

Silke Steinmüller<sup>1</sup>, Magdalene Pietsch<sup>1</sup>, Petra Müller<sup>2</sup>, Martina Bandte<sup>3</sup>, Carmen Büttner<sup>3</sup>

## Risiko der Verbreitung relevanter Schadorganismen der Kartoffel bei landwirtschaftlicher Verwertung von Klärschlamm

Risk of dissemination of relevant phytopathogens of potato with agricultural use of sewage sludge

401

### Zusammenfassung

Klärschlamm stellt einen bedeutsamen Sekundärrohstoffdünger dar, der grundsätzlich für eine Verwendung in der Landwirtschaft geeignet ist. Abhängig von der Herkunft des Klärschlammes, kann dieser mit verschiedenen Tier-, Human- und Pflanzenpathogenen belastet sein. Anhand von Literaturangaben erfolgte eine Bewertung verschiedener Klärschlammbehandlungsverfahren hinsichtlich der Wirkung auf relevante Schadorganismen der Kartoffel und das damit verbundene Risiko der Verbreitung solcher Schadorganismen mit Klärschlamm bei landwirtschaftlicher Verwertung. Entsprechend der vorliegenden Literatur muss davon ausgegangen werden, dass eine vollständige Abtötung widerstandsfähiger Schadorganismen durch übliche Klärschlammbehandlungsverfahren nicht gesichert ist. Dies betrifft vor allem eine mögliche Kontamination mit den in der Richtlinie 2000/29/EG gelisteten Schadorganismen der Kartoffel, vor allem mit *Synchytrium endobioticum*, dem Erreger des Kartoffelkrebses. Um eine Verbreitung solcher Schadorganismen auszuschließen, sollte auf eine Einleitung risikoreicher Abwässer, z.B. aus der Kartoffelverarbeitung, in kommunale Kläranlagen, bzw. eine Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft nach Einleitung risikoreicher Abwässer verzichtet werden.

**Stichwörter:** Abwasser, Bakterielle Ringfäule, Schleimfäule der Kartoffel, *Clavibacter michiganensis* ssp. *sepedonicus*, *Globodera*, Hygienisierung, Kartoffelkrebs, Kartoffelverarbeitung, Kartoffelzystennematoden, Klärschlammbehandlung, Phytopathogene, Quarantäneschadorganismen, *Ralstonia solanacearum*, *Synchytrium endobioticum*

### Abstract

Sewage sludge is a significant fertilizer that is generally suitable for usage in agriculture. Depending on the origin of the sewage sludge, it can be contaminated with various animal, human or plant pathogens. Based on literature data, current sewage sludge treatments were analyzed regarding their effectiveness on the inactivation of relevant pathogens of potatoes and the associated risk of their dissemination when sewage sludge is used in agriculture. According to the available literature it has to be concluded, that treatments usually applied in Germany will not be sufficient for complete inactivation of robust phytopathogens. This refers mainly to pathogens of potato that are listed in Directive 2000/29/EC, especially *Synchytrium endobioticum*, the agent for potato wart disease. Therefore, risky waste waters, e.g. from potato processing industries, should not be introduced in mu-

### Institut

Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit, Braunschweig<sup>1</sup>

Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit, Kleinmachnow<sup>2</sup>

Humboldt-Universität zu Berlin, Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften, Fachgebiet Phyto-medizin, Berlin<sup>3</sup>

### Kontaktanschrift

Silke Steinmüller, Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig, E-Mail: silke.steinmoeller@jki.bund.de

### Zur Veröffentlichung angenommen

29. August 2014

nicipal waste waters or sewage sludge produced from such risky waste water should not be used in agriculture, to avoid the possible dissemination of such phytopathogens.

**Key words:** Waste water, bacterial ring rot, potato brown rot, *Clavibacter michiganensis* ssp. *sepedonicus*, *Globodera*, sanitization, potato wart, potato processing, potato cyst nematodes, sewage sludge treatment, phytopathogens, quarantine pests, *Ralstonia solanacearum*, *Synchytrium endobioticum*

## Einleitung

Klärschlamm ist ein Nebenprodukt der Abwasserreinigung, bestehend aus Wasser, einer Mikroflora und Feststoffen, die während der Abwasserreinigung ausfallen (KTBL, 2007). Die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) definiert Klärschlamm wie folgt: „Klärschlamm ist der bei der Behandlung von Abwasser in Abwasserbehandlungsanlagen einschließlich zugehöriger Anlagen zur weitergehenden Abwasserreinigung anfallende Schlamm, auch entwässert oder getrocknet oder in sonstiger Form behandelt“ (ANONYM, 1992). In Abhängigkeit von der Abwasserherkunft ist die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe des Klärschlammes sehr unterschiedlich (PRZEWROCKI et al., 2003); er ist in der Regel jedoch reich an Nährstoffen und eignet sich grundsätzlich als Sekundärrohstoffdünger für eine weitere Verwertung auf landwirtschaftlichen Flächen. Im Sinne des *Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen* (ANONYM, 2012) ist die nutzbringende Verwertung der Klärschlamm einer Beseitigung vorzuziehen. Nach Angaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit fielen im Jahr 2011 rund 1,9 Mio. t Klärschlamm an, von denen ca. 29% als Dünger in der Landwirtschaft verwendet wurden (BMUB, 2014). Die Ausbringung von organischen Reststoffen auf landwirtschaftliche Flächen birgt neben den grundsätzlichen Vorteilen jedoch auch Nachteile. So besteht bei Klärschlamm neben dem Risiko einer Kontamination mit human- oder tierpathogenen Organismen (ANONYM, 2010; BIBBY und PECCIA, 2013; BÖHM, 2007; GERBA und SMITH, 2005; GRACZYK et al., 2008; JEBRI et al., 2012) auch die Möglichkeit des Eintrags pflanzlicher Pathogene über die Abwasserbehandlung (ANONYM, 2001; UNGER und PIETSCH, 2001; KLAGES et al., 2009). MIKKELSEN et al. (2006) nennen die Verwendung von Klärschlamm auf Ackerflächen als einen der Hauptverbreitungswege von Pflanzenpathogenen mit Abfällen. Besonders relevant sind die Schadorganismen der Kartoffel, die in den Anhängen der Richtlinie 2000/29/EG (ANONYM, 2000) gelistet sind und für die ein Verbot der Verbringung innerhalb der Europäischen Union besteht. Hierunter fallen der Erreger der Bakteriellen Ringfäule *Clavibacter michiganensis* ssp. *sepedonicus*, der Erreger des Kartoffelkrebses *Synchytrium endobioticum*, die Kartoffelzystenematoden *Globodera rostochiensis* und *G. pallida* sowie

