

<https://doi.org/10.17590/20220708-125409>

Aufbereitete Abwässer: Virale Krankheitserreger auf pflanzlichen Lebensmitteln vermeiden

Stellungnahme Nr. 019/2022 des BfR vom 8. Juli 2022

Klimatische Veränderungen erhöhen den Druck auf die Wasserressourcen in Deutschland und Europa. Um dem zu begegnen, wurde auf europäischer Ebene die Nutzung von aufbereitetem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung rechtlich ermöglicht. Für die Aufbereitung stehen unterschiedliche Methoden der Abwasserbehandlung zur Verfügung. Einheitliche Mindestanforderungen für die Wasserwiederverwendung sollen dabei die Gesundheit von Mensch und Tier und den Schutz der Umwelt sicherstellen. Das Vorkommen viraler Krankheitserreger im Abwasser stellt in diesem Zusammenhang eine große Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund hat das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) wissenschaftliche Literatur zum gesundheitlichen Risiko der Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung von Pflanzen, die als Lebensmittel genutzt werden, mit Blick auf virale Krankheitserreger ausgewertet. Im besonderen Fokus stehen dabei roh verzehrtes Obst und Gemüse, bei dem mögliche Krankheitserreger nicht durch Erhitzen reduziert oder abgetötet werden.

Insbesondere das humane Norovirus, das eine Magen-Darm-Erkrankung auslöst, und das Hepatitis A-Virus, das zu einer Leberentzündung führen kann, sind Viren, die über pflanzliche Lebensmittel übertragen werden können. Für beide Virusarten sind zahlreiche Erkrankungsausbrüche beschrieben, die auf den Verzehr von pflanzlichen Lebensmitteln wie Tiefkühl-Beeren und Blattgemüse zurückgehen. Darüber hinaus spielen auch weitere Viren, wie das Hepatitis E-Virus, Rotavirus, Sapovirus, Astrovirus und Adenovirus eine Rolle. Grundsätzlich kann die Schwere der ausgelösten Erkrankung je nach Virusart und Gesundheitszustand der betroffenen Person variieren.

Eine gegenwärtige unzureichende Datenlage erschwert eine abschließende Risikobewertung der Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung von Obst und Gemüse mit Blick auf krankmachende Viren. Es gibt derzeit nur wenige Daten zur Stabilität und Inaktivierung von humanem Norovirus und Hepatitis A-Virus, so auch zu ihrem Verhalten während der Abwasseraufbereitung, im Boden, auf pflanzlichen Lebensmitteln sowie über die Aufnahme dieser Viren über die Wurzeln in die Pflanze. Die verfügbaren Daten und Untersuchungen mit eng verwandten Viren zeigen jedoch, dass die Viren in den meisten Fällen eine sehr hohe Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen, im Boden und auf der Pflanze haben und über die Wurzeln aufgenommen werden können. Zudem weisen die meisten relevanten Viren eine sehr niedrige minimale Infektionsdosis auf, wodurch bereits geringe Virusmengen zu Erkrankungen führen können. Dem gegenüber werden hohe Virusmengen mit dem Stuhl ausgeschieden, was wiederum eine hohe Belastung des Abwassers nahelegt.

Neben den aufgezeigten Datenlücken gibt es auch Forschungsbedarf in Bezug auf Methoden, mit denen sich die Wirksamkeit der Inaktivierung entsprechender Viren durch verschiedene Abwasseraufbereitungssysteme und die Qualität des aufbereiteten Abwassers mit Blick auf das Vorhandensein von ansteckenden Viren untersuchen lassen.

Auch wenn die gegenwärtige Datenlage noch unzureichend ist, wird im Sinne des gesundheitlichen Verbraucherschutzes empfohlen, auf die Bewässerung von Pflanzen, deren bodennah oder im Boden wachsende Teile üblicherweise roh verzehrt werden, mit aufbereitetem Abwasser zu verzichten. Diese Empfehlung gilt, bis geeignete Aufbereitungsverfahren und Kontrollen sicherstellen können, dass im Bewässerungswasser keine krankmachenden Viren enthalten sind. Bei Pflanzen, die nicht roh verzehrt werden, sind gesundheitliche Be-

eintrüchtigungen durch die Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser nach derzeitigem Wissen nicht zu erwarten, solange die Lebensmittel vor dem Verzehr ausreichend erhitzt werden.

 BfR-Risikoprofil: Infektion mit Norovirus und Hepatitis A-Virus nach Verzehr von rohem Obst und Gemüse, das mit aufbereitetem Abwasser bewässert wurde (Stellungnahme Nummer 019/2022)	
A Betroffen sind	Allgemeinbevölkerung Senioren Chronisch Kranke 
B Wahrscheinlichkeit einer gesundheitlichen Beeinträchtigung bei Verzehr von rohem Obst und Gemüse, das mit aufbereitetem Abwasser bewässert wurde	Praktisch ausgeschlossen Unwahrscheinlich Möglich Wahrscheinlich Gesichert
C Schwere der gesundheitlichen Beeinträchtigung bei Verzehr von rohem Obst und Gemüse, das mit aufbereitetem Abwasser bewässert wurde	Keine Beeinträchtigung (nur Allgemeinbevölkerung) Leichte Beeinträchtigung [reversibel] Mittelschwere Beeinträchtigung [reversibel] Schwere Beeinträchtigung [irreversibel] (nur Senioren und chronisch Kranke)
D Aussagekraft der vorliegenden Daten	Hoch: Die wichtigsten Daten liegen vor und sind widerspruchsfrei Mittel: Einige wichtige Daten fehlen oder sind widersprüchlich Gering: Zahlreiche wichtige Daten fehlen oder sind widersprüchlich
E Kontrollierbarkeit durch Verbraucher	Kontrolle nicht notwendig Kontrollierbar durch Vorsichtsmaßnahmen Kontrollierbar durch Verzicht Nicht kontrollierbar

Erläuterungen

Das Risikoprofil soll das in der BfR-Stellungnahme beschriebene Risiko visualisieren. Es ist nicht dazu gedacht, Risikovergleiche anzustellen. Das Risikoprofil sollte nur im Zusammenhang mit der Stellungnahme gelesen werden.

[1] Zeile B – Wahrscheinlichkeit einer gesundheitlichen Beeinträchtigung

Die Wahrscheinlichkeit einer gesundheitlichen Beeinträchtigung wird unter anderem beeinflusst von der Menge der im Bewässerungswasser vorkommenden Krankheitserreger, der Art der bewässerten Pflanzen und von der Bewässerungstechnik. Das BfR erwartet einen Anstieg dieser Wahrscheinlichkeit, wenn in Deutschland Pflanzen, deren bodennahe oder im Boden wachsende Teile für den Rohverzehr vorgesehen sind, mit aufbereitetem Abwasser bewässert werden.

[2] Zeile C – Schwere der gesundheitlichen Beeinträchtigung

Die Schwere der Beeinträchtigung kann abhängig vom Immunstatus, Alter und von Vorerkrankungen variieren. Insbesondere bei sehr alten Menschen sind mit Blick auf das Norovirus und das Hepatitis A-Virus auch mittelschwerere gesundheitliche Beeinträchtigungen und vereinzelt Todesfälle möglich. Bei Personen mit Leberbeschädigungen sind mit Blick auf das Hepatitis A-Virus ebenfalls mittelschwerere gesundheitliche Beeinträchtigungen und vereinzelt Todesfälle möglich.

[3] Zeile D – Aussagekraft der vorliegenden Daten

Eine unzureichende Datenlage und das Fehlen geeigneter Nachweismethoden für Norovirus und Hepatitis A-Virus in aufbereitetem Abwasser erschweren eine abschließende Risikobewertung der Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung von Obst und Gemüse mit Blick auf das Norovirus und Hepatitis A-Virus.

[4] Zeile E – Kontrollierbarkeit durch Verbraucher

Wegen der geringen Infektionsdosis haben Verbraucherinnen und Verbraucher bis auf das vollständige Durcherhitzen von Obst und Gemüse vor dem Verzehr keine Möglichkeiten, das Risiko zu kontrollieren. Deshalb ist es umso wichtiger, dass im Bewässerungswasser von pflanzlichen Lebensmitteln, die roh verzehrt werden, keine humanpathogenen Viren vorhanden sind. Ausschließlich mit Blick auf das Hepatitis A-Virus haben Verbraucherinnen und Verbraucher die Möglichkeit, das Risiko durch eine Impfung zu kontrollieren.

1 Gegenstand der Bewertung

Die Verordnung (EU) 2020/741 über Mindestanforderungen für die Wasserwiederverwendung trat am 26. Juni 2020 in Kraft und wird am 26. Juni 2023 Gültigkeit erlangen. Zur nationalen Umsetzung dieser Verordnung sind noch zahlreiche Fragen zu klären. Eine sichere Anwendung von aufbereitetem Abwasser in der landwirtschaftlichen Bewässerung setzt unter anderem voraus, dass gesundheitliche Beeinträchtigungen der Verbraucherinnen und Verbraucher nicht zu erwarten sind. Deshalb erfolgt in dieser Stellungnahme eine erste Abschätzung zum gesundheitlichen Risiko der Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung von Pflanzen, die als Lebensmittel genutzt werden sollen, im Hinblick auf krankmachende (humanpathogene) Viren. Es wurde weiterhin geprüft, ob Einschränkungen für die Verwendung aufbereiteten Abwassers, zusätzliche Validierungsparameter für die Abwasseraufbereitung oder zusätzliche Kontrollen des aufbereiteten Abwassers im Hinblick auf Gefahren durch humanpathogene Viren erforderlich sind.

2 Ergebnis

Nach Auswertung von Publikationen kommt das BfR zu dem Schluss, dass eine abschließende Risikobewertung für die Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung von Pflanzen im Hinblick auf humanpathogene Viren aufgrund fehlender Daten derzeit nicht möglich ist. Die wenigen verfügbaren Daten legen allerdings nahe, dass eine Übertragung von humanpathogenen Viren auf den Menschen über die Bewässerung von Pflanzen mit kontaminiertem aufbereitetem Abwasser und deren nachfolgenden Verzehr möglich und in hohem Grade plausibel ist. Deshalb sollten strikte Begrenzungen für die Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung in Bezug auf roh zu verzehrende pflanzliche Lebensmittel gelten.

Zu den Viren, die über pflanzliche Lebensmittel übertragen werden können, zählen vor allem das humane Norovirus, das eine Magen-Darm-Erkrankung auslöst, und das Hepatitis-A-Virus, das zu einer Leberentzündung führen kann. Weiterhin können andere über den Magen-Darm-Trakt (enteral) übertragbare Viren, wie Hepatitis E-Virus, Rotavirus, Sapovirus, Astrovirus und Adenovirus in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen. Die Schwere der ausgelösten Erkrankungen variiert je nach Virusart und Patientengruppe, wobei die Hepatitis-Erreger häufig zu Hospitalisierungen führen und die Gastroenteritis-Erreger häufig mit hohen Fall-Zahlen einhergehen. Für humane Noroviren und Hepatitis A-Viren wurden zahlreiche Erkrankungsausbrüche beschrieben, die auf den Verzehr von pflanzlichen Lebensmitteln wie Tiefkühl-Beeren sowie Blattgemüse zurückzuführen waren.

Humane Noroviren lassen sich bisher nicht effizient in Zellkulturen vermehren, weshalb die Ermittlung ihrer Infektiosität in einer Probe sehr schwierig ist. Deshalb fehlen weitgehend Daten zur Stabilität und Inaktivierung von humanen Noroviren. Zahlreiche Stabilitäts- und Inaktivierungs-Untersuchungen wurden mit Hilfe eng verwandter Viren – sogenannter Surrogat-Viren – durchgeführt. Das Verhalten dieser Viren ist aber nicht identisch mit dem der humanen Noroviren, weshalb die Aussagekraft solcher Studien für das Verhalten von humanen Noroviren fraglich ist. Eine ähnliche Situation besteht für das Hepatitis A-Virus, für das nur sehr wenige Zellkultur-adaptierte Stämme existieren. Viele Studien zur Stabilität und Inaktivierung von Hepatitis A-Virus basieren deshalb auf Daten eines einzigen Stammes, weshalb die Vielfalt der tatsächlich vorkommenden Feldstämme nicht abgebildet werden kann. Aus den genannten Gründen existieren derzeit nur sehr wenige Daten zur Stabilität und zur Inaktivierung von humanem Norovirus und Hepatitis A-Virus während der Abwasseraufbereitung, im Boden, auf pflanzlichen Lebensmitteln sowie über die Aufnahme dieser Viren über die Wurzeln in Pflanzen.

