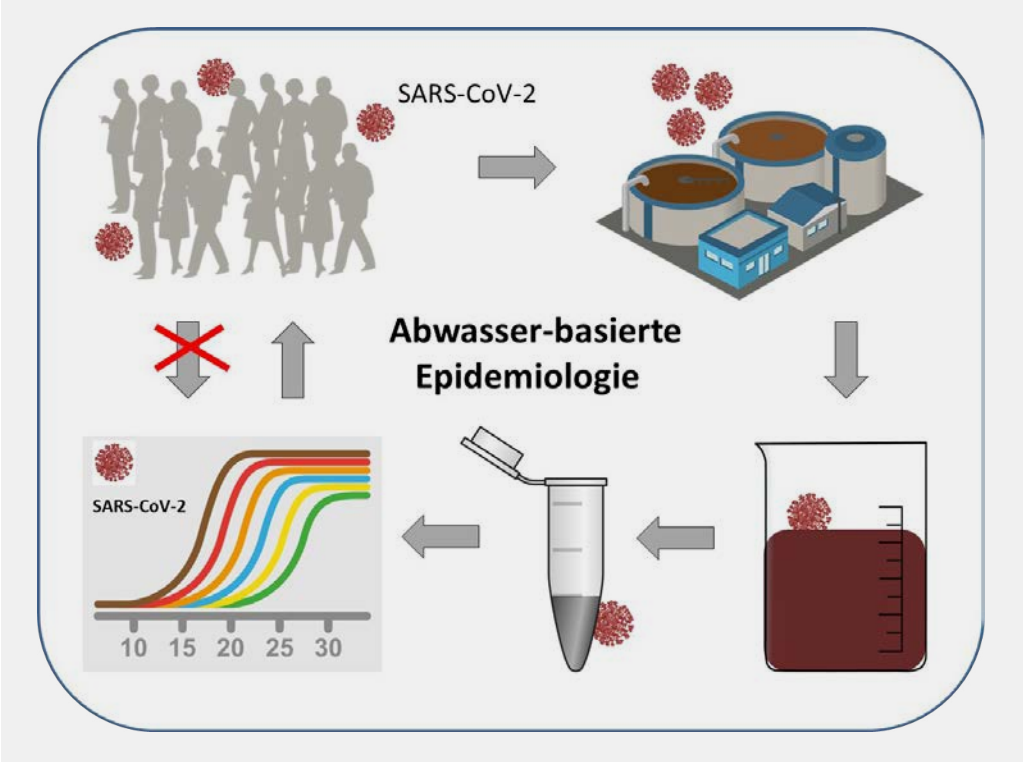

ABBILDUNG 1
Nachweis von SARS-2-Coronaviren im Abwasser zur frühzeitigen Erfassung von Infektionen in einer Population ohne Durchführung direkter Infektionstests.

Symptomatisch und asymptomatisch infizierte Personen scheiden Viren und Genfragmente der Viren über ihre Fäkalien aus. Durch die Aufreinigung und die Analyse viraler Genfragmente aus dem Abwasser können wertvolle Information über den Infektionszustand der an die Kläranlage angeschlossenen Population erhalten werden.

TABELLE 1
Überwachung des Infektionsgeschehens in einer lokalen Population über Abwasseranalysen.

BEREICH	ERKENNTNISSE AUS MOLEKULARBIOLOGISCHEN ABWASSERANALYSEN
Prävalenz	Der Nachweis von Genfragmenten bestimmter Infektionserreger (z. B. SARS-CoV-2) im Abwasser einer kommunalen Kläranlage kann Auskunft darüber geben, ob der Erreger/das Virus in der an die Kläranlage angeschlossenen Population gerade zirkuliert.
	Die untersuchten Proben geben keine Auskunft über einzelne Individuen, sondern sind für eine ganze lokale Population repräsentativ, ohne eine Vielzahl klinischer Untersuchungen durchführen zu müssen.
	Die Höhe der nachgewiesenen Genkopien der untersuchten Erreger im Abwasser kann unter Einbeziehung von abwassertechnischen und erregerspezifischen Daten über die ungefähre Anzahl an infizierten Personen Auskunft geben.
Gesundheitsvorsorge	Durch Probenahmen im Zulauf der Kläranlagen und an strategisch wichtigen Standorten, z. B. Pumpwerken im Kanalsystem, kann das lokale Infektionsgeschehen (Hotspots) früh erkannt und eingegrenzt werden.
	Während einer Epidemie oder Pandemie können über regelmäßig durchgeführte molekularbiologische Abwasseranalysen Veränderungen im lokalen Infektionsverlauf frühzeitig erkannt werden und wertvolle Informationen für die zu treffenden Maßnahmen der Politik und des Gesundheitssystems liefern.

HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE ETABLIERUNG EINES WBE-BASIERTEN FRÜHWARNSYSTEMS FÜR SARS-COV-2

Die Gewinnung epidemiologisch zuverlässiger Daten zur Überwachung und frühzeitigen Steuerung des SARS-CoV-2-Infektionsgeschehens durch molekularbiologische Abwasseranalysen beruht auf einer Reihe sehr komplexer Verfahren, deren Korrektheit und praxisnahe Anwendbarkeit auf jeder Ebene gewährleistet sein muss. Dies gilt für die Verfahren der Probenahme, der Virenaufkonzentrierungsverfahren, der SARS-CoV-2-Nachweisverfahren, der Normalisierung der Messdaten durch Einbeziehung von Wasserqualitätsparametern, der komplexen Modellierung der Daten für Vorhersagen und für den Abgleich mit klinischen Messdaten, bis hin zur Präsentation der WBE-Daten in „Online-tools“ und „Dashboards“ (Bivins et al. 2020; Thompson et al. 2020).

Um aussagekräftige und für Vorhersagen verwendbare Messdaten zu erhalten, müssen die Probenahmeorte und -verfahren je nach lokalen Bedingungen strategisch gut ausgewählt werden. Aufkonzentrierungsverfahren für Viren sind bei der Verwendung großvolumiger Wasserproben essenziell, können aber für die Vielzahl an Viren sehr unterschiedliche Effizienzen aufweisen. Auch in den unterschiedlichen Phasen einer Pandemie sind die vorkommenden Konzentrationen sehr variabel und es wechseln sich hohe mit teilweise sehr geringen Konzentrationen ab, bei denen dem Aufkonzentrierungsschritt für den Nachweis eine besonders hohe Bedeutung zukommt. Die für SARS-COV-2 verwendeten Verfahren sollten daher durch Vergleichstests in unterschiedlichen Laboratorien auf ihre Eignung geprüft und standardisiert werden.

Damit quantitative Nachweise von SARS-CoV-2 im Rahmen der WBE angewandt werden können, muss sichergestellt sein, dass die molekularbiologischen Verfahren (QPCR) hinsichtlich ihrer Spezifität, ihrer Sensitivität und der Verwendung von Kontrollen zuverlässig und vergleichbar sind. Dabei müssen auch die in Umweltproben häufig vorkommenden inhibitorischen Stoffe (z. B. Huminstoffe), die zu einer Beeinträchtigung der PCR-Verfahren führen können, berücksichtigt werden. Anzustreben sind standardisierte Nachweisverfahren, mit denen auch nach der Pandemie längerfristig eine Überwachung über das Abwasser möglich ist.

Im Idealfall können mit Hilfe einer guten Grundlage an Datensätzen aus dem Abwassermonitoring, Abwasser-technischen Informationen, virologischen Informationen und klinischen Daten durch mechanistische, deterministische und statistische Modellierungen spezifische Vorhersagen auf lokaler Ebene getroffen werden. Für die weitere Verarbeitung und praxisnahe Verwendung der Daten ist eine enge Zusammenarbeit mit Kommunen, Umweltbehörden, Gesundheitsbehörden und Politik erforderlich, um darauf basierende konkrete Maßnahmen zu treffen und ihre Wirksamkeit zu überprüfen.

Da sich die Prävalenz der Viren in klinischen Tests vor allem auf erkrankte Patienten mit deutlichen Symptomen bezieht, während die Messdaten aus dem Abwasser zusätzlich auch die ausgeschiedenen SARS-CoV-2-Genomfragmente klinisch inapparenter Infektionen erfassen, können Infektionen auf lokaler Ebene mit Hilfe der SARS-CoV-2-WBE bis zu sechs Tage früher erkannt werden (Medema et al. 2020). Diese Eigenschaft der WBE-basierten Testung hat auch in Zukunft großes Potenzial eventuell wiederauftretende Infektionen mit dem SARS-CoV-2 oder gefährlicheren Mutanten dieses Virus bereits auf lokaler Ebene frühzeitig zu erkennen und Maßnahmen zu ergreifen, um weitere Infektionen zu verhindern (Medema et al. 2020).

FAZIT

Pandemien hat es schon immer gegeben und durch die zunehmende weltweite Vernetzung wird die Ausbreitung von Krankheitserregern über Kontinente immer schneller und wahrscheinlicher.