der Erreger der Schleimfäule an Kartoffeln *Ralstonia solanacearum*, die vereinzelt auch in Deutschland auftreten und dann unter amtlicher Kontrolle stehen. Bei einer landwirtschaftlichen Verwertung kontaminierter Klärschlamm besteht die Gefahr des Eintrags dieser pflanzlichen Pathogene auf Ackerflächen, auf denen sie zuvor nicht vorgekommen sind. Im Fall einer Kontamination mit den in der Richtlinie gelisteten Schadorganismen der Kartoffel kann es zu langjährigen Bodenverseuchungen und nachfolgend zu Beschränkungen in der landwirtschaftlichen Bodennutzung kommen (UNGER und PIETSCH, 2001; STEINMÖLLER et al., 2007). Auf Grundlage aktueller Literaturdaten wurde die Wirkung verschiedener Behandlungsverfahren von Klärschlamm auf diese Schadorganismen der Kartoffel ermittelt und das Risiko deren Verbreitung mit Klärschlamm bei dessen Verwertung in der Landwirtschaft bewertet.

## Vorkommen relevanter Schadorganismen der Kartoffel im Klärschlamm

Gleich mehrere Autoren beschreiben den Eintrag von *Globodera rostochiensis* bzw. *G. pallida* in Abwässer der Kartoffel- bzw. Zuckerindustrie (LÜCKE, 1965; ŠEDIVÝ, 1966; SPRAU, 1967 und STELTER, 1981). BRÖTHER (2002) konnte *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* sowohl in Abwässern als auch in Sedimenten aus der Kartoffelverarbeitung nachweisen. Auch vitale Dauersori von *S. endobioticum* konnten sowohl aus dem Klärwasser eines Kartoffelverarbeitungsbetriebes als auch im Sediment der Klärbecken nachgewiesen werden (EFREMENKO und YAKOVLEVA, 1981). Bei Untersuchungen in Bayern wurde der Quarantäneschadorganismus *R. solanacearum* in Oberflächengewässern nachgewiesen (RETZER et al., 2006). Eine Ursache für das Vorkommen des Bakteriums in diesen Gewässern kann die Einleitung von Abwässern aus einem Kartoffelverarbeitungsbetrieb sein. Es ist zu vermuten, dass *R. solanacearum* über solche Abwässer in Klärschlamm gelangen kann. Auch in Großbritannien und den Niederlanden konnte *R. solanacearum* in Oberflächengewässern nachgewiesen werden (ELPHINSTONE, 2001; PARKINSON et al., 2013; STEVENS und VAN ELSAS, 2010). Grundsätzlich kann bei einem Eintrag von Pflanzenpathogenen in Abwässer eine Kontamination von Klärschlamm nicht ausgeschlossen werden. CHYTL (1986) beschreibt, dass über Klärschlamm die Samen verschiedener Unkräuter und auch Kulturpflanzen, die aus Lebensmittelresten stammen, auf landwirtschaftliche Flächen eingetragen werden können. Untersuchungen zum Überleben von *Polymyxa betae*, dem Überträger des *Beet necrotic yellow vein virus* im Abwasser aus zuckerrüben- bzw. gemüseverarbeitenden Betrieben ergaben, dass sich in den Erden der Schlammteiche infektiöse Sporen des Erregers absetzten (DICKENS et al., 1995). In einer japanischen Gewächshausanlage konnte eine zu hohen Ausfällen führende Infektion mit *Pythium aphanidermatum* auf die Verwendung von Klärschlamm aus einer Trinkwasseraufbereitungsanlage zurückgeführt werden (TOJO und OSHIMAN, 2000).

Zur Häufigkeit des Eintrags bzw. dem Vorkommen widerstandsfähiger Schadorganismen der Kartoffel in Abwässer bzw. Klärschlamm liegen jedoch nur wenige Untersuchungen vor. Eine Kontamination von Klärschlämmen mit solchen Organismen kann in jedem Bereich erfolgen, wo kontaminierte oder infizierte Kartoffeln gelagert, gewaschen oder verarbeitet werden und die Organismen mit dem Abwasser in kommunale Kläranlagen geleitet werden. Nach dem DWA-Regelwerk zu Abwässern aus der Kartoffelverarbeitung (DWA, 2005) sind viele Betriebe der Kartoffelverarbeitung in Deutschland derzeit Indirekteinleiter, leiten also ihre Abwässer über kommunale Kläranlagen ab. In diesem Regelwerk werden vier kommunale Kläranlagen explizit genannt, die sogar eine überwiegende Abwasserbelastung aus der Kartoffelverarbeitungsindustrie aufweisen. Grundsätzlich besteht demnach ein Risiko der Belastung von Klärschlämmen mit einem der genannten Schadorganismen der Kartoffel, wenn befallene Partien verarbeitet werden.