Bei Betrachtung der wenigen verfügbaren Daten für die humanpathogenen Viren sowie der verfügbaren Daten der untersuchten Surrogatviren lässt sich allerdings feststellen, dass die Viren in den meisten Fällen eine sehr hohe Stabilität gegenüber verschiedenen physiko-chemischen Parametern, im Boden und auf der Pflanze zeigen. Eine Aufnahme (Internalisierung) in die Pflanze über die Wurzeln wurde in den meisten Studien, zumindest auf der Basis des Nachweises von viraler Ribonukleinsäure (RNA), gezeigt. RNA der interessierenden Viren wurde in mehreren Studien auf pflanzlichen Lebensmitteln nachgewiesen, und eine Vielzahl von viralen Erkrankungsausbrüchen nach dem Verzehr von pflanzlichen Lebensmitteln ist dokumentiert. Die ausgelösten Erkrankungen haben eine hohe Relevanz für die Gesundheit der Bevölkerung. Eine genaue Abschätzung des Übertragungsrisikos ist nicht möglich. Die meisten interessierenden Viren weisen jedoch eine sehr niedrige minimale Infektionsdosis auf, wodurch bereits geringe Virusmengen nach Aufnahme zu Erkrankungen führen können. Dem gegenüber werden hohe Virusmengen mit dem Stuhl ausgeschieden, was die Möglichkeit einer hohen Belastung des Abwassers nahelegt. Außerdem kann aus nachfolgenden Gründen nicht sichergestellt werden, dass die Virusinfektiosität durch die Abwasser-aufbereitung gemäß der Verordnung (EU) 2020/741 ausreichend gesenkt wird und dass die Viren im Boden und auf bzw. in der Pflanze ausreichend inaktiviert werden. Vor diesem Hintergrund wurde der Risikocharakterisierung bei verschiedenen Bewässerungssystemen deshalb ein „worst case“-Szenario zugrunde gelegt.

Nach dem Ergebnis der durchgeführten Risikocharakterisierung empfiehlt das BfR, auf die Verwendung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung von Pflanzen zu verzichten, deren bodennah oder im Boden wachsende Teile für den Rohverzehr vorgesehen sind. Diese Empfehlung gilt solange, bis durch geeignete Aufbereitungsverfahren und Kontrollen sichergestellt werden kann, dass im Bewässerungswasser keine humanpathogenen Viren enthalten sind. Bei jeder der betrachteten Bewässerungssysteme (unterirdische Tropfbewässerung, oberirdische Tropfbewässerung, wasserführende Gräben, Beregnungssystem, hydroponische Kultur¹) können nach derzeitigem Wissensstand im aufbereiteten Abwasser vorhandene infektiöse humanpathogene Viren auf oder in die essbaren Teile der Pflanzen gelangen und bei deren Rohverzehr Erkrankungen beim Menschen auslösen.

Beim Vergleich der verschiedenen Bewässerungssysteme erscheinen die unterirdische Tropfbewässerung und die hydroponische Kultur mit der geringsten Wahrscheinlichkeit einer Virus-Kontamination oberirdischer Teile der Pflanze assoziiert zu sein. Es fehlen jedoch Daten zur Aufnahme von humanpathogenen Viren über die Wurzeln in die Pflanze und deren nachfolgende Infektiosität im oberirdischen Teil der Pflanze, wobei einige an Surrogatviren ermittelten Daten für eine solche Aufnahme sprechen. Daher kann auch diese Art der Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser nicht empfohlen werden.

Für die Bewertung einer Bewässerung von Obstbäumen und Weinbergen mit aufbereitetem Abwasser liegen bezüglich Viren derzeit keine Daten vor. Es gibt allerdings auch keine Hinweise auf Erkrankungsausbrüche durch Viren nach dem Verzehr von Baumobst oder Weintrauben. Eine effiziente Aufnahme von Viren über die Wurzeln von Obstbäumen und Weinstöcken mit nachfolgendem Transport über verhältnismäßig lange Strecken in die Früchte erscheint nach derzeitigem Stand der Wissenschaft eher unwahrscheinlich, weshalb gesundheitliche Beeinträchtigungen durch die Bewässerung dieser Pflanzen mit aufbereitetem Abwasser (Mindestgüteklasse A oder B) nicht zu erwarten sind. Diese Einschätzung gilt aber nur, sofern keine Beregnung erfolgt, bei der die Früchte in direkten Kontakt mit dem aufbereiteten Abwasser kommen können.

¹ Anbau von Pflanzen in wässriger Nährlösung ohne Erde

Für die Bewässerung von Futterpflanzen ergeben sich für die hier hauptsächlich betrachteten Viren (humanes Norovirus und Hepatitis A-Virus) keine konkreten gesundheitlichen Risiken, da diese Viren aufgrund ihrer Wirtsspezifität keine Gefahr für Tiere darstellen. Eine Bewertung bezüglich der Möglichkeit der Verbreitung zoonotischer Viren in der Tierpopulation (z. B. für Hepatitis E-Virus und Rotavirus) sowie bezüglich tierpathogener Viren wurde hier nicht vorgenommen.

Bei Pflanzen, die nicht roh verzehrt werden, sind gesundheitliche Beeinträchtigungen durch die Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser nach derzeitigem Wissen nicht zu erwarten, solange sichergestellt werden kann, dass eine ausreichende Erhitzung der Lebensmittel vor dem Verzehr erfolgt.

Die Aufnahme von Indikatorviren in das Prüfungsschema der Verordnung (EU) 2020/741 zur Validierung von Abwasser-Aufbereitungsverfahren erscheint sinnvoll. Die derzeit im Anhang I, Abschnitt 2 der Verordnung (EU) 2020/741 genannten Regelungen und Parameter zur Validierung von Aufbereitungseinrichtungen werden allerdings als nicht ausreichend eingeschätzt, um eine sichere Entfernung von humanpathogenen Viren aus dem Abwasser zu gewährleisten. Dass zur Erzielung einer Abwesenheit von humanpathogenen Viren höhere Anforderungen notwendig sind, zeigt eine Leitlinie der World Health Organization (WHO). In der *Guidance on Potable Reuse* (WHO, 2017) wird für eine sichere Aufbereitung von Abwasser für die Nutzung als Trinkwasser als Standardleistungsziel (Default Performance Target) eine Reduktion von 9,5 \log_{10} -Stufen enterischer Viren (Noroviren) empfohlen. Um die Effektivität der Virusreduktion für humanpathogene Viren bewerten zu können, sind jedoch geeignete Nachweisverfahren erforderlich, die gegebenenfalls erst noch entwickelt bzw. validiert werden müssten. Sollen hierfür Surrogatviren verwendet werden, so müssten außerdem Nachweise erbracht werden, dass das Verhalten der eingesetzten Surrogatviren mit dem der humanpathogenen Viren vergleichbar ist. Dies gilt auch für Coliphagen als derzeit übliche Indikatorviren.

Die im Anhang I, Abschnitt 2 der Verordnung (EU) 2020/741 zur Überwachung der Qualität von aufbereitetem Abwasser aufgeführten Parameter erlauben keine Aussage über das Vorkommen von humanpathogenen Viren. Deshalb wäre die Aufnahme von Indikatorviren auch in diesen Untersuchungskatalog sinnvoll. Hierfür ist die Eignung verschiedener Indikatorviren im Hinblick auf ihre Aussagekraft zur An- und Abwesenheit der humanpathogenen Viren zu prüfen.

3 Begründung

3.1 Risikobewertung

3.1.1 Gefahrenidentifizierung

3.1.1.1 Norovirus

Das **Norovirus (NoV)** ist ein unbehülltes Einzelstrang-RNA-Virus, das in das Genus *Norovirus* der Virusfamilie *Caliciviridae* eingeordnet wird. Es existieren mehrere Genogruppen mit zahlreichen Genotypen (Chhabra et al., 2019). Die wichtigsten humanpathogenen NoV-Stämme werden in die Genogruppen I und II eingeordnet.

Nach derzeitigem Wissensstand infizieren humane NoV-Stämme nur den Menschen und werden nicht zoonotisch auf Tiere übertragen. Die Viren werden oral aufgenommen, vermehren sich im Magen-Darm-Trakt (Gastrointestinaltrakt) und werden über den Stuhl ausgeschieden. Die Übertragung kann entweder durch direkten Kontakt zu Infizierten oder indirekt

über kontaminierte Oberflächen oder die Aufnahme von kontaminiertem Wasser oder Lebensmitteln erfolgen (van Beek und Koopmans, 2013). Bei letzterem spielen kontaminierte Muscheln und tiefgefrorene Beeren eine besondere Rolle, die häufig zu lebensmittelbedingten Ausbrüchen führen.

Über die Stabilität von humanem NoV in der Umwelt und unter spezifischen physiko-chemischen Bedingungen ist bisher nur wenig bekannt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass geeignete Methoden zur Infektiositätstestung beim humanem NoV weitgehend fehlen. So existieren derzeit keine effizienten Zellkultursysteme oder Tiermodelle für das humane NoV. Ein kürzlich entwickeltes Zellkultursystem auf der Basis sogenannter intestinaler Organoiden – im Labor gezüchtete, organähnliche Zellstrukturen – ist vielversprechend (Ettayebi et al., 2021), aber sehr arbeitsaufwendig und kann nur für wenige ausgewählte Fragestellungen verwendet werden. Viele Versuche zur Abschätzung der Stabilität von humanem NoV wurden deshalb unter Benutzung eng verwandter Viren (sogenannter Surrogat-Viren) durchgeführt, die sich in Zellkulturen gut vermehren lassen, so z. B. das murine NoV, das Tulane-Virus oder das feline Calicivirus. Andere Studien verwenden molekularbiologische Methoden, die die Integrität des humanen NoV-Kapsids durch dessen Bindung an Rezeptormoleküle oder durch dessen Schutz des Virusgenoms vor RNA-abbauenden Enzymen untersuchen. Die Aussagekraft der durch Surrogat-Viren oder molekularbiologische Methoden generierten Daten für das Verhalten von humanem NoV ist aber generell begrenzt, und vergleichende Studien zeigen oft große Unterschiede zwischen den verschiedenen Virusarten und angewendeten Methoden (Richards, 2012).

Einige direkte Erkenntnisse zum Verlauf der Infektion mit humanem NoV und dessen Inaktivierung wurden mit Hilfe von Infektionsversuchen mit Freiwilligen erhalten. Hierbei zeigte sich, dass das humane NoV sehr stabil gegenüber verschiedenen physiko-chemischen Bedingungen ist. So wurde das Virus bei einer Behandlung mit 10 mg/l Chlor (Keswick et al., 1985) oder einer Erhitzung für 30 min bei 60 °C (Dolin et al., 1972) nicht vollständig inaktiviert und Hochdruckbehandlungen von 600 MPa für fünf Minuten waren nötig, um humanes NoV in Austern vollständig zu inaktivieren (Leon et al., 2011). In einer neueren Studie, in der die intestinale Organoid-Zellkultur zur Messung der Infektiosität von humanem NoV verwendet wurde, wurde aber eine Virusinaktivierung nach 15 min Erhitzung auf 60 °C festgestellt (Ettayebi et al., 2016).

3.1.1.2 Hepatitis A-Virus

Das **Hepatitis A-Virus (HAV)** wird in den Genus *Hepatitisvirus* der Virusfamilie *Picornaviridae* eingeordnet. Es besitzt ein unbehülltes Viruskapsid und ein Genom aus einzelsträngiger RNA. Humane HAV-Stämme werden in die Genotypen I-III eingeordnet (Smith und Simmons, 2018).

Vertreter der Genotypen I-III wurden bisher nur im Menschen nachgewiesen; eng verwandte HAV-Stämme der Genotypen IV-VI sind in verschiedenen Affenarten verbreitet. HAV wird oral aufgenommen und vermehrt sich danach vor allem in der Leber. Die Ausscheidung erfolgt über den Stuhl. Virus-Übertragungen können durch direkten Kontakt zu Infizierten oder über kontaminiertes Wasser und kontaminierte Lebensmittel erfolgen (Bosch und Pinto, 2013). Vor allem Muscheln und tiefgefrorene Beeren können mit HAV kontaminiert sein.