Das bekannte, aber wenig beachtete, Potenzial der Virenüberwachung im Abwasser und die Möglichkeiten der Abwasser-basierten Epidemiologie als Informationssystem über die Präsenz von Krankheitserregern in einer Population kann auch für SARS-CoV-2 genutzt werden. Allerdings ist das SARS-CoV-2 ein behülltes Virus mit geringer Umweltresistenz. Hinsichtlich der Etablierung eines Detektionssystems mit Frühwarnfunktion für dieses Virus müssen daher bereits kleinste Veränderungen an ansteigenden oder abnehmenden Konzentrationen der viralen Signale in Wasserproben erkannt werden, um frühzeitig bereits auf lokaler Ebene Maßnahmen für den Gesundheitsschutz zu ergreifen. Dazu müssen die entwickelten Methoden zum Virusnachweis ebenso wie die sehr komplexen weiteren Schritte der digitalen Verarbeitung und Bewertung der Messdaten noch weiter optimiert und standardisiert werden. Erste Abwasseruntersuchungen auf SARS-CoV-2 in den ersten beiden Wellen der Pandemie lieferten bereits interessante umweltvirologische Erkenntnisse für den Gesundheitsschutz, die im weiteren Verlauf der Pandemie sehr nützlich sein können und sicherlich auch in der post-pandemischen Phase weiterhin Anwendung finden werden.

LITERATUR

Ahmed W, Angel N, Edson J et al. (2020): First confirmed detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewater in Australia: a proof of concept for the wastewater surveillance of COVID-19 in the community. Sci Total Environ 728: 1. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138764.

Bivins A, North D, Ahmad A et al. (2020): Wastewater-based epidemiology: global collaborative to maximize contributions in the fight against COVID-19. Environ Sci Technol Lett 13: 7754–7757. DOI: 10.1021/acs.est.0c02388.

Brouwer AF, Eisenberg JN, Pomeroy CD et al. (2018): Epidemiology of the silent polio outbreak in Rahat, Israel, based on modeling of environmental surveillance data. Proc. Natl. Acad. Sci. 115: 10625–10633. DOI: 10.1073/pnas.1808798115.

Corman VM, Landt O, Kaiser M et al. (2020): Detection of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) by real-time RT-PCR. Euro Surveill. 25: 2000045. DOI: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.3.2000045.

Corpuz MVA, Buonerba A, Vigliotta G et al. (2020): Viruses in wastewater: occurrence, abundance and detection methods. Sci Total Environ, 745: 140910. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140910.

EU Science Hub (2020): SARS-CoV-2 Surveillance employing sewers. EU Umbrella Study – status update. https://ec.europa.eu/jrc/en.

Gundy PM, Gerba CP, Pepper IL (2009): Survival of coronaviruses in water and wastewater. Food Environm. Virol. 1: 10. DOI: 10.1007/s12560-008-9001-6.

Gushgari AJ, Venkatesan AK, Chen J et al. (2019): Long-term tracking of opoid consumption in two United States cities using wastewater-based epidemiology approach. Water Res. 161: 171–180. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.003.

Hellmér M, Paxéus, N, Magnius, L. et al. (2014): Detection of pathogenic viruses in sewage provided early warnings of hepatitis A virus and norovirus outbreaks. Appl Environ Microbiol 80: 6771–6781. DOI: 10.1128/AEM.01981-14.

ICTV – Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of Viruses (2020): The species Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: classifying 2019-nCoV and naming it SARS-CoV-2. Nat Microbiol 5: 536–544. DOI: 10.1038/s41564-020-0695-z.

Kumar M, Patel AK, Shah AV et al. (2020): The first proof of the capability of wastewater surveillance for COVID-19 in India through the detection of the genetic material of SARS-CoV-2. Sci Total Environ 746: 141326. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141326.

Medema G, Heijnen L, Elsinga, R et al. (2020): Presence of SARS-coronavirus-2 RNA in sewage and correlation with reported COVID-19 prevalence in the early stage of the epidemic in The Netherlands. Environ Sci Technol Lett 7: 511–516. DOI: 10.1021/acs.estlett.0c00357.

Stange C, Ho J, Tiehm A (2021): Nachweisverfahren und Relevanz von SARS-Coronavirus-2 in der Wasserwirtschaft. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 68/1. DOI: 10.3242/kae2021.01.002.

Thompson JR, Nancharaiah YV Gu X et al. (2020): Making waves: Wastewater surveillance of SARS-CoV-2 for population-based health management. Water research 184: 116181. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116181.

Westhaus S, Weber FA, Schiwy S et al. (2021): Detection of SARS-CoV-2 in raw and treated wastewater in Germany – suitability for COVID-10 surveillance and potential transmission risks. Sci Total Environ 751: 141750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141750.

Xiao F, Sun J, Xu Y et al. (2020): Infectious SARS-CoV-2 in feces of patient with severe COVID-19. Emerg. Infect. Dis. J. 26:1920–1922. DOI: 10.3201/eid2608.200681.

Ye Y, Ellenberg RM, Graham KE et al. (2016): Survivability, partioning, and recovery of enveloped viruses in untreated municipal wastewater. Environ. Sci. Technol. 50: 5077–5085. DOI: 10.1021/acs.est.6b00876.

KONTAKT

Dr. Hans-Christoph Selinka
Umweltbundesamt
Fachgebiet II1.4 Mikrobiologische Risiken
Corrensplatz 1
14195 Berlin
Email: hans-christoph.selinka[at]uba.de

[UBA]