### Verfahren zur Dekontamination von Klärschlamm

Aktuelle Behandlungsvorschriften in Deutschland für Klärschlamm beruhen auf der Richtlinie 86/278/EEC vom 12 Juni 1986 „über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft“ (ANONYM, 1986) sowie der Klärschlammverordnung (ANONYM, 1992), zu der seit einigen Jahren Entwürfe für eine Novellierung diskutiert werden. Vor der Verwertung muss die organische Substanz weitestgehend mineralisiert werden, um ein biologisch-chemisch stabiles, lagerungsfähiges und möglichst geruchsneutrales Produkt zu erhalten. Die Klärschlammstabilisierung kann dabei aus verfahrenstechnischer Sicht erzielt werden durch i) Verfahren, die zu einer Verminderung der organischen Substanz über den biochemischen Stoffumsatz oder ii) Verfahren, die durch thermische oder chemische Einflüsse zu einer Veränderung des Milieus führen. Die einzelnen Verfahren finden bei Außentemperatur oder unter eher mesophilen Temperaturbedingungen statt (BREITENBÜCHER, 1983; LEBSCHER und LOLL, 1996). Einige der Verfahren besitzen eine inaktivierende Wirkung auf human- und tierpathogene Organismen, können aber auch verschiedene Pflanzenpathogene abtöten (ATV, 1986; ATV, 1988; ARTHURSON, 2008; CARRINGTON, 2001; KLAGES et al., 2009). Tab. 1 gibt einen Überblick häufig verwendeter Verfahren zur Hygienisierung von Klärschlamm wie thermophile Stabilisierung, Pasteurisierung, thermische Konditionierung, Hochtemperaturtrocknung, Konditionierung durch Zugabe von ungelöschtem Branntkalk oder Kalkhydrat und Kompostierung. Die hygienisierende Wirkung ist in besonderem Maße temperaturabhängig (BOLLEN et al., 1989), aber auch pH-Wert-Verschiebungen, Antagonistentätigkeit und Feuchtegehalte können in Abhängigkeit von der Biologie des Organismus die Inaktivierung bedingen oder zu ihr beitragen (CARRINGTON, 2001).

**Tab. 1. Übersicht praxisüblicher Hygienisierungsverfahren von Klärschlamm und die für eine erfolgreiche Hygienisierung einzuhaltende Temperatur und Einwirkzeit (nach KLAGES et al., 2009)**

Hygienisierungsverfahren	Erforderliche Temperatur und Einwirkzeit
aerob-thermophile Stabilisierung	50°C/≥ 23 Stunden 55°C/≥ 10 Stunden 60°C/≥ 4 Stunden
anaerob-thermophile Stabilisierung	55°C/≥ 24 Stunden
Aerob-thermophile Vorstufe nachfolgende anaerob mesophiler Stabilisierung	60°C/≥ 60 Minuten 65°C/≥ 30 Minuten 70°C/≥ 25 Minuten 80°C/≥ 10 Minuten
Pasteurisierung (Vorpasteurisierung)	65°C/≥ 30 Minuten 70°C/≥ 25 Minuten 80°C/≥ 10 Minuten
Thermische Konditionierung	180–210°C/≥ 45 Minuten
Thermische Trocknung	> 100°C/≥ wenige Minuten
Zugabe von Kalkhydrat	pH = 12,5 ± 0,3 + 3 Monate Lagerung
Zugabe von Branntkalk	pH ≥ 12,5/50 – 70 °C/ ≥ 2 Stunden
Kompostierung	55°C/≥ 2 Wochen 65°C/≥ 1 Woche

Für eine Hygienisierung werden vor allem die aerob-thermophile Stabilisierung, die anaerob-thermophile Stabilisierung und die Kombination einer aerob-thermophilen Vorstufe mit einer anaerob mesophilen Stabilisierung genutzt (KLAGES et al., 2009). Zur Entseuchung des Klärschlammes ist es von großer Bedeutung hohe Temperaturen über einen längeren Zeitraum einzuhalten. LEBSCHER und LOLL (1996) schreiben eine Mindestverweildauer im Batchverfahren von 23 Stunden bei 50°C vor. Höhere Temperaturen sollen die Verweildauer verkürzen (KLAGES et al., 2009). Zum Überleben von Schadorganismen der Kartoffel während der verschiedenen Stabilisierungsprozesse liegen unterschiedliche Untersuchungen vor. Eine abtötende Wirkung auf Zysten der Kartoffelzystematoden (*Globodera* spp.) zeigten die mesophile anaerobe sowie eine thermophile aerobe Stabilisierung (SPAULL und McCORMACK, 1988; SPAULL et al., 1989). RYCKEBOER et al. (2002) beschreiben die Abtötung von *R. solanacearum* bei einer anaeroben Behandlung von organischem Hausmüll nach 12 Stunden bei 52°C. Nach ELPHINSTONE (2001) kann bereits eine anaerobe Stabilisierung des Klärschlammes für 48 Stunden bei 35°C zum Absterben von *R. solanacearum* führen. Auch TERMORSHUIZEN et al. (2003) konnte eine vollständige Inaktivierung von *R. solanacearum* durch eine anaerobe Stabilisierung von Gar-

ten- und Gemüseabfällen über sechs Wochen bei Temperaturen um 40°C feststellen. Zu *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* liegen verschiedene Untersuchungsergebnisse zur Wirkung einer anaeroben Behandlung vor, jedoch ausschließlich im mesophilen Temperaturbereich, der grundsätzlich nicht für eine Hygienisierung empfohlen wird. Nach TURNER et al. (1983) kann das Bakterium nach sieben Tagen bei durchschnittlich 35°C durch eine anaerobe Behandlung von Pflanzenmaterial abgetötet werden. Untersuchungen von WIEDEMANN und ENDERLEIN (2004) ergaben aber keine vollständige Abtötung von *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* durch eine Vergärung infizierter Kartoffelpartien bei Temperaturen im mesophilen Bereich. LIEBE et al. (2012) bestätigen, dass eine mesophile anaerobe Vergärung für sechs Stunden nicht zur Abtötung des Erregers ausreicht, auch nicht bei anschließender Lagerung der Gärreste für einen bzw. sechs Monate. Nach 24 Stunden Verweilzeit bei mesophilen Prozesstemperaturen konnte jedoch eine vollständige Inaktivierung von *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* nachgewiesen werden. Die Dauersori von *S. endobioticum* konnten bei mesophiler Prozessführung selbst bei Verweilzeiten von 138 Stunden und einer Vorbehandlung durch Silierung des Pflanzenmaterials nicht inaktiviert werden (SCHLEUSNER et al., 2012).