Zur Virusstabilität von HAV gegenüber Umwelteinflüssen liegen mehrere Daten aus unterschiedlichen Studien vor. Weil sich aber HAV-Feldstämme nur schwer in Zellkulturen isolieren lassen, basieren diese Daten ausschließlich auf wenigen Zellkultur-adaptierten Stämmen, vor allem dem Stamm HM-175. Eine Interpretation der Daten im Hinblick auf die zirkulierenden HAV-Feldstämme ist deshalb oft schwierig. Basierend auf den Zellkultur-Studien

gehört HAV zu den stabilsten Viren, die bisher gegenüber verschiedenen physiko-chemischen Bedingungen getestet wurden. In Mineralwasser war infektiöses HAV bei Raumtemperatur noch nach 300 Tagen vorhanden (Biziagos et al., 1988). In einer wässrigen Lösung mit Protein-, Sucrose- und Glycerolzusatz war infektiöses HAV noch nach 10 h Hitzebehandlung bei 60 °C nachweisbar, allerdings mit einem Titer-Abfall von etwa fünf \log_{10} -Stufen (Murphy et al., 1993). HAV zeigt auch eine hohe Säurestabilität; infektiöses Virus war noch nach fünf Stunden bei pH 1 nachweisbar (Scholz et al., 1989).

3.1.1.3 Weitere enterale Viren

Verschiedene andere humanpathogene Virusarten können über den fäkal-oralen Weg sowie über kontaminiertes Wasser und kontaminierte Lebensmittel übertragen werden. Hierzu gehören das Hepatitis E-Virus sowie verschiedene Gastroenteritis-Erreger (Johne und Albert, 2013). Für diese Virusarten gibt es aber nur wenige Daten zur Bedeutung von fäkal kontaminierten pflanzlichen Lebensmitteln als deren Vehikel. Andere Übertragungswege werden als bedeutsamer angesehen.

Das **Hepatitis E-Virus (HEV)** ist ein unbehülltes Einzelstrang-RNA-Virus, das in die Familie *Hepeviridae* eingeordnet wird. Die wichtigsten humanpathogenen Virusstämme werden in die Genotypen 1 – 4 eingeteilt. Während die Genotypen 1 und 2 ausschließlich den Menschen infizieren, sind die Genotypen 3 und 4 zoonotisch und haben ein Tierreservoir in Haus- und Wildschweinen. Die Genotypen 1 und 2 kommen vor allem in Entwicklungsländern Asiens und Afrikas vor, wo sie hauptsächlich durch kontaminiertes Trinkwasser übertragen werden. Dem gegenüber werden die Genotypen 3 und 4 vorwiegend in industrialisierten Ländern vorgefunden, wobei sie hauptsächlich über Lebensmittel, die aus infizierten Tieren hergestellt wurden, übertragen werden (Johne und Albert, 2013). In Deutschland kommt vor allem der Genotyp 3 vor. Alternative Übertragungswege dieses Genotyps, beispielsweise über fäkal (durch Mensch oder Schwein) kontaminierte Lebensmittel, werden vermutet (Treas et al., 2021). Über die Stabilität von HEV ist bisher wenig bekannt, weil breit verfügbare effiziente Zellkultursysteme zur Infektiositätsmessung fehlen. Auf der Basis eines Zellkultur-adaptierten HEV Genotyp 3-Stammes wurde eine hohe Stabilität gegenüber pH 2-9 nachgewiesen, während das Virus bei pH 1 und 10 inaktiviert wurde (Wolff et al., 2020a). In Lösungen mit bis zu 20 % Kochsalz mit und ohne Zusatz von Natriumnitrat oder Natriumnitrit war das Virus ähnlich stabil wie ohne Zusatz dieser Salze (Wolff et al., 2020b). Bei Langzeitversuchen in Phosphat-gepufferter Kochsalzlösung war infektiöses Virus bei 22 °C noch nach 30 Tagen (Virustiter-Abnahme: 3,5 \log_{10} -Stufen) und bei 4 °C noch nach 60 Tagen (Virustiter-Abnahme: 3 \log_{10} -Stufen) nachweisbar (Johne et al., 2016).

Das **Rotavirus** ist ein unbehülltes RNA-Virus, das in die Familie *Reoviridae* eingeordnet wird und das vor allem bei Kleinkindern zu Gastroenteritis führen kann. Am wichtigsten für Infektionen des Menschen ist die Spezies *Rotavirus A*, die aber auch bei Tieren vorkommt. Es existieren typische humanpathogene Genotypen, die von Mensch zu Mensch übertragen werden, aber zoonotische Übertragungen von Tieren auf den Menschen können ebenfalls vorkommen. Rotaviren werden vor allem durch direkten Kontakt zwischen Kindern oder über kontaminierte Oberflächen übertragen, in Einzelfällen ist aber auch eine Übertragung über kontaminierte Lebensmittel nachgewiesen worden (Johne und Albert, 2013). Die Infektiosität von Rotavirus war nach 15-tägiger Inkubation in Grund- und Oberflächenwasser bei Raumtemperatur unverändert; in Grundwasser war infektiöses Rotavirus noch nach mehreren Monaten nachweisbar und die Infektiosität sank bei Zusatz von 2 mg/l freiem Chlor nach 120 min nur etwa 10-fach (Espinosa et al., 2008). Infektiöses Rotavirus war in Wasser noch nach einer Erhitzung bei 50 °C für 15 min nachweisbar, wurde aber unter denselben Bedingungen bei 55 °C vollständig inaktiviert (Ward et al., 1980).

Das **Sapovirus** ist ein Gastroenteritis-Erreger, der wie das NoV in die Familie *Caliciviridae*,

hier aber in den Genus *Sapovirus* eingeordnet wird. Das unbehüllte RNA-Virus wird vor allem von Mensch zu Mensch über direkten Kontakt oder kontaminierte Lebensmittel übertragen (Johne und Albert, 2013). Daten zur Stabilität von humanen Sapovirus-Stämmen sind wegen fehlender Zellkultursysteme nicht vorhanden. Die Aussagekraft von Daten aus Studien, die mit porzinem Sapovirus als Surrogatvirus durchgeführt wurden, für das Verhalten von humanem Sapovirus ist unklar.

Das **Astrovirus** ist ein unbehülltes RNA-Virus, das in die Familie *Astroviridae* eingeordnet wird. Der Gastroenteritis-Erreger wird durch direkten Kontakt von Mensch zu Mensch übertragen. Wahrscheinlich gibt es auch indirekte Übertragungen über kontaminierte Oberflächen und kontaminiertes Wasser sowie Lebensmittel, wenngleich konkrete Nachweise hierfür noch fehlen (Johne und Albert, 2013). Vermutlich aufgrund der vergleichsweise milden hervorgerufenen Symptome gibt es nur wenige Untersuchungen zur Stabilität von humanen Astroviren.

Das **Adenovirus** wird in die Familie *Adenoviridae* eingeordnet. Es ist ein unbehülltes DNA-Virus. Humane Adenoviren werden in zahlreiche Typen eingeteilt, die respiratorische Erkrankungen, Augeninfektionen oder Gastroenteritis hervorrufen. Gastroenteritis-Erreger sind vor allem die Adenovirus-Typen 40 und 41, aber auch andere Typen können zu gastroenteralen Symptomen führen (Johne und Albert, 2013). Adenoviren werden von Mensch zu Mensch über direkten Kontakt sowie über kontaminiertes Wasser, wahrscheinlich auch über kontaminierte Lebensmittel übertragen. Im Gegensatz zu den anderen vorgenannten Virusarten lassen sich verschiedene humane Adenovirus-Typen gut aus Stuhl- und Wasserproben mittels Zellkultur isolieren. Bei Untersuchungen in Abwasser zeigte sich kaum ein Einfluss auf die Infektiosität von Adenovirus nach 24-stündiger Inkubation bei 7 °C oder 20 °C, während bei 37 °C ein Abfall von über fünf \log_{10} -Stufen festzustellen war (Carratala et al., 2013). Eine andere Studie zeigte, dass Adenoviren in tieferen Schichten in Klärschlamm in den Wintermonaten für sehr lange Zeit ($T_{90} = 156$ d) infektiös bleiben können (Schwarz et al., 2019).

3.1.2 Gefahrencharakterisierung

3.1.2.1 Norovirus-Gastroenteritis

Durch **NoV** wird beim Menschen üblicherweise eine Gastroenteritis ausgelöst, die zunächst durch Unwohlsein und anschließend durch starkes Erbrechen und/oder Diarrhö gekennzeichnet ist. Alle Altersgruppen sind betroffen. Die Erkrankungssymptome dauern meistens zwischen 12 und 60 Stunden an, bevor es zu einer klinischen Besserung und Genesung kommt (van Beek und Koopmans, 2013). In Deutschland wurden dem Robert Koch-Institut (RKI) im Jahr 2019 insgesamt 78.706 Fälle und im Jahr 2020 insgesamt 28.532 Fälle von NoV-Gastroenteritis gemeldet (RKI 2021a). Es wird angenommen, dass dieser Rückgang auf die Hygieneregeln zur Eindämmung der COVID-19-Pandemie zurückzuführen ist. Gegen NoV-Infektionen gibt es bisher keine Impfstoffe.

Nach Infektion von Freiwilligen wurde humanes NoV im Durchschnitt in Konzentrationen bis zu 95×10^9 Genomkopien/g Stuhl ausgeschieden, einige der Freiwilligen zeigten maximale Ausscheidungsmengen zwischen 10^{11} und 10^{12} Genomkopien/g Stuhl (Atmar et al., 2008). Das humane NoV hat eine sehr hohe Infektiosität: Durch Ausbruchsuntersuchungen wurde eine minimale Infektionsdosis von 10 – 100 Viruspartikeln ermittelt (Todd et al., 2008); eine Auswertung von Studien an Freiwilligen ermittelte eine Infektionswahrscheinlichkeit von 50 % bei einer Aufnahme von einem NoV-Partikel, wenngleich die Auslösung einer Erkrankung erst bei höheren Virusdosen erfolgte (Teunis et al., 2008).

In der Vergangenheit wurden zahlreiche NoV-Gastroenteritis-Ausbrüche im Zusammenhang

mit dem Verzehr von pflanzlichen Lebensmitteln beschrieben. Der größte bisher in Deutschland beschriebene lebensmittelbedingte Erkrankungsausbruch mit fast 11.000 Erkrankten ereignete sich im Jahr 2012 (Mäde et al., 2013; Bernard et al., 2014). Er wurde durch NoV-kontaminierte Tiefkühl-Erdbeeren, die aus China importiert worden waren, ausgelöst. Fäkale Kontaminationen der Beeren während des Anbaus oder der Ernte wurden als Ursache vermutet (Mäde et al., 2013). Eine spätere Analyse zeigte, dass auf den gefrorenen Erdbeeren nur sehr geringe Virusmengen (durchschnittlich nur etwa 200 NoV-Genomkopien/25g) nachweisbar waren, die aber offensichtlich ausreichten, um den großen Ausbruch auszulösen (Bartsch et al., 2018). Ein systematischer Review von 152 viral bedingten weltweit aufgetretenen Erkrankungsausbrüchen nach dem Verzehr von frischen pflanzlichen Produkten ermittelte mit 48,7 % NoV als verursachenden Krankheitserreger (Agens) und gefrorene Himbeeren (23,7 %) als das häufigste Übertragungsvehikel (Chatziprodromidou et al., 2018). Eine andere retrospektive Analyse von 606 Erkrankungsausbrüchen in den USA, die durch den Verzehr von Blattgemüse ausgelöst wurden, ermittelte bei 55 % der bestätigten Ausbrüche NoV als Ursache (Herman et al., 2015).

3.1.2.2 Hepatitis A

Infektionen mit **HAV** können zu akuten Leberentzündungen führen. Die Erkrankungssymptome sind zunächst grippeartige und/oder gastrointestinale Symptome, die von Hautjucken, Oberbauchschmerzen, Gelbsucht und/oder Erhöhung der Leberenzymwerte im Blut gekennzeichnet sind (RKI, 2021b). Schwere Erkrankungsverläufe traten bei älteren Menschen und Patienten mit Lebervorschädigung auf. Die weltweite Fall-/ Sterberate wird mit 0,5 % angegeben (WHO, 2021). Die Genesungsphase dauert gewöhnlich zwischen zwei und vier Wochen (RKI, 2021b). In Deutschland wurden dem RKI in 2019 insgesamt 873 Hepatitis A-Fälle und im Jahr 2020 insgesamt 561 Hepatitis A-Fälle gemeldet (RKI, 2021a). Gegen Hepatitis A sind wirksame Impfstoffe verfügbar, die von der Ständigen Impfkommission (STIKO) vor allem bei Reisen in Regionen mit hoher Hepatitis A-Prävalenz empfohlen werden.