Die Kompostierung entwässerter Klärschlämme stellt eine aerobe thermophile Stabilisierung dar. Unter Zugabe von Strukturmaterial kommt es durch die Oxidationsprozesse beim mikrobiellen Abbau des organischen Materials zu einer Reaktionswärme von etwa 15 MJ/kg CBS (Chemische Sauerstoffbedarf) und zum Abbau und Umwandlung der Ausgangsstoffe zu Kompost (LEBSCHER und LOLL, 1996). Untersuchungen ergaben eine vollständige Abtötung der Zysten von *G. rostochiensis* in organischen Abfällen oder Erde nach acht Tagen bei Temperaturen von mindestens 50°C (BØEN et al., 2006; STEINMÖLLER et al., 2012). Für *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* sowie für Dauersori von *S. endobioticum* konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die Bakterien als auch die Dauersori in Erde durch eine Kompostierung über 12 Tage mit maximalen Temperaturen über 60°C bzw. eine Kompostierung über 21 Tage bei Temperaturen über 50°C nicht abgetötet werden (STEINMÖLLER et al., 2012; STEINMÖLLER et al., 2013).

Die Wirkung einer Schlammpasteurisierung ist ebenfalls von der erreichten Temperatur und der Dauer der Einwirkung abhängig. Dabei werden Klärschlämme auf Temperaturen zwischen 65°C bis maximal 100°C erhitzt. Grobe Partikel sollten im Vorfeld zerkleinert werden, um eine gleichmäßige Erwärmung des Klärschlammes zu gewährleisten (LEBSCHER und LOLL, 1996). Die Bioabfallverordnung schreibt zur Hygienisierung organischer Abfälle eine Pasteurisierung bei 70°C für mindestens eine Stunde vor (ANONYM, 1998). KLAGES et al. (2009) beschreiben zum Teil kürzere Behandlungszeiten, wenn die Pasteurisierung als Vorstufe einer anderen Behandlung vorangestellt wird. Auch nach einer Behandlung für 90 Minuten bei 70°C konnten noch vitale Bakterienzellen von *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* bzw. vitale Dauersori von *S. endobioticum* aus Erde isoliert werden. Hingegen war es bereits nach 30 Minuten bei 70°C nicht möglich vitale

Zysten von *G. rostochiensis* aus Erde zu isolieren (STEINMÖLLER et al., 2012; STEINMÖLLER et al., 2013). Die Dauersori von *S. endobioticum* waren auch durch eine Erwärmung kontaminierter Erdproben auf 90°C über acht Stunden nicht abzutöten (STEINMÖLLER et al., 2012). Zur Wirkung einer Kombination aus Pasteurisierung mit einer daran anschließenden Kompostierung oder Vergärung auf relevante Pflanzenpathogene liegen derzeit noch keine Untersuchungen vor.

Bei einer hochthermischen Konditionierung werden Temperaturen zwischen 180–220°C erreicht, z.T. mit einem Druck von 15–20 bar. Sie dient vor allem der Verbesserung von Entwässerungseigenschaften, ist aber mit hohen Kosten für Betrieb und Instandhaltung verbunden (LEBSCHER und LOLL, 1996). Die thermische Trocknung erfolgt in der Regel über Wärmezugabe und Verdunstung des Wassers. Bei einer Hochtemperaturtrocknung werden Temperaturen von über 100°C bis zu 450°C für wenige Minuten eingesetzt (KLAGES et al., 2009). Nach MÖLLER (1988) ist der Klärschlamm seuchenhygienisch unbedenklich, wenn bei beiden Verfahren mindestens die gleichen Bedingungen wie bei der Pasteurisierung erfüllt werden. MAGNUSSON et al. (2002) stellte fest, dass bei einer Entwässerung des Klärschlammes über Filterpressen mit einer Erwärmung auf 80°C und anschließender thermischer Trocknung für 100 Minuten bei 80°C Zysten von *G. rostochiensis* vollständig abgetötet wurden. Untersuchungen zur Wirkung beider Verfahren auf *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* oder *S. endobioticum* liegen derzeit nicht vor.

Eine chemische Stabilisierung erfolgt über die Zugabe von Kalk. Untersuchungen von EL-NAIM et al. (2004) ergaben, dass bei einer Zugabe von 20% Kalk zu frischem Klärschlamm eine Temperaturerhöhung auf über 80°C erreicht werden konnte. Entwässerte Klärschlämme werden mit Branntkalk (CaO) versetzt, wobei Reaktionstemperaturen zwischen 55°C und 70°C entstehen, bei flüssigen Klärschlämmen wird in der Regel Kalkhydrat (Ca(OH)<sub>2</sub>) zugesetzt. Beide Schlammvarianten gelten als hygienisch unbedenklich, wenn der pH-Wert des Schlammes mindestens 12,5 beträgt. Für entwässerten Klärschlamm muss zudem die Temperatur des gesamten Gemisches mindestens 55°C über zwei Stunden betragen, bei flüssigem Klärschlamm ist zusätzlich eine Lagerung von mindestens drei Monaten vorgegeben (ATV, 1988). ELPHINSTONE (2001) stellte fest, dass eine Erhöhung des pH-Wertes über 12 für mehr als 24 Stunden zum Absterben von *R. solanacearum* führt. Untersuchungen zur Wirkung einer Kalkbehandlung des Klärschlammes auf *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* oder *S. endobioticum* liegen derzeit nicht vor. Untersuchungen von DOROSHKIN (1955), der im pH-Wert Bereich von 2,2 und 12,38 nur einen geringen Einfluss auf die Vitalität der Dauersori von *S. endobioticum* feststellen konnte, machen eine Inaktivierung des Pilzes in kalkbehandelten Klärschlamm unwahrscheinlich.

Für die Vererdung wird der Klärschlamm auf Pflanzbeete aufgebracht, die mit Gras oder Schilf bepflanzt sind. Über die Entwässerung und den Abbau organischer Substanz werden der Feststoffgehalt und der mineralische

Anteil des Schlammes erhöht. Bei der Langzeitlagerung werden die Klärschlämme über mehrere Monate in separaten Tanks oder Becken gelagert. Direkte Untersuchungen zum Einfluss dieser Verfahren auf die in der Richtlinie 2000/29/EG gelisteten Schadorganismen der Kartoffel liegen derzeit nicht vor. Aufgrund der Langlebigkeit von *G. rostochiensis*, *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* und *S. endobioticum* kann jedoch nicht von einer Inaktivierung dieser Schadorganismen ausgegangen werden (TURNER, 1996; STACHEWICZ, 2003; KÄMMERER et al., 2007).

In Tab. 2 sind übliche Behandlungsverfahren für Klärschlämme hinsichtlich ihrer Wirkung auf die relevanten Quarantäneschadorganismen der Kartoffel zusammengefasst.

## Diskussion

Verschiedene Autoren beschreiben den Eintrag wirtschaftlich relevanter Schadorganismen der Kartoffel in

Klärschlämme sowie die Wirkung verschiedener hygienisierender Behandlungsverfahren auf diese Pathogene. Es liegen jedoch keine gesicherten Untersuchungsergebnisse zur tatsächlichen Häufigkeit eines Eintrags bzw. des Vorkommens dieser Schadorganismen in Klärschlämmen vor. Ein solcher Eintrag ist vor allem dann zu erwarten, wenn befallene Partien in Betrieben verarbeitet werden, die ihre Abwässer in kommunale Kläranlagen einleiten. Aber auch Pack-, Wasch-, Schäl- und Sortierbetriebe können zum Eintrag der Schadorganismen in Abwasser und somit in Klärschlamm beitragen. Derartige Betriebe sind oftmals nicht amtlich erfasst, so dass die Häufigkeit eines Eintrags der Schadorganismen in Abwasser bzw. Klärschlamm schwer abzuschätzen ist.

Da demnach ein Eintrag relevanter Schadorganismen der Kartoffel in Klärschlamm nicht ausgeschlossen werden kann, ist eine hygienisierende Behandlung von Klärschlämmen vor einer landwirtschaftlichen Verwertung empfehlenswert, um eine Verbreitung dieser Schadorganismen auszuschließen. Übliche Behandlungsverfahren

**Tab. 2. Wirkung verschiedener Klärschlammbehandlungsverfahren auf die in der Richtlinie 2000/29/EG gelisteten Schadorganismen der Kartoffel und das daraus folgende Risiko einer Verbreitung mit landwirtschaftlich verwertetem Klärschlamm**

Pathogen	Behandlung	Parameter	Wirkung	Verbreitungsrisiko
<i>Globodera</i> spp.	Aerobe thermophile Stabilisierung <sup>1</sup>	1 Tag/60°C	Inaktiviert	Gering
	Mesophile anaerobe Stabilisierung <sup>1</sup>	30 Min./35°C	Inaktiviert	Gering
	Thermische Trocknung <sup>2</sup>	100 Min./100°C	Inaktiviert	Gering
	Kalkung <sup>1</sup>	pH 11,5/24 Std.	Nicht inaktiviert	Hoch
	Kompostierung <sup>3</sup>	8 Tage/max. 50°C	Inaktiviert	Gering
<i>Ralstonia solanacearum</i>	Anaerob-thermophile Stabilisierung <sup>4</sup>	1 Tag/60 C	Inaktiviert	Gering
	Mesophile Vergärung <sup>5</sup>	6 Wo./40°C	Inaktiviert	Gering
	pH-Wert-Erhöhung <sup>6</sup>	pH 12/24 Std.	Inaktiviert	Gering
<i>Clavibacter michiganensis</i> ssp. <i>sepedonicus</i>	Mesophile Vergärung <sup>7</sup>	24 Std./30–40°C	Inaktiviert	Gering
	Pasteurisierung <sup>8</sup>	90 Min./70°C	Nicht inaktiviert	Hoch
	Kompostierung <sup>8</sup>	12 Tage/max. > 60°C	Nicht inaktiviert	Hoch
<i>Synchytrium endobioticum</i>	Mesophile Vergärung <sup>9</sup>	138 Std./30–40°C	Nicht inaktiviert	Hoch
	Pasteurisierung <sup>10</sup>	90 Min./70°C	Nicht inaktiviert	Hoch
	Erhitzung <sup>10</sup>	8 Std./90°C	Nicht inaktiviert	Hoch
	Kompostierung <sup>10</sup>	12 Tage/max. > 60°C	Nicht inaktiviert	Hoch