Die Ausscheidung von HAV durch die Patienten erfolgt für mehrere Wochen mit dem Stuhl. In einer Studie an 27 Patienten in den Niederlanden wurde eine mittlere Ausscheidungszeit von 81 Tagen und Konzentrationen von 2×10^6 bis 2×10^8 Genomkopien/g Stuhl am Tag 36 nach Infektion gemessen (Tjon et al., 2006). Die geschätzte minimale Infektionsdosis wird mit 10-100 Partikeln angegeben (Todd et al., 2008).

Hepatitis A-Ausbrüche im Zusammenhang mit dem Verzehr pflanzlicher Lebensmittel wurden in der Vergangenheit häufig beschrieben. Zwischen Januar 2013 und August 2014 ereignete sich ein Hepatitis A-Ausbruch in 13 EU-Ländern (inklusive Deutschland), mit 1.589 Patienten, von denen 1.102 hospitalisiert wurden (Severi et al., 2015). Der Verzehr von Speisen, die mit einem gefrorenen Beeren-Mix hergestellt worden waren, wurde als Ursache identifiziert. Weitere Hepatitis A-Ausbrüche wurden beispielsweise durch HAV-kontaminierte getrocknete Tomaten mit 59 Erkrankten in Frankreich (Gallot et al., 2011) oder durch HAV-kontaminierte Frühjahrszwiebeln mit 601 Erkrankten in den USA (Wheeler et al., 2005) beschrieben. Ein systematischer Review von 152 viral bedingten, weltweit aufgetretenen Erkrankungsausbrüchen nach dem Verzehr von frischen pflanzlichen Produkten ermittelte in 46,1 % der Ausbrüche HAV als ursächliches Agens (Chatziprodromidou et al., 2018).

3.1.2.3 Erkrankungen durch weitere enterale Viren

Die Infektion mit **HEV** kann zu einer akuten Hepatitis führen, die ähnliche Erkrankungssymptome aufweist wie für die Hepatitis A beschrieben. Darüber hinaus können bei immunsupprimierten Transplantationspatienten chronische HEV-Infektionen auftreten, die zu fataler Leberzirrhose führen. Die weltweite Fall-/ Sterberate bei jungen Erwachsenen wird mit 3 % angegeben (Pallerla et al., 2020). In Deutschland wurden dem RKI 3.728 Fälle in 2019 und

3.253 Fälle in 2020 gemeldet (RKI, 2021a). In Europa sind keine zugelassenen Impfstoffe gegen Hepatitis E verfügbar. HEV kann von chronisch infizierten Patienten in Konzentrationen bis zu 1×10^{12} Genomkopien/g Stuhl ausgeschieden werden (Wang et al., 2018); die infektiöse Dosis ist unbekannt. Zu Erkrankungsausbrüchen über pflanzliche Lebensmittel sind keine Daten verfügbar. Eine Fall-Kontrollstudie identifizierte rohes Gemüse (neben anderen Faktoren) als ein Risikofaktor für die Ausbildung einer akuten Hepatitis E in Deutschland (Faber et al., 2018).

Rotavirus-Infektionen führen vor allem bei Kleinkindern zu schweren Gastroenteritiden, die ohne Behandlung lebensbedrohlich sein können. Bei ausreichender oraler oder parenteraler Flüssigkeitszufuhr sind die Infektionen aber selbstlimitierend und führen gewöhnlich nach einigen Tagen zur Genesung (Johne und Albert, 2013). Dem RKI wurden 36.871 Fälle im Jahr 2019 und 6.478 Fälle im Jahr 2020 gemeldet (RKI, 2021a). Gegen Rotaviren sind effiziente Impfstoffe verfügbar, die von der STIKO für Kleinkinder generell empfohlen werden. Berichte über Erkrankungsausbrüche durch den Verzehr pflanzlicher Lebensmittel sind selten; bei einem Gastroenteritis-Ausbruch auf einem Schiff, in dem neben anderen Viren auch Rotavirus als ursächliches (ätiologisches) Agens nachgewiesen wurde, konnte Salat als Ausbruchshikel identifiziert werden (Gallimore, 2005).

Infektionen mit **Sapovirus** können beim Menschen zu einer Gastroenteritis führen (Johne und Albert, 2013). Über die Erkrankungszahlen in Deutschland gibt es derzeit kaum Daten und Impfstoffe gegen Sapoviren sind momentan nicht verfügbar. Berichte über Erkrankungsausbrüche durch pflanzliche Lebensmittel sind nicht bekannt, aber es wurden verschiedene Erkrankungsausbrüche in Verbindung mit dem Verzehr anderer Lebensmittel (z. B. Muscheln) beschrieben (Oka et al., 2015).

Das **Astrovirus** ist ein enteraler Erreger, der beim Menschen vor allem zu Gastroenteritis führen kann (Johne und Albert, 2013). Die Erkrankungszahlen in Deutschland sind nicht bekannt und Impfstoffe gegen Astroviren gibt es derzeit nicht. Weil an Durchfall erkrankte Menschen selten auf Astrovirus untersucht werden, sind nur wenige durch dieses Virus ausgelöste Erkrankungsausbrüche beschrieben, wobei die genauen Ansteckungsquellen meistens nicht identifiziert wurden (Mattison, 2021).

Verschiedene humane **Adenovirus**-Typen können unterschiedliche Erkrankungen beim Menschen auslösen. Darunter sind einige Typen, die fäkal ausgeschieden und oral aufgenommen werden und die zu Gastroenteritis führen können (Johne und Albert, 2013). Genaue Erkrankungszahlen sind für Deutschland derzeit nicht verfügbar und Impfstoffe existieren momentan nicht. Auch wenn Adenoviren regelmäßig bei einem Teil der untersuchten Gastroenteritis-Patienten nachgewiesen werden, gibt es nur wenige Informationen zu Erkrankungsausbrüchen und deren ursächlichen Übertragungsvehikeln (Mattison, 2021).

3.1.3 Expositionsschätzung und -bewertung

In den folgenden Abschnitten zur Exposition liegt der Fokus auf humanem NoV und HAV, da diese Viren eine sehr hohe Relevanz für die Lebensmittelsicherheit haben.

3.1.3.1 Konzentration im Abwasser und Reduktion durch Abwasserbehandlung

Daten zur Konzentration im Abwasser und Reduktion durch eine Abwasserbehandlung wurden dem BfR vom Umweltbundesamt (UBA) in Form von drei Publikationen zur Verfügung gestellt. Demnach befinden sich durchschnittlich 10^5 - 10^8 NoV-Genomkopien/l und 10^2 - 10^4 HAV-Genomkopien/l im unbehandelten Abwasser (Cornel et al., 2018; Selinka et al. 2020). Bei der konventionellen biologischen Abwasserbehandlung wird von einer Reduktion der Viruskonzentration um 80 - 99.9 % ausgegangen (Seis et al., 2016; Selinka et al. 2020). Im

„worst case“-Szenario (80 % Reduktion) würde die Konzentration nach der konventionellen Abwasserbehandlung dementsprechend 2×10^7 NoV-Genomkopien/l und 2×10^3 HAV-Genomkopien/l entsprechen. Über die Mengen von infektiösem humanen NoV und HAV sind in den Studien keine Daten enthalten. Weitere Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen, die über die konventionelle Abwasserbehandlung hinausgehen, können die Virusmenge zusätzlich senken.

Die WHO „Guidance on Potable Reuse“ empfiehlt für eine sichere Aufbereitung von Abwasser für die Nutzung als Trinkwasser als Standardleistungsziel (Default Performance Target) eine Reduktion von 9,5 \log_{10} -Stufen enterischer Viren (NoV) (WHO, 2017). Auch wenn dieser Wert keinen direkten Richtwert für konkrete Validierungsuntersuchungen von Abwasseraufbereitungsanlagen darstellt, weist er doch darauf hin, dass eine Kombination mehrerer Abwasseraufbereitungsprozesse nötig ist, um die Konzentration von humanpathogenen enterischen Viren im aufbereitetem Abwasser auf einen Wert zu senken, bei dem gesundheitliche Beeinträchtigungen nicht zu erwarten sind.

3.1.3.2 Stabilität von Viren im Boden

Durch Bewässerung mit unzureichend aufbereitetem Abwasser können humanpathogene Viren auf und in den Erdboden gelangen. Im Allgemeinen hängt die Stabilität von Viren im Boden von mehreren Faktoren wie z. B. der Beschaffenheit der Erde, der Temperatur und der Feuchtigkeit ab und variiert zwischen verschiedenen Typen von Viren (Rao et al., 1986; Rezutka und Cook, 2004; Sanchez und Bosch, 2014). Dem BfR liegen derzeit keine Daten zur Stabilität von humanem NoV im Erdboden vor. Für murines NoV, ein Surrogatvirus für humanes NoV, wurde eine Verringerung der Infektiosität um eine \log_{10} -Stufe nach zwölf Tagen in Erde festgestellt (Fallahi und Mattison, 2011).

Für HAV wurde gezeigt, dass dieses für mehrere Wochen bis Monate in Erde infektiös bleiben kann (Cook et al, 2018). In einer Studie, in der eine Suspension aus Erde und Grund- oder Abwasser experimentell kontaminiert wurde, konnte nach 12 Wochen bei 25 °C eine Reduktion von 1-2 \log_{10} -Stufen und bei 5 °C von weniger als einer \log_{10} -Stufe ermittelt werden (Sobsey et al., 1986). In einer ähnlichen Studie wurde nach 20 Tagen bei 10 °C und 23 °C keine signifikante Reduktion der Infektiosität von HAV beobachtet (Blanc und Nasser, 1996).

3.1.3.3 Stabilität von Viren auf pflanzlichen Lebensmitteln

Durch Bewässerung mit unzureichend aufbereitetem Abwasser können humanpathogene Viren auf pflanzliche Lebensmittel gelangen. Dem BfR liegen derzeit keine Daten zur Stabilität von humanem NoV auf pflanzlichen Lebensmitteln vor. Für verschiedene Surrogatviren wurde gezeigt, dass diese für mehrere Tage bis Wochen auf unterschiedlichen pflanzlichen Lebensmitteln wie z. B. Spinat, Blattsalat und Erdbeeren infektiös bleiben können (Mattison et al., 2007; Hirneisen und Kniel, 2013; Esseili et al., 2015). Butot et al. (2008) haben weiterhin gezeigt, dass feline Caliciviren, die als Surrogatvirus für humanes NoV verwendet wurden, ihre Infektiosität auf gefrorenen Beeren und Kräutern monatelang beibehalten können.

Die Stabilität von HAV wurde auf verschiedenen experimentell kontaminierten pflanzlichen Lebensmitteln untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die Stabilität von HAV von verschiedenen Faktoren wie z. B. der Pflanzenart und der Temperatur abhängt. Insgesamt weisen mehrere Studien darauf hin, dass HAV auf pflanzlichen Lebensmitteln relativ stabil ist und für längere Zeiträume auf pflanzlichen Lebensmitteln infektiös bleiben kann.

Stine et al. (2005) haben z. B. die Stabilität von HAV auf Cantaloup-Melonen, Blattsalat und Paprika in einer Klimakammer untersucht, in der verschiedene Wachstumsbedingungen simuliert wurden. Über einen Zeitraum von 14 Tagen wurde unter allen Wachstumsbedingungen nur eine geringe Reduktion der Infektiosität um 0,01-0,29 log₁₀-Stufen pro Tag festgestellt. In einer weiteren Studie wurde auf Paprika in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit nach 14 Tagen eine Reduktion der Infektiosität von 1-5 log₁₀-Stufen gemessen (Lee et al., 2015). Dabei war das Virus bei niedrigeren Temperaturen und höherer Luftfeuchtigkeit stabiler. Bei 25 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit betrug die Reduktion nach 14 Tagen zwei log₁₀-Stufen. Die Stabilität von HAV auf Frühlingszwiebeln wurde auch bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht (Sun et al., 2012). Eine Reduktion von einer log₁₀-Stufe wurde bei 23,4 °C nach mehr als fünf Tagen erreicht, während es bei 3,1 °C mehr als drei Wochen waren. Auf Spinat wurde eine Reduktion von einer log₁₀-Stufe nach vier Wochen bei 5,4 °C beobachtet (Shieh et al., 2009). Auf Blattsalat haben Croci et al. (2002) nach neun Tagen bei 4 °C eine Reduktion von zwei log₁₀-Stufen festgestellt, während sich bei identischer Temperatur auf Möhren nach vier Tagen und auf Fenchel nach sieben Tagen kein infektiöses Virus nachweisen ließ. Im Gegensatz dazu wurde auf Blaubeeren keine signifikante Reduktion der Infektiosität nach siebentägiger Inkubation bei 4 °C oder 21 °C beobachtet (Leblanc et al., 2019). Die Infektiosität von HAV wurde auch auf Luzernesamen untersucht (Wang et al., 2013). Nach 20 Tagen konnte keine signifikante Reduktion beobachtet werden. Innerhalb von 50 Tagen war eine Reduktion von zwei log₁₀-Stufen ersichtlich. Bidawid et al. (2001) haben die Stabilität von HAV auf abgepacktem Blattsalat untersucht. Dazu wurden Salatblätter kontaminiert und unter Schutzatmosphäre verpackt. Nach 12 Tagen bei 4 °C war die Reduktion geringer als eine log₁₀-Stufe, unabhängig von der Art der Verpackung. Eine stärkere Reduktion und größere Unterschiede zwischen verschiedenen Verpackungsarten wurden bei Raumtemperatur festgestellt. Die Infektiosität von HAV wurde auch auf verschiedenen Beeren und Kräutern untersucht, die nach Kontamination eingefroren wurden (Butot et al., 2008). Die Experimente zeigten, dass weder das Einfrieren noch die Lagerung für drei Monate bei -20 °C zu einer signifikanten Reduktion führten.

3.1.3.4 Aufnahme von Viren über die Wurzeln in Pflanzen

Urbanucci et al. (2009) konnten weder in hydroponisch noch in Erde wachsendem Blattsalat humane NoV-RNA detektieren, wenn die Pflanzen mit experimentell kontaminiertem Wasser bewässert wurden. Neuere Studien weisen allerdings darauf hin, dass humanes NoV von Pflanzen über die Wurzeln aufgenommen werden könnte. So wurden sowohl humane NoV-RNA als auch Proteine in den Blättern von Blattsalat und Spinat nachgewiesen, nachdem Virus direkt auf die Wurzeln übertragen (inokuliert) wurde (Esseili et al., 2018). Auch in hydroponisch gezüchteten Frühlingszwiebeln und Romanasalat konnte humane NoV-RNA nach Bewässerung mit experimentell kontaminiertem Wasser detektiert werden (Dicaprio et al., 2012; Yang et al., 2018). Dem BfR liegen allerdings derzeit keine Daten zur Infektiosität von über Wurzeln aufgenommenem humanem NoV vor. Für verschiedene Surrogatviren wurde infektiöses Virus nach Aufnahme über Wurzeln in Blattsalat, Romanasalat, Spinat, Frühlingszwiebeln, Grünkohl, Senf und Erdbeeren nachgewiesen (Yang et al., 2018; Esseili et al., 2018; Dicaprio et al., 2012; Wang und Kniel, 2015; Wei et al., 2011; Hirneisen und Kniel, 2013). Die Aufnahme von infektiösem Virus hing dabei von verschiedenen Faktoren wie z. B. der Anzucht der Pflanzen in hydroponischen Systemen oder in Erde, der Menge des eingebrachten Virusmaterials und der Pflanzenart ab.

Generell scheint die Anzucht in hydroponischen Systemen und das Vorhandensein hoher viraler Erregermengen (Titer) die Aufnahme von infektiösen Viren zu begünstigen. Berechnungen mit Hilfe eines Modells, das auf der Basis verschiedener publizierter Daten die Aufnahme von humanem NoV über die Wurzeln der Pflanze beschreibt, zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Virusaufnahme in Salat, der in hydroponischer Kultur wächst, höher ist als in Salat, der in Erde wächst (Chandrasekaran und Jiang, 2018). Jedoch zeigt das Modell

auch, dass in beiden Fällen gesundheitliche Beeinträchtigungen des Menschen durch aufgenommene Viren möglich sind (Chandrasekaran und Jiang, 2018). Auch Unterschiede zwischen verschiedenen Surrogatviren wurden festgestellt. So wurden z. B. vergleichbare Mengen an viraler RNA in Pflanzenblättern für porcines Sapovirus und Tulane-Virus detektiert, allerdings konnte nur infektiöses Tulane-Virus in den Blättern nachgewiesen werden (Esseili et al., 2018).

Für HAV wurde virale RNA in Spinat und Frühlingszwiebeln nachgewiesen, wenn diese in hydroponischen Systemen mit experimentell inokuliertem Wasser angezchtet wurden (Hirneisen und Kniel, 2013). Weiterhin wurde HAV-RNA in Zwiebeln nachgewiesen, nachdem diese in experimentell kontaminierter Erde oder hydroponischen Systemen gewachsen waren (Chancellor et al., 2006). Allerdings liegen dem BfR derzeit keine Daten zur Infektiosität von über Wurzeln aufgenommenem HAV vor.

3.1.3.5 Vorkommen von Viren in pflanzlichen Lebensmitteln – Beispiele

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass RNA von Viren, die für die Lebensmittelsicherheit relevant sind, in pflanzlichen Lebensmitteln detektiert werden kann. In einer Studie, in der in drei europäischen Ländern verkaufter Blattsalat untersucht wurde, konnten in 1,32 % (4/304) der Proben HAV, in 2 % (6/299) der Proben humanes NoV der Genogruppe I und in 2,95 % (8/271) der Proben humanes NoV der Genogruppe II nachgewiesen werden (Kokkinos et al., 2012). In einer britischen Studie waren 5,3 % (30/568) der getesteten Salatproben, 2,3 % (7/310) frischer Himbeerproben und 3,6 % (10/274) gefrorener Himbeerproben positiv für NoV (Cook et al., 2019), während in einer französischen Studie 15,5 % (31/200) gefrorener Beerenproben und 11,9 % (25/210) frischer Salatproben positiv für humanes NoV waren (Loutreul et al., 2014). In einer italienischen Studie wurde HAV in 1,9 % (18/911) der Proben von essfertigem Gemüse detektiert (Terio et al., 2017). Einige Studien aus nicht-europäischen Ländern haben auch höhere Prävalenzen für HAV in pflanzlichen Lebensmitteln ermittelt (Randazo und Sanchez, 2020). Allerdings enthalten die genannten Studien keine Informationen über die Infektiosität der detektierten Viren.

3.1.4 Risikocharakterisierung

3.1.4.1 Möglichkeiten und Grenzen der Risikocharakterisierung

Eine abschließende Risikocharakterisierung zur Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung von Pflanzen im Hinblick auf humanpathogene Viren ist derzeit nicht möglich. Vor allem fehlen hierzu weitgehend Daten zur Reduktion der Infektiosität der interessierenden humanpathogenen Viren durch die Abwasseraufbereitung, zur Stabilität dieser Viren im Boden und auf der Pflanze sowie zur Aufnahme dieser Viren durch über Wurzeln in die Pflanze und die Virusinfektiosität nach einer solchen Aufnahme (s. Kapitel 3.1.3.). Für das humane NoV sind solche Daten aufgrund des Fehlens geeigneter Labormethoden zum Nachweis der Infektiosität meistens nicht vorhanden; für das HAV beruhen die vorliegenden Daten fast ausschließlich auf einem einzigen Zellkultur-adaptierten Stamm (s. Kapitel 3.1.1). Die verfügbaren Daten für Surrogatviren lassen sich oft nicht direkt zur Beschreibung des Verhaltens der humanen Viren nutzen (Richards, 2012 und s. Kapitel 3.1.1.1). Da auch in einer Einschätzung der Weltgesundheitsorganisation zur Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung von Pflanzen (WHO, 2006) für die Risikobewertung vorwiegend Daten von Surrogatviren (Enteroviren, Rotaviren und Bakteriophagen) verwendet wurden, können die darin gezogenen Schlussfolgerungen nur unzureichend auf die in diesem Zusammenhang wichtigsten humanpathogenen Viren (humanes Norovirus und Hepatitis A-Virus) übertragen werden. Darüber hinaus eignen sich verfügbare RNA-basierte Daten der humanen Viren nicht, um die entsprechende Infektiosität abzuschätzen, die in den meisten Fällen für eine Bewertung nötig wäre.

Bei Betrachtung der wenigen verfügbaren Daten für die humanpathogenen Viren sowie der verfügbaren Daten der untersuchten Surrogatviren lässt sich allerdings feststellen, dass die Viren in den meisten Fällen eine sehr hohe Stabilität gegenüber verschiedenen physiko-chemischen Parametern (s. Kapitel 3.1.1), im Boden und auf der Pflanze (s. Kapitel 3.1.3.2 und 3.1.3.3) zeigen. Eine Aufnahme in die Pflanze über die Wurzeln wurde in den meisten Studien, zumindest auf der Basis des viralen RNA-Nachweises, gezeigt (s. Kapitel 3.1.3.4). RNA der interessierenden Viren wurde in mehreren Studien auf pflanzlichen Lebensmitteln nachgewiesen (s. Kapitel 3.1.3.5), und eine Vielzahl von viralen Erkrankungsausbrüchen nach dem Verzehr von pflanzlichen Lebensmitteln ist dokumentiert (s. Kapitel 3.1.2). Zusammengefasst zeigen diese Untersuchungsergebnisse, dass eine Übertragung von humanpathogenen Viren auf den Menschen über die Bewässerung von Pflanzen mit kontaminiertem aufbereitetem Abwasser und deren nachfolgenden Verzehr möglich und in hohem Grade plausibel ist. Die ausgelösten Erkrankungen haben eine hohe Relevanz für die Gesundheit der Bevölkerung (s. Kapitel 3.1.2). Eine genaue Abschätzung der Übertragungsrisiken ist – wie schon im ersten Abschnitt dieses Kapitels erläutert – nicht möglich. Die meisten interessierenden Viren (v.a. humanes NoV und HAV) weisen jedoch eine sehr niedrige minimale Infektionsdosis auf (s. Kapitel 3.1.2), wodurch bereits geringe Virusmengen nach Aufnahme zu Erkrankungen führen können. Dem gegenüber werden hohe Virusmengen mit dem Stuhl ausgeschieden, was die Möglichkeit einer hohen Belastung des Abwassers nahelegt (s. Kapitel 3.1.2 und 3.1.3.1). Auf der Grundlage der vorliegenden Daten wird der weiteren Risikocharakterisierung bei verschiedenen Bewässerungssystemen ein „worst case“-Szenario zugrunde gelegt, in dem angenommen wird, dass die Virusinfektiosität durch die Abwasseraufbereitung nicht ausreichend gesenkt wird und dass die Viren im Boden und auf bzw. in der Pflanze nicht ausreichend inaktiviert werden (d. h., sie können noch Erkrankungen beim Menschen auslösen).

3.1.4.2 Risikocharakterisierung im Rahmen eines „worst-case-Szenarios“

3.1.4.2.1 Unterirdische Tropfbewässerung

Es ist möglich, dass mit dem aufbereiteten Abwasser infektiöse humanpathogene Viren, wie z. B. NoV und HAV, sowohl in den Boden selbst als auch auf im Boden wachsende Pflanzenteile gelangen und dort über längere Zeiträume stabil bleiben. Eine direkte Kontamination der oberirdisch wachsenden Pflanzenteile mit im aufbereiteten Abwasser vorhandenen Viren erscheint sehr unwahrscheinlich. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass infektiöse humanpathogene Viren durch die Aufnahme über Wurzeln in oberirdisch wachsende Pflanzenteile gelangen.

In diesem Szenario ist die Wahrscheinlichkeit der Kontamination von im Boden wachsenden Pflanzenteilen, die zum Verzehr vorgesehen sind, als hoch einzuschätzen. Die Wahrscheinlichkeit der Kontamination von oberirdisch wachsenden Pflanzenteilen, die zum Verzehr vorgesehen sind, wird als sehr gering eingeschätzt, wenngleich solche Kontaminationen nicht vollständig ausgeschlossen werden können.

3.1.4.2.2 Oberirdische Tropfbewässerung

Es ist möglich, dass mit dem aufbereiteten Abwasser infektiöse humanpathogene Viren, wie z. B. NoV und HAV, sowohl in den Boden selbst als auch auf im Boden wachsende Pflanzenteile gelangen und dort über längere Zeiträume stabil bleiben. Eine Kontamination oberirdisch wachsender Pflanzenteile erscheint möglich, wenn bodennahe Pflanzenteile direkt mit

aufbereitetem Abwasser in Kontakt kommen oder Erdpartikel zusammen mit Viren auf die Pflanze gelangen. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass infektiöse humanpathogene Viren durch die Aufnahme über Wurzeln in oberirdisch wachsende Pflanzenteile gelangen.

In diesem Szenario ist die Wahrscheinlichkeit der Kontamination von im Boden wachsenden Pflanzenteilen, die zum Verzehr vorgesehen sind, als hoch einzuschätzen. Die Wahrscheinlichkeit der Kontamination von oberirdisch wachsenden Pflanzenteilen, die zum Verzehr vorgesehen sind, wird als gering bis mäßig eingeschätzt.