<sup>1</sup> SPAULL et al., 1988

<sup>2</sup> MAGNUSSON et al., 2002

<sup>3</sup> BØEN et al., 2006

<sup>4</sup> RYCKEBOER et al., 2002

<sup>5</sup> TERMORSHUIZEN et al., 2003

<sup>6</sup> ELPHINSTONE, 2001

<sup>7</sup> LIEBE et al., 2012

<sup>8</sup> STEINMÖLLER et al., 2013

<sup>9</sup> SCHLEUSNER et al., 2012

<sup>10</sup> STEINMÖLLER et al., 2012

für Klärschlamm führen jedoch nur bedingt zur Abtötung der gelisteten Schadorganismen der Kartoffel oder sind zum Teil nicht hinsichtlich ihrer Wirkung auf diese Pathogene untersucht worden. Während eine Inaktivierung von *G. rostochiensis* und *R. solanacearum* durch verschiedene Methoden möglich ist, konnte für *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* ausschließlich eine Inaktivierung durch eine anaerobe Behandlung nachgewiesen werden. Für *S. endobioticum* ist in der aktuellen Literatur kein Behandlungsverfahren belegt, dass eine vollständige Inaktivierung des Schadorganismus sichert. Verschiedene widerstandsfähige Schadorganismen können übliche Hygienisierungsverfahren überstehen. So beschreiben FAYOLLE et al. (2006) zwar die Inaktivierung von *Plasmodiophora brassicae* nach sechs bis sieben Tagen Kompostierung bei Temperaturen zwischen 54 und 73 °C, YLIMÄKI et al. (1983) stellten hingegen das Überleben von *P. brassicae* nach 175 Tagen bei Durchschnittstemperaturen um 70 °C fest. Für den Erreger wird das Vorkommen von sehr temperaturstabilen Stämmen diskutiert; solche Stämme konnten von IDELMANN (2005) aber nicht nachgewiesen werden. Andere widerstandsfähige Erreger wie *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*, *F. oxysporum* f.sp. *melongenae* oder *Macrophomina phaseolina* überlebten ebenfalls eine Kompostierung bei Maximaltemperaturen über 60 °C für 21 Tage (BOLLEN et al., 1989; CHRISTENSEN et al., 2002; LODHA et al., 2002). Bei Untersuchungen zum *Tobacco mosaic virus* (TMV) konnten virulente Erreger noch nach 87 Tagen bei maximal 64 °C nachgewiesen werden (HERMANN et al., 1994). NOBLE und ROBERTS (2004) geben eine Übersicht zur Wirkung der Kompostierung auf Phytopathogene und schlussfolgern, dass widerstandsfähige Phytopathogene die Kompostierung überleben können. Auch bei anderen thermischen Verfahren kommt es nicht immer zu einer Abtötung widerstandsfähiger Pflanzenpathogene oder -samen. BLOEMHARD et al. (1992) stellten fest, dass Samen von *Abutilon theophrasti* eine Erhitzung über 100 °C für 15 Minuten überlebten. Eine deutliche Reduktion der Vitalität der Samen konnte erst bei einer Behandlung mit Dampf von 6 Minuten bei Temperaturen von 104 °C in einem Druckkessel bei 1,16 Bar erreicht werden. Nach einer anaeroben-thermophilen Stabilisierung bei konstant 68 °C konnten RYCKEBOER et al. (2002) nach 12 Tagen noch infektiöses TMV nachweisen. Auch Humanpathogene konnten durch Behandlung im thermophilen Temperaturbereich nicht immer vollständig inaktiviert werden. SCHNÜRER und SCHNÜRER (2005) stellten fest, dass hitzetolerante Pilze wie *Thermoascus crustaceus* und *Thermomyces lanuginosus* durch eine anaerobe Behandlung bei 55 °C auch nach 30 Tagen nicht vollständig abgetötet wurden. LLORET et al. (2013) konnten nach einer thermophilen anaeroben Behandlung von Klärschlamm zwar eine Reduzierung von *Escherichia coli* und *Salmonella* spp. unterhalb der Nachweisgrenze feststellen, *Clostridium perfringens* Sporen wurden aber nicht ausreichend reduziert. Erst nach einer Kombination einer mesophilen anaeroben mit einer thermophilen (anaeroben oder aeroben) Stufe wurde eine vollständige Reduktion der *C. perfringens* Sporen erreicht. PHILIPP (1988)

konnte jedoch auch nach einer Kombination von aerober thermophiler Stabilisierung und mesophiler Vergärung keine vollständig Inaktivierung von Enterobacteriaceae nachweisen (PHILIPP, 1988).

Basierend auf ihrer Studie zur Wirksamkeit von Abwasser- und Klärschlammbehandlungen auf verschiedene Humanpathogene empfehlen GODFREE und FARELL (2005) eine dreifache Absicherung, um eine Verbreitung der Pathogene über Klärschlamm auszuschließen. Eine hygienisierende Behandlung des Klärschlammes sollte durch Aufbringungsbeschränkungen auf bestimmte Anbauflächen und festgelegte Zeiträume zwischen Aufbringung und Ernte ergänzt werden. Solche Beschränkungen für die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm sind in Deutschland über verschiedene Gesetze und Verordnungen rechtverbindlich geregelt. Vor allem zur Reduzierung seuchenhygienischer Risiken sowie zur Regulierung des Stickstoffeintrages und der Schadstoffbelastung bestehen sowohl zeitliche als auch kulturbezogene Verbote und Beschränkungen zur Ausbringung der Klärschlämme. Diese sind jedoch für *G. rostochiensis*, *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* und *S. endobioticum* nicht relevant, da diese Schadorganismen lange Zeit im Boden überdauern können (TURNER, 1996; STACHEWICZ, 2003; KÄMMERER et al., 2007). Dies gilt auch für die zeitliche Trennung von Klärschlammausbringung und Anbau empfindlicher Pflanzenarten auf den entsprechenden Flächen. Vorschriften zur direkten Einarbeitung der Klärschlämme sind im Gegensatz zu humanpathogenen Organismen für pflanzenschädigende Erreger und Schädlinge nur bedingt zielführend, da die Schadorganismen durch die Einarbeitung direkt an den potentiellen Infektionsort verbracht werden.