3.1.4.2.3 Wasserführende Gräben

Es ist möglich, dass mit dem aufbereiteten Abwasser infektiöse humanpathogene Viren, wie z. B. NoV und HAV, sowohl in den Boden selbst als auch auf im Boden wachsende Pflanzenteile gelangen und dort über längere Zeiträume stabil bleiben. Von einer Kontamination der im Boden wachsenden Pflanzenteile ist auszugehen. Eine Kontamination oberirdisch wachsender bodennaher Pflanzenteile mit Viren erscheint möglich, wenn es zum direkten Kontakt von Pflanzenteilen mit dem aufbereiteten Abwasser kommt, z. B. durch Wasserspritzer aus den Wassergräben oder bei überlaufenden Wassergräben. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass infektiöse humanpathogene Viren durch die Aufnahme über Wurzeln in oberirdisch wachsende Pflanzenteile gelangen.

In diesem Szenario ist die Wahrscheinlichkeit der Kontamination von im Boden wachsenden Pflanzenteilen, die zum Verzehr vorgesehen sind, als hoch einzuschätzen. Die Wahrscheinlichkeit der Kontamination von oberirdisch wachsenden Pflanzenteilen, die zum Verzehr vorgesehen sind, wird als mäßig bis hoch eingeschätzt.

3.1.4.2.4 Beregnungssystem

Es ist möglich, dass mit dem aufbereiteten Abwasser infektiöse humanpathogene Viren, wie z. B. NoV und HAV, sowohl in den Boden als auch direkt auf oberirdische Pflanzenteile gelangen und dort über längere Zeiträume stabil bleiben. Dementsprechend ist von einer Kontamination der im Boden wachsenden und oberirdisch wachsenden Pflanzenteile auszugehen.

In diesem Szenario ist die Wahrscheinlichkeit der Kontamination von im Boden und oberirdisch wachsenden Pflanzenteilen, die zum Verzehr vorgesehen sind, als hoch einzuschätzen.

3.1.4.2.5 Hydroponische Kultur

Es ist möglich, dass sich in dem aufbereiteten Abwasser infektiöse humanpathogene Viren, wie z. B. NoV und HAV, befinden und über längere Zeiträume stabil bleiben. Von einer Kontamination der im Wasser wachsenden Pflanzenteile ist auszugehen. Eine Kontamination anderer Pflanzenteile erscheint möglich, wenn diese in Kontakt mit dem Bewässerungswasser kommen. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass infektiöse humanpathogene Viren durch die Aufnahme über Wurzeln in andere Pflanzenteile gelangen. Daten von Surrogatviren des humanen NoV deuten darauf hin, dass die Gefahr der Aufnahme von infektiösem Virus bei hydroponischer Kultur höher ist als bei anderen Bewässerungssystemen.

In diesem Szenario ist die Wahrscheinlichkeit der Kontamination von im Wasser wachsenden Pflanzenteilen, die zum Verzehr vorgesehen sind, als hoch einzuschätzen. Die Wahrscheinlichkeit der Kontamination von anderen Pflanzenteilen, die zum Verzehr vorgesehen

sind, wird als gering eingeschätzt, wenngleich solche Kontaminationen nicht ausgeschlossen werden können.

3.1.4.3 Bewertung der Qualität der Daten

Wie schon im ersten Abschnitt des Kapitels 3.1.4 ausführlicher dargelegt, ist die Qualität der derzeit verfügbaren Daten gering. Dies betrifft das weitgehende Fehlen von Daten zu Stabilität und Inaktivierung von humanem NoV sowie die fast ausschließliche Verwendung eines einzigen Zellkultur-adaptierten Stammes bei den verfügbaren Studien zur Stabilität und Inaktivierung von HAV. Die Vergleichbarkeit des Verhaltens von Surrogatviren, für die zahlreiche Daten vorhanden sind, mit der von humanen Viren ist fraglich (Richards, 2012). Diese Daten können deshalb nur bedingt für die Bewertung herangezogen werden. Genauso können RNA-basierte Daten sowie molekularbiologisch ermittelte Kapsidstabilitäts-Daten nur sehr begrenzt für Aussagen zur Infektiosität dieser Viren genutzt werden, welche aber für die Bewertung der Risiken ausschlaggebend ist.

3.1.4.4 Weiterer Forschungsbedarf

Um Daten zur weitergehenden Bewertung der gesundheitlichen Risiken durch humanpathogene Viren bei der Verwendung von aufbereitetem Abwasser zu generieren, wäre Forschung auf folgenden Feldern nötig:

- Entwicklung von Methoden zur Messung der Infektiosität von humanpathogenen enteralen Viren. Dies betrifft vor allem die Entwicklung von Zellkultur-basierten Verfahren zur Infektiositätsbestimmung von humanem NoV, die bisher nur sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen und wenig effizient sind. Auch für HAV müssten die Zellkultur-Verfahren verbessert werden, um eine größere Vielzahl von Stämmen untersuchen zu können.
- Generierung von Daten zur Stabilität und Inaktivierung von humanpathogenen enteralen Viren gegenüber physiko-chemischen Parametern, im Boden und auf der Pflanze. Hierzu ist die vorherige Entwicklung der Infektiositäts-Assays nötig. Alternativ können, soweit im Einzelfall zulässig und ethisch vertretbar, Tierversuche bzw. Studien mit Freiwilligen geprüft werden.
- Generierung von Daten zur Aufnahme und zur nachfolgenden Infektiosität von humanpathogenen enteralen Viren über die Wurzeln in die Pflanze. Es gelten dieselben Einschränkungen zu den Infektiositäts-Assays wie zuvor beschrieben.
- Generierung von Daten zur Inaktivierung von humanpathogenen enteralen Viren bei der Behandlung von Abwasser. Es gelten dieselben Einschränkungen zu den Infektiositäts-Assays wie zuvor beschrieben.
- Entwicklung von Methoden zur Abschätzung der Effizienz der Inaktivierung von humanpathogenen enteralen Viren durch verschiedene Abwasseraufbereitungs-Regimes. Hierzu könnte die Eignung von Surrogatviren, vergleichend mit humanen Viren, untersucht werden.
- Entwicklung von Methoden zur Abschätzung der Qualität des aufbereiteten Abwassers hinsichtlich der Abwesenheit von infektiösen humanpathogenen enteralen Viren. Hierzu müssten Nachweissysteme für die humanen Viren etabliert werden, die idealerweise zwischen infektiösem und inaktiviertem Virus unterscheiden können. Alternativ könnten entsprechende Nachweissysteme für Indikatorviren entwickelt werden, deren Eignung für Aussagen zu humanen Viren vorher gezeigt werden müsste.

3.2 Handlungsrahmen, Empfehlungen von Maßnahmen

3.2.1 Begrenzung der Nutzung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung

Aufgrund des Ergebnisses der Risikocharakterisierung (Kapitel 3.1.4) empfiehlt das BfR, auf die Verwendung von aufbereitetem Abwasser für die Bewässerung von Pflanzen zu verzichten, deren bodennah oder im Boden wachsende Teile für den Rohverzehr vorgesehen sind. Diese Empfehlung gilt solange, bis durch geeignete Aufbereitungsverfahren und Kontrollen sichergestellt werden kann, dass im Bewässerungswasser keine humanpathogenen Viren enthalten sind. Bei Nutzung jeder der Bewässerungssysteme können nach derzeitigem Wissensstand im aufbereiteten Abwasser vorhandene infektiöse humanpathogene Viren auf oder in die essbaren Teile der Pflanzen gelangen und nach Rohverzehr beim Menschen Erkrankungen auslösen.

Beim Vergleich der verschiedenen Bewässerungssysteme erscheinen die unterirdische Tropfbewässerung und die hydroponische Kultur mit der geringsten Wahrscheinlichkeit einer Virus-Kontamination oberirdischer Teile der Pflanze assoziiert zu sein. Es fehlen jedoch Daten zur Aufnahme von humanpathogenen Viren über die Wurzeln in die Pflanze und deren nachfolgende Infektiosität im oberirdischen Teil der Pflanze, wobei einige an Surrogatviren ermittelten Daten für eine solche Aufnahme sprechen. Daher kann im Sinne des Verbraucherschutzes auch diese Art der Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser nicht empfohlen werden.

Für die Bewertung einer Bewässerung von Obstbäumen und Weinbergen mit aufbereitetem Abwasser liegen bezüglich Viren derzeit keine Daten vor. Es gibt allerdings auch keine Hinweise auf Erkrankungsausbrüche durch Viren nach dem Verzehr von Baumobst oder Weintrauben. Eine effiziente Aufnahme von Viren über die Wurzeln von Obstbäumen und Weinstöcken mit nachfolgendem Transport über verhältnismäßig lange Strecken in die Früchte erscheint nach derzeitigem Stand der Wissenschaft eher unwahrscheinlich, weshalb gesundheitliche Beeinträchtigungen durch die Bewässerung dieser Pflanzen mit aufbereitetem Abwasser (Mindestgüteklasse A oder B) nicht zu erwarten sind. Diese Einschätzung gilt aber nur, sofern keine Beregnung erfolgt, bei der die Früchte in direkten Kontakt mit dem aufbereiteten Abwasser kommen.

Bei Pflanzen, die nicht roh verzehrt werden, sind gesundheitliche Beeinträchtigungen durch die Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser nach derzeitigem Wissen nicht zu erwarten, solange sichergestellt werden kann, dass eine ausreichende Erhitzung der Lebensmittel vor dem Verzehr erfolgt.

Für die Bewässerung von Futterpflanzen ergeben sich für die hier hauptsächlich betrachteten Viren (humanes NoV und HAV) keine konkreten gesundheitlichen Risiken, da diese Viren aufgrund ihrer Wirtsspezifität keine Gefahr für Tiere darstellen. Eine Bewertung bezüglich der Möglichkeit der Verbreitung zoonotischer Viren in der Tierpopulation (z. B. für HEV und Rotavirus) sowie bezüglich tierpathogener Viren wurde hier nicht vorgenommen.

3.2.2 Prüfung auf Viren bei der Validierung von Abwasser-Aufbereitungsverfahren

Die Aufnahme von Indikatorviren in das Prüfungsschema der Verordnung (EU) 2020/741 zur Validierung von Abwasser-Aufbereitungsverfahren erscheint sinnvoll, da die Eigenschaften von Viren sich mitunter deutlich von denen der Bakterien unterscheiden. Die WHO „Guidance on Potable Reuse“ (WHO, 2017) empfiehlt für eine sichere Aufbereitung von Abwasser für die Nutzung als Trinkwasser als Standardleistungsziel (Default Performance Target) eine Reduktion von 9,5 \log_{10} -Stufen enterischer Viren (NoV). Auch wenn dieser Wert

keinen direkten Richtwert für konkrete Validierungsuntersuchungen von Abwasseraufbereitungsanlagen darstellt, weist er doch darauf hin, dass eine Kombination mehrerer Abwasseraufbereitungsprozesse nötig ist, um die Konzentration von humanpathogenen enterischen Viren im aufbereitetem Abwasser auf einen Wert zu senken, bei dem gesundheitliche Beeinträchtigungen nicht zu erwarten sind. Zur Bewertung der Effektivität der Virusreduktion für humanpathogene Viren sind jedoch geeignete Nachweissysteme erforderlich, die gegebenenfalls erst noch entwickelt bzw. validiert werden müssten. Sollen hierfür Surrogatviren verwendet werden, so müssten außerdem Nachweise erbracht werden, dass das Verhalten der eingesetzten Surrogatviren mit dem der humanpathogenen Viren vergleichbar ist. Dies gilt auch für Coliphagen als derzeit übliche Indikatorviren.

3.2.3 Virustestungen für die Überwachung von aufbereitetem Abwasser

Die im Anhang I, Abschnitt 2 der Verordnung (EU) 2020/741 zur Überwachung der Qualität von aufbereitetem Abwasser aufgeführten Parameter erlauben keine Aussage über eventuell enthaltene humanpathogene Viren. Deshalb wäre die Aufnahme von Indikatorviren auch in diesen Untersuchungskatalog sinnvoll. Hierfür ist die Eignung verschiedener Indikatorviren im Hinblick auf ihre Aussagekraft zur An- und Abwesenheit der humanpathogenen Viren zu prüfen.

Weitere Informationen auf der BfR-Website zum Thema:

BfR-Stellungnahme Nr. 021/2020 „Aufbereitete Abwässer: Bakterielle Krankheitserreger auf frischem Obst und Gemüse vermeiden“:

<https://www.bfr.bund.de/cm/343/aufbereitete-abwaesser-bakterielle-krankheitserreger-auf-frischem-obst-und-gemuese-vermeiden.pdf>

4 Referenzen

Atmar, R. L., Opekun, A. R., Gilger, M. A., Estes, M. K., Crawford, S. E., Neill, F. H., & Graham, D. Y. (2008). Norwalk virus shedding after experimental human infection. *Emerging infectious diseases*, 14(10), 1553–1557. <https://doi.org/10.3201/eid1410.080117>

Bartsch, C., Höper, D., Mäde, D., & Johne, R. (2018). Analysis of frozen strawberries involved in a large norovirus gastroenteritis outbreak using next generation sequencing and digital PCR. *Food microbiology*, 76, 390–395. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.06.019>

Bernard, H., Faber, M., Wilking, H., Haller, S., Höhle, M., Schielke, A., Ducombe, T., Sifczyk, C., Merbecks, S. S., Fricke, G., Hamouda, O., Stark, K., Werber, D., & Outbreak Investigation Team (2014). Large multistate outbreak of norovirus gastroenteritis associated with frozen strawberries, Germany, 2012. *Euro surveillance : bulletin European sur les maladies transmissibles = European communicable disease bulletin*, 19(8), 20719. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.es2014.19.8.20719>

Bidawid, S., Farber, J.M., Sattar, S.A. (2001). Survival of hepatitis A virus on modified atmosphere-packaged (MAP) lettuce. *Food Microbiology*, 18(1), 95-102. <https://doi.org/10.1006/fmic.2000.0380>.

Biziagos, E., Passagot, J., Crance, J. M., & Deloince, R. (1988). Long-term survival of hepatitis A virus and poliovirus type 1 in mineral water. *Applied and environmental microbiology*, 54(11), 2705–2710. <https://doi.org/10.1128/aem.54.11.2705-2710.1988>

- Blanc, R., & Nasser, A. (1996). Effect of effluent quality and temperature on the persistence of viruses in soil. *Water Science and Technology*, 33(10-11), 237-242.
- Bosch, A., Pinto, R.M. (2013). Hepatitis A virus. In: Foodborne viruses and prions and their significance for public health. Eds.: F. Smulders, B. Norrung, H. Budka. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands.
- Butot, S., Putallaz, T., & Sánchez, G. (2008). Effects of sanitation, freezing and frozen storage on enteric viruses in berries and herbs. *International journal of food microbiology*, 126(1-2), 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.04.033>
- Carratalà, A., Rusiñol, M., Rodriguez-Manzano, J., Guerrero-Latorre, L., Sommer, R., & Girones, R. (2013). Environmental Effectors on the Inactivation of Human Adenoviruses in Water. Food and environmental virology, Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s12560-013-9123-3>
- Chancellor, D. D., Tyagi, S., Bazaco, M. C., Bacvinskas, S., Chancellor, M. B., Dato, V. M., & de Miguel, F. (2006). Green onions: potential mechanism for hepatitis A contamination. *Journal of food protection*, 69(6), 1468–1472. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-69.6.1468>
- Chandrasekaran, S., & Jiang, S. C. (2018). A dynamic transport model for quantification of norovirus internalization in lettuce from irrigation water and associated health risk. *Science of the total environment*, 643, 751–761. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.158>
- Chatziprodomidou, I. P., Bellou, M., Vantarakis, G., & Vantarakis, A. (2018). Viral outbreaks linked to fresh produce consumption: a systematic review. *Journal of applied microbiology*, 124(4), 932–942. <https://doi.org/10.1111/jam.13747>
- Chhabra, P., de Graaf, M., Parra, G. I., Chan, M. C., Green, K., Martella, V., Wang, Q., White, P. A., Katayama, K., Vennema, H., Koopmans, M., & Vinjé, J. (2019). Updated classification of norovirus genogroups and genotypes. *The Journal of general virology*, 100(10), 1393–1406. <https://doi.org/10.1099/jgv.0.001318>
- Cook N, Williams L, D'Agostino M. Prevalence of Norovirus in produce sold at retail Cook, N., Williams, L., & D'Agostino, M. (2019). Prevalence of Norovirus in produce sold at retail in the United Kingdom. *Food microbiology*, 79, 85–89. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.12.003>
- Cook, N., Bertrand, I., Gantzer, C., Pinto, R. M., & Bosch, A. (2018). Persistence of Hepatitis A Virus in Fresh Produce and Production Environments, and the Effect of Disinfection Procedures: A Review. *Food and environmental virology*, 10(3), 253–262. <https://doi.org/10.1007/s12560-018-9349-1>
- Cornel, P., Mohr, M., Nocker, A., Selinka, H., Schramm, E., (ISOE), Stange, C., Drewes J. E. (2018). Relevanz mikrobiologischer Parameter für die Wasserwiederverwendung. Fact Sheet zum Wave-Querschnittsthema „Risikomanagement in der Wasserwiederverwendung“ https://egocms.dechema.de/wave/F%C3%B6rderung/C3%9Fnahmen/Risikomanagement+in+der+Wasserwiederverwendung-nonactive-1-preview-1/_Wave_FactSheets_mikrobiol%20Parameter_Final.pdf
- Croci, L., De Medici, D., Scalfaro, C., Fiore, A., & Toti, L. (2002). The survival of hepatitis A virus in fresh produce. *International journal of food microbiology*, 73(1), 29–34. [https://doi.org/10.1016/s0168-1605\(01\)00689-4](https://doi.org/10.1016/s0168-1605(01)00689-4)

- Dicaprio, E., Ma, Y., Purgianto, A., Hughes, J., & Li, J. (2012). Internalization and dissemination of human norovirus and animal caliciviruses in hydroponically grown romaine lettuce. *Applied and environmental microbiology*, 78(17), 6143–6152. <https://doi.org/10.1128/AEM.01081-12>
- Dolin, R., Blacklow, N. R., DuPont, H., Buscho, R. F., Wyatt, R. G., Kasel, J. A., Hornick, R., & Chanock, R. M. (1972). Biological properties of Norwalk agent of acute infectious non-bacterial gastroenteritis. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. Society for Experimental Biology and Medicine (New York, N.Y.)*, 140(2), 578–583. <https://doi.org/10.3181/00379727-140-36508>
- Espinosa, A. C., Mazari-Hiriart, M., Espinosa, R., Maruri-Avidal, L., Méndez, E., & Arias, C. F. (2008). Infectivity and genome persistence of rotavirus and astrovirus in groundwater and surface water. *Water research*, 42(10-11), 2618–2628. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.01.018>
- Esseili, M. A., Meulia, T., Saif, L. J., & Wang, Q. (2018). Tissue Distribution and Visualization of Internalized Human Norovirus in Leafy Greens. *Applied and environmental microbiology*, 84(12), e00292-18. <https://doi.org/10.1128/AEM.00292-18>
- Esseili, M. A., Saif, L. J., Farkas, T., & Wang, Q. (2015). Feline Calicivirus, Murine Norovirus, Porcine Sapovirus, and Tulane Virus Survival on Postharvest Lettuce. *Applied and environmental microbiology*, 81(15), 5085–5092. <https://doi.org/10.1128/AEM.00558-15>
- Ettayebi, K., Crawford, S. E., Murakami, K., Broughman, J. R., Karandikar, U., Tenge, V. R., Neill, F. H., Blutt, S. E., Zeng, X. L., Qu, L., Kou, B., Opekun, A. R., Burrin, D., Graham, D. Y., Ramani, S., Atmar, R. L., & Estes, M. K. (2016). Replication of human noroviruses in stem cell-derived human enteroids. *Science (New York, N.Y.)*, 353(6306), 1387–1393. <https://doi.org/10.1126/science.aaf5211>
- Ettayebi, K., Tenge, V. R., Cortes-Penfield, N. W., Crawford, S. E., Neill, F. H., Zeng, X. L., Yu, X., Ayyar, B. V., Burrin, D., Ramani, S., Atmar, R. L., & Estes, M. K. (2021). New Insights and Enhanced Human Norovirus Cultivation in Human Intestinal Enteroids. *mSphere*, 6(1), e01136-20. <https://doi.org/10.1128/mSphere.01136-20>
- Faber, M., Askar, M., & Stark, K. (2018). Case-control study on risk factors for acute hepatitis E in Germany, 2012 to 2014. *Euro surveillance : bulletin Européen sur les maladies transmissibles = European communicable disease bulletin*, 23(19), 17-00469. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2018.23.19.17-00469>
- Fallahi, S., & Mattison, K. (2011). Evaluation of murine norovirus persistence in environments relevant to food production and processing. *Journal of food protection*, 74(11), 1847–1851. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-11-081>
- Gallimore, C. I., Pipkin, C., Shrimpton, H., Green, A. D., Pickford, Y., McCartney, C., Sutherland, G., Brown, D. W., & Gray, J. J. (2005). Detection of multiple enteric virus strains within a foodborne outbreak of gastroenteritis: an indication of the source of contamination. *Epidemiology and infection*, 133(1), 41–47. <https://doi.org/10.1017/s0950268804003218>
- Gallot, C., Grout, L., Roque-Afonso, A. M., Couturier, E., Carrillo-Santistevé, P., Pouey, J., Letort, M. J., Hoppe, S., Capdepon, P., Saint-Martin, S., De Valk, H., & Vaillant, V. (2011). Hepatitis A associated with semidried tomatoes, France, 2010. *Emerging infectious diseases*, 17(3), 566–567. <https://doi.org/10.3201/eid1703.101479>

Herman, K. M., Hall, A. J., & Gould, L. H. (2015). Outbreaks attributed to fresh leafy vegetables, United States, 1973-2012. *Epidemiology and infection*, 143(14), 3011–3021. <https://doi.org/10.1017/S0950268815000047>

Hirneisen, K. A., & Kniel, K. E. (2013). Comparative uptake of enteric viruses into spinach and green onions. *Food and environmental virology*, 5(1), 24–34. <https://doi.org/10.1007/s12560-012-9093-x>

Hirneisen, K. A., & Kniel, K. E. (2013). Norovirus surrogate survival on spinach during pre-harvest growth. *Phytopathology*, 103(4), 389–394. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-12-0231-FI>

Johne, R., Albert, T. (2013). Hepatitis E virus and other viruses occasionally reported as foodborne. In: Foodborne viruses and prions and their significance for public health. Eds.: F. Smulders, B. Norrung, H. Budka. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands.

Johne, R., Trojnar, E., Filter, M., & Hofmann, J. (2016). Thermal Stability of Hepatitis E Virus as Estimated by a Cell Culture Method. *Applied and environmental microbiology*, 82(14), 4225–4231. <https://doi.org/10.1128/AEM.00951-16>

Keswick, B. H., Satterwhite, T. K., Johnson, P. C., DuPont, H. L., Secor, S. L., Bitsura, J. A., Gary, G. W., & Hoff, J. C. (1985). Inactivation of Norwalk virus in drinking water by chlorine. *Applied and environmental microbiology*, 50(2), 261–264. <https://doi.org/10.1128/aem.50.2.261-264.1985>

Kokkinos, P., Kozyra, I., Lazic, S., Bouwknecht, M., Rutjes, S., Willems, K., Moloney, R., de Roda Husman, A. M., Kaupke, A., Legaki, E., D'Agostino, M., Cook, N., Rzeżutka, A., Petrovic, T., & Vantarakis, A. (2012). Harmonised investigation of the occurrence of human enteric viruses in the leafy green vegetable supply chain in three European countries. *Food and environmental virology*, 4(4), 179–191. <https://doi.org/10.1007/s12560-012-9087-8>

Leblanc, D., Gagné, M. J., Poitras, É., & Brassard, J. (2019). Persistence of murine norovirus, bovine rotavirus, and hepatitis A virus on stainless steel surfaces, in spring water, and on blueberries. *Food microbiology*, 84, 103257. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103257>

Lee, S. J., Si, J., Yun, H. S., & Ko, G. (2015). Effect of temperature and relative humidity on the survival of foodborne viruses during food storage. *Applied and environmental microbiology*, 81(6), 2075–2081. <https://doi.org/10.1128/AEM.04093-14>

Leon, J. S., Kingsley, D. H., Montes, J. S., Richards, G. P., Lyon, G. M., Abdulhafid, G. M., Seitz, S. R., Fernandez, M. L., Teunis, P. F., Flick, G. J., & Moe, C. L. (2011). Randomized, double-blinded clinical trial for human norovirus inactivation in oysters by high hydrostatic pressure processing. *Applied and environmental microbiology*, 77(15), 5476–5482. <https://doi.org/10.1128/AEM.02801-10>