Die Bewertung des Risikos der Verbreitung der in der 2000/29/EG gelisteten Schadorganismen der Kartoffel durch landwirtschaftlich verwertete Klärschlämme anhand von Literaturangaben ist schwierig, da viele Parameter die Bewertung eines Hygienisierungsverfahrens beeinflussen, angefangen vom Versuchsdesign bis hin zur statistischen Auswertung. So stellten CHRISTENSEN et al. (2002) bei ihren Untersuchungen zu *Escherichia coli* fest, dass eine direkte Prozessprüfung mit in den Prozess eingebrachten Organismen und eine Spot-Test-Analyse während verschiedener Zeitpunkte der Kompostierung zu unterschiedlichen Bewertungen des Hygienestatus des Komposts führen können. In einer Fabrik, die Klärschlamm gemischt mit anderen organischen Substanzen kompostierte, wurde über die Spot-Test-Analyse eine geringe Abtötung von Fäkalkeimen und *Escherichia coli* während der hygienisierenden Behandlungsphase festgestellt. Die direkte Prozessprüfung mittels Trägern eingebrachter Proben mit *Escherichia coli* ergab jedoch eine ausreichende Dekontamination in dieser Phase.

Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass bei Eintrag der in der Richtlinie 2000/29/EG gelisteten Schadorganismen der Kartoffel in Abwasser eine Kontamination der Klärschlämme und bei deren landwirtschaftlicher Verwendung auch eine Verbreitung dieser Schadorganismen erfolgen kann. Werden die Klär-

schlämme vor der landwirtschaftlichen Verwendung einem Hygienisierungsverfahren unterzogen, ist das Risiko einer Verbreitung in Abhängigkeit des Verfahrens, zumindest bei einer Kontamination mit *G. rostochiensis* oder *R. solanacearum*, nur gering. Bei einer Kontamination mit *C. michiganensis* ssp. *sepedonicus* muss von einem hohen Risiko der Verbreitung ausgegangen werden, wenn der Klärschlamm nicht durch eine anaerobe-thermophile Stabilisierung hygienisiert wurde. Für *S. endobioticum* ist es derzeit nicht möglich Behandlungsempfehlungen für Klärschlamm zu geben, die eine Abtötung der Dauersori des Erregers garantieren, so dass grundsätzlich ein hohes Risiko der Verbreitung besteht, wenn kontaminierter Klärschlamm in der Landwirtschaft verwertet wird. Wie hoch das tatsächliche Risiko eines Eintrags des Schadorganismus in Klärschlamm ist kann derzeit noch nicht mit Daten belegt werden. Eine Kontamination landwirtschaftlicher Flächen mit *S. endobioticum* hat eine Anbauperre für Kartoffeln auf diesen Flächen für mindestens 20 Jahre zur Folge. Erst nach diesem Zeitraum kann eine Testung der Flächen auf vitale Dauersori des Erregers und eine eventuelle Freigabe der Fläche für den Anbau von Kartoffeln erfolgen. Eine teilweise Freigabe für den Anbau von Speisekartoffelsorten, die Resistenzen gegen den vorkommenden Pathotyp aufweisen, ist erstmalig nach 10 Jahren möglich (EPPO, 1999). Um eine Verbreitung insbesondere von *S. endobioticum* mit Klärschlamm zu verhindern, sollte auf eine Einleitung risikoreicher Abwässer, wie beispielsweise solcher aus der Kartoffelverarbeitung, in kommunale Kläranlagen bzw. auf eine Verwendung von Klärschlämmen in der Landwirtschaft verzichtet werden, wenn diese aus risikoreichen Abwässern generiert wurden.