Loutreul, J., Cazeaux, C., Levert, D., Nicolas, A., Vautier, S., Le Sauvage, A. L., Perelle, S., & Morin, T. (2014). Prevalence of human noroviruses in frozen marketed shellfish, red fruits and fresh vegetables. *Food and environmental virology*, 6(3), 157–168. <https://doi.org/10.1007/s12560-014-9150-8>

Mäde, D., Trübner, K., Neubert, E., Höhne, M., & Johne, R. (2013). Detection and Typing of Norovirus from Frozen Strawberries Involved in a Large-Scale Gastroenteritis Outbreak in Germany. *Food and environmental virology*, 5(3), 162–168. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s12560-013-9118-0>

Mattison, C. P., Dunn, M., Wikswo, M. E., Kambhampati, A., Calderwood, L., Balachandran, N., Burnett, E., & Hall, A. J. (2021). Non-Norovirus Viral Gastroenteritis Outbreaks Reported to the National Outbreak Reporting System, USA, 2009-2018. *Emerging infectious diseases*, 27(2), 560–564. <https://doi.org/10.3201/eid2702.203943>

Mattison, K., Karthikeyan, K., Abebe, M., Malik, N., Sattar, S. A., Farber, J. M., & Bidawid, S. (2007). Survival of calicivirus in foods and on surfaces: experiments with feline calicivirus as a surrogate for norovirus. *Journal of food protection*, 70(2), 500–503. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-70.2.500>

Murphy, P., Nowak, T., Lemon, S. M., & Hilfenhaus, J. (1993). Inactivation of hepatitis A virus by heat treatment in aqueous solution. *Journal of medical virology*, 41(1), 61–64. <https://doi.org/10.1002/jmv.1890410113>

Oka, T., Wang, Q., Katayama, K., & Saif, L. J. (2015). Comprehensive review of human sapoviruses. *Clinical microbiology reviews*, 28(1), 32–53. <https://doi.org/10.1128/CMR.00011-14>

Pallerla, S. R., Harms, D., Johne, R., Todt, D., Steinmann, E., Schemmerer, M., Wenzel, J. J., Hofmann, J., Shih, J., Wedemeyer, H., Bock, C. T., & Velavan, T. P. (2020). Hepatitis E Virus Infection: Circulation, Molecular Epidemiology, and Impact on Global Health. *Pathogens (Basel, Switzerland)*, 9(10), 856. <https://doi.org/10.3390/pathogens9100856>

Randazzo, W., & Sánchez, G. (2020). Hepatitis A infections from food. *Journal of applied microbiology*, 129(5), 1120–1132. <https://doi.org/10.1111/jam.14727>

Rao, V. C., Metcalf, T. G., & Melnick, J. L. (1986). Human viruses in sediments, sludges, and soils. *Bulletin of the World Health Organization*, 64(1), 1–13.

Richards G. P. (2012). Critical review of norovirus surrogates in food safety research: rationale for considering volunteer studies. *Food and environmental virology*, 4(1), 6–13. <https://doi.org/10.1007/s12560-011-9072-7>

RKI (2021a): SurvStat@RKI 2.0, <https://survstat.rki.de>, Abfragedatum: 16.09.2021.

RKI (2021b). Ratgeber: Hepatitis A. https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/Ratgeber_HepatitisA.html, Abfragedatum: 16.09.2021.

Rzezutka, A., & Cook, N. (2004). Survival of human enteric viruses in the environment and food. *FEMS microbiology reviews*, 28(4), 441–453. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2004.02.001>

Sanchez G., Bosch A. (2016) Survival of Enteric Viruses in the Environment and Food. In: Goyal S., Cannon J. (eds) *Viruses in Foods. Food Microbiology and Food Safety*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30723-7_13

Scholz, E., Heinrich, U., & Flehmig, B. (1989). Acid stability of hepatitis A virus. *The Journal of general virology*, 70 (Pt 9), 2481–2485. <https://doi.org/10.1099/0022-1317-70-9-2481>

Schwarz, K. R., Sidhu, J., Toze, S., Li, Y., Lee, E., Gruchlik, Y., & Pritchard, D. L. (2019). Decay rates of *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp., F-specific bacteriophage MS2, somatic coliphage and human adenovirus in facultative pond sludge. *Water research*, 154, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.027>

Seis, W., Lesjean, B., Maaßen, S., Balla, D., Hochstrat, R., Düppenbecker, B. (2016). Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von behandeltem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung. UBA Texte 34/2016 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_34_2016_rahmenbedingungen_fuer_die_umweltgerechte_nutzung_von_behandeltem_abwasser_0.pdf

Selinka, H.C., Schmidt, A., Szewzyk, R. (2020). Viren und Parasiten in Abwasser und Flüssen sowie Handlungsempfehlungen für Flüsse mit kurzzeitigen Verschmutzungen Flusshygiene - Hygienisch relevante Mikroorganismen und Krankheitserreger in multifunktionalen Gewässern und Wasserkreisläufen: Arbeitspakete 1 und 4 : Abschlussbericht Umweltbundesamt https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=download&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1737639785&cHash=55c9a3c1287f0c478a10628f2a001d0e#download-mark

Severi, E., Verhoef, L., Thornton, L., Guzman-Herrador, B. R., Faber, M., Sundqvist, L., Rimhanen-Finne, R., Roque-Afonso, A. M., Ngui, S. L., Allerberger, F., Baumann-Popczyk, A., Muller, L., Parmakova, K., Alfonsi, V., Tavoschi, L., Vennema, H., Fitzgerald, M., Myrmel, M., Gertler, M., Ederth, J., ... Rizzo, C. (2015). Large and prolonged food-borne multistate hepatitis A outbreak in Europe associated with consumption of frozen berries, 2013 to 2014. *Euro surveillance : bulletin Europeen sur les maladies transmissibles = European communicable disease bulletin*, 20(29), 21192. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.es2015.20.29.21192>

Shieh, Y. C., Stewart, D. S., & Laird, D. T. (2009). Survival of hepatitis A virus in spinach during low temperature storage. *Journal of food protection*, 72(11), 2390–2393. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-72.11.2390>

Smith, D. B., & Simmonds, P. (2018). Classification and Genomic Diversity of Enterically Transmitted Hepatitis Viruses. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine*, 8(9), a031880. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a031880>

Sobsey, M D., Shields, P A., Hauchman, F H., Hazard, R L., Caton, L W. (1986). Survival and Transport of Hepatitis a Virus in Soils, Groundwater and Wastewater. *Water Science and Technology*, 18, 97-106

Stine, S. W., Song, I., Choi, C. Y., & Gerba, C. P. (2005). Effect of relative humidity on pre-harvest survival of bacterial and viral pathogens on the surface of cantaloupe, lettuce, and bell peppers. *Journal of food protection*, 68(7), 1352–1358. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-68.7.1352>

Sun, Y., Laird, D. T., & Shieh, Y. C. (2012). Temperature-dependent survival of hepatitis A virus during storage of contaminated onions. *Applied and environmental microbiology*, 78(14), 4976–4983. <https://doi.org/10.1128/AEM.00402-12>

Terio, V., Bottaro, M., Pavoni, E., Losio, M. N., Serraino, A., Giacometti, F., Martella, V., Motola, A., Di Pinto, A., & Tantillo, G. (2017). Occurrence of hepatitis A and E and norovirus GI and GII in ready-to-eat vegetables in Italy. *International journal of food microbiology*, 249, 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.03.008>

Teunis, P. F., Moe, C. L., Liu, P., Miller, S. E., Lindesmith, L., Baric, R. S., Le Pendu, J., & Calderon, R. L. (2008). Norwalk virus: how infectious is it?. *Journal of medical virology*, 80(8), 1468–1476. <https://doi.org/10.1002/jmv.21237>

Tjon, G. M., Coutinho, R. A., van den Hoek, A., Esman, S., Wijkmans, C. J., Hoebe, C. J., Wolters, B., Swaan, C., Geskus, R. B., Dukers, N., & Bruisten, S. M. (2006). High and persistent excretion of hepatitis A virus in immunocompetent patients. *Journal of medical virology*, 78(11), 1398–1405. <https://doi.org/10.1002/jmv.20711>

Todd, E. C., Greig, J. D., Bartleson, C. A., & Michaels, B. S. (2008). Outbreaks where food workers have been implicated in the spread of foodborne disease. Part 4. Infective doses and pathogen carriage. *Journal of food protection*, 71(11), 2339–2373. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-71.11.2339>

Treagus, S., Wright, C., Baker-Austin, C., Longdon, B., & Lowther, J. (2021). The Foodborne Transmission of Hepatitis E Virus to Humans. *Food and environmental virology*, 13(2), 127–145. <https://doi.org/10.1007/s12560-021-09461-5>

Urbanucci, A., Myrmel, M., Berg, I., von Bonsdorff, C. H., & Maunula, L. (2009). Potential internalization of caliciviruses in lettuce. *International journal of food microbiology*, 135(2), 175–178. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.07.036>

Van Beek, J., Koopmans, M. (2013). Introduction to norovirus. In: Foodborne viruses and prions and their significance for public health. Eds.: F. Smulders, B. Norrung, H. Budka. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands.

Wang, B., Harms, D., Papp, C. P., Niendorf, S., Jacobsen, S., Lütgehetmann, M., Pischke, S., Wedermeyer, H., Hofmann, J., & Bock, C. T. (2018). Comprehensive Molecular Approach for Characterization of Hepatitis E Virus Genotype 3 Variants. *Journal of clinical microbiology*, 56(5), e01686-17. <https://doi.org/10.1128/JCM.01686-17>

Wang, Q., & Kniel, K. E. (2015). Survival and Transfer of Murine Norovirus within a Hydroponic System during Kale and Mustard Microgreen Harvesting. *Applied and environmental microbiology*, 82(2), 705–713. <https://doi.org/10.1128/AEM.02990-15>

Wang, Q., Hirneisen, K. A., Markland, S. M., & Kniel, K. E. (2013). Survival of murine norovirus, Tulane virus, and hepatitis A virus on alfalfa seeds and sprouts during storage and germination. *Applied and environmental microbiology*, 79(22), 7021–7027. <https://doi.org/10.1128/AEM.01704-13>

Ward, R. L., & Ashley, C. S. (1980). Effects of wastewater sludge and its detergents on the stability of rotavirus. *Applied and environmental microbiology*, 39(6), 1154–1158. <https://doi.org/10.1128/aem.39.6.1154-1158.1980>

Wei, J., Jin, Y., Sims, T., & Kniel, K. E. (2011). Internalization of murine norovirus 1 by *Lactuca sativa* during irrigation. *Applied and environmental microbiology*, 77(7), 2508–2512. <https://doi.org/10.1128/AEM.02701-10>

Wheeler, C., Vogt, T. M., Armstrong, G. L., Vaughan, G., Weltman, A., Nainan, O. V., Dato, V., Xia, G., Waller, K., Amon, J., Lee, T. M., Highbaugh-Battle, A., Hembree, C., Evenson, S., Ruta, M. A., Williams, I. T., Fiore, A. E., & Bell, B. P. (2005). An outbreak of hepatitis A associated with green onions. *The New England journal of medicine*, 353(9), 890–897. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa050855>

WHO (2021). Fact sheet: Hepatitis A. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/hepatitis-a>, Abfragedatum: 16.09.2021.

WHO (2017). Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water. ISBN 9789241512770.

WHO (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Vol. 2: Wastewater use in agriculture. ISBN 92 4 154683 2 (v. 2)

Wolff, A., Günther, T., Albert, T., Schilling-Loeffler, K., Gadicherla, A. K., & Johne, R. (2020a). Stability of hepatitis E virus at different pH values. *International journal of food microbiology*, 325, 108625. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108625>

Wolff, A., Günther, T., Albert, T., & Johne, R. (2020b). Effect of Sodium Chloride, Sodium Nitrite and Sodium Nitrate on the Infectivity of Hepatitis E Virus. *Food and environmental virology*, 12(4), 350–354. <https://doi.org/10.1007/s12560-020-09440-2>

Yang, Z., Chambers, H., DiCaprio, E., Gao, G., & Li, J. (2018). Internalization and dissemination of human norovirus and Tulane virus in fresh produce is plant dependent. *Food microbiology*, 69, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.07.015>

Über das BfR

Das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) ist eine wissenschaftlich unabhängige Einrichtung im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Es berät die Bundesregierung und die Bundesländer zu Fragen der Lebensmittel-, Chemikalien- und Produktsicherheit. Das BfR betreibt eigene Forschung zu Themen, die in engem Zusammenhang mit seinen Bewertungsaufgaben stehen.