## Literatur

- ANONYM, 1986: Richtlinie 86/278/EWG des Rates vom 12. Juni 1986 über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft. Amtsblatt Nr. L 181 vom 04/07/1986 S. 0006-0012.
- ANONYM, 1992: Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 12 G v. 24.2.2012 I 212.
- ANONYM, 1998: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV). Vom 21. September 1998. BGBl. I:2955, zuletzt geändert durch Art. 5 V v. 5.12.2013 I 4043.
- ANONYM, 2000: Richtlinie 2000/29/EG des Rates vom 8. Mai 2000 über Maßnahmen zum Schutz der Gemeinschaft gegen die Einschleppung und Ausbreitung von Schadorganismen der Pflanzen und Pflanzenerzeugnisse. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 169 vom 10. Juli 2000. S. 1, zuletzt geändert durch Verordnung 652/2014 vom 15. Mai 2014.
- ANONYM, 2001: Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction. European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, 2001, L-2985 Luxembourg, ISBN 92-894-1734-X.
- ANONYM, 2010: Economic and social impacts of the use of sewage sludge on land, Final Report. Part I: Overview Report, Milieu Ltd, WRC and RPA for the European Commission, DG Environment under Study Contract DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r, 20 S.
- ANONYM, 2012: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S. 1324).
- ARTHURSON, V., 2008: Proper Sanitization of Sewage Sludge: a Critical Issue for a Sustainable Society. Applied Environmental Microbiology 74 (17), 5267-5275.
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung e.V.), 1986: Entseuchung von Klärschlamm. Erster Arbeitsbericht der ATV/VKS-Arbeitsgruppe 3.2.2, ATV Arbeitsberichte 11/86, 1141-1142.
- ATV, 1988: Entseuchung von Klärschlamm. Zweiter Arbeitsbericht der ATV/VKS-Arbeitsgruppe 3.2.2, ATV Arbeitsberichte 1/88, 71-74.
- BIBBY, K, J. PECCIA, 2013: Identification of Viral Pathogen Diversity in Sewage Sludge by Metagenome Analysis. Environmental Science & Technology 47 (4), 1945-1951.
- BLOEMHARD, C.M.J., M.W.M.F. ARTS, P.C. SCHEEPENS, A.G. ELEMA, 1992: Thermal inactivation of weeds seeds and tubers during drying of pig manure. Netherlands Journal of Agricultural Science 40, 11-19.
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit), 2014: Klärschlamm-Statistik. [http://www.bmubund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/klaerschlamm/\(Stand 18.09.2014\)](http://www.bmubund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/klaerschlamm/(Stand%2018.09.2014)).
- BØEN, A., B. HAMMERAAS, C. MAGNUSSEN, R. AASEN, 2006: Fate of the potato cyst nematode *Globodera rostochiensis* during composting. Compost Science & Utilization 14 (2), 142-146.
- BÖHM, R., 2007: Seuchenhygienische Anforderungen an organische Düngemittel – Schwerpunkt kommunale Klärschlämme. In: Perspektiven der Klärschlammverwertung – Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung. KTBL-Schrift 453, 41-55.
- BOLLEN, G.J., D. VOLKER, A.P. WILJEN, 1989: Inactivation of soilborne pathogens during small-scale composting of crop residues. Netherlands Journal of Plant Pathology 95 (1), 19-30.
- BREITENBÜCHER, K., 1983: Aerob-thermophile Stabilisierung von Abwässerschlämmen. Hohenheimer Arbeiten, Schriftenreihe der Universität Hohenheim, Reihe Agrartechnik, Heft 125, Hrsg. E. Moser, Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer, 155 S.
- BRÖTHER, H., 2002: Übertragungsmöglichkeiten von bakteriellen Quarantänekrankheiten durch Abprodukte der Kartoffelverarbeitung. Wintertagung der AG Kartoffelzüchtung und Pflanzguterzeugung am 20./ 21. November 2002, Göttingen.
- CARRINGTON, E.G., 2001: Evaluation of Sludge Treatments for Pathogen Reduction – Final Report. Report No.: CO5026/1, Study Contract No B4-3040/2001/322179/MAR/A2 for the European Commission Directorate-General Environment, 44 pp.
- CHRISTENSEN, K.K., M. CARLSBAEK, E. KRON, 2002: Strategies for evaluating the sanitary quality of composting. Journal of Applied Microbiology 92, 1143-1158.
- CHYTIL, K., 1986: Untersuchungen zur Verschleppung von Ackerunkräutern, insbesondere durch Müllkomposte und Klärschlämme. Veröffentlichungen der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein (6). Dissertation, S. 136.
- DICKENS, J.S.W., A.J. WRIGHT, P.J. REED, 1995: Survival of *Polymyxa betae* during processing of vegetables and sugarbeet. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin 25, 673-679.
- DOROSHKIN, N.A., 1955: Der Kartoffelkrebs. Russ. Bolezni Kartoflja, Minsk. 41-67. Zitiert nach LANGERFELD (1984).
- DWA, 2005: Merkblatt DWA-M 753 Abwasser aus der Kartoffelverarbeitung. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- EFREMENTKO, T.S., V.A. YAKOVLEVA, 1981: Destruction of *Synchytrium endobioticum* (Schilb.) Perc. in waste products of potato processing industries. Russ. Mikologija i Fitopatologija 15, 501-504.
- EL-NAIM, M.A., M. EL-HOUSSEINI, M.H. NAEEM, 2004: Safety use of sewage sludge as soil conditioner. Journal of environmental Science and Health. Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering A 39 (2), 435-444.
- ELPHINSTONE, J., 2001: Monitoring and control of the potato brown rot. Information des British Potato Council, 2001.
- EPPO (European and Mediterranean Plant protection Organization), 1999: PM 3/59 (1), Phytosanitary Procedures, *Synchytrium endobioticum*: Soil tests and descheduling of previously infested plots. OEPP Bulletin/EPPO Bulletin 29 (3), 225-231.
- FAYOLLE, L., R. NOBLE, E. COVENTRY, S. AIME, C. ALABOUVETTE, 2006: Eradication of *Plasmodiophora brassicae* during composting of wastes. Plant Pathology 55, 553-558.
- GERBA, C.P., Jr. J.E. SMITH, 2005: Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes. Journal of Environmental Quality 34, 42-48.
- GODFREE, A., J. FARELL, 2005: Processes for managing Pathogens. Journal of Environmental Quality 34 (1), 105-113.
- GRACZYK, T.K., M. KACPRZAK, E. NECZAJ, L. TAMANG, H. GRACZYK, F.E. LUCY, A.S. GIROUARD, 2008: Occurrence of *Cryptosporidium* and *Giardia* in sewage sludge and solid waste landfill leachate and quantitative comparative analysis of sanitization treatments on pathogen inactivation. Environmental Research 106, 27-33.

- HERMANN, I., S. MEISSNER, E. BÄCHLE, E. RUPP, G. MENKE, 1994: Einfluss des Rotteprozesses von Bioabfall auf das Überleben von phytopathogenen Organismen und von Tomatensamen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz **101**, 48-65.
- IDELMANN, M., 2005: Hygienisierung von Kompost. Möglichkeiten zum Nachweis einer erfolgreichen Abtötung von Pathogenen und Unkrautsamen. Dissertation. Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Arnd I. Urban, Kassel.
- JEBRI, S., J. JOFRE, I. BARKALLAH, M. SAIDI, F. HMAIED, 2012: Presence and fate of coliphages and enteric viruses in three wastewater treatment plants effluents and activated sludge from Tunisia. Environmental Science and Pollution Research **19**, 2195-2201.
- KÄMMERER, D., L. SEIGNER, G. POSCHENRIEDER, M. ZELLNER, M. MUNZERT, 2007: Epidemiology of bacterial ring rot of potato in plant and soil – consequences for disease management. Journal of Plant Diseases and Protection **114** (4), 159-166.
- KLAGES, S., U. SCHULTHEISS, T. FREI, C. BECKER, H. DÖHLER, U. SCHNEIDER, B. HABERKERN, 2009: Anforderungen an die Novellierung der Klärschlammverordnung unter besonderer Berücksichtigung von Hygieneparametern. Forschungsbericht 20633202, UBA-FB 001245, Hrsg. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 99 S.
- LEBSCHER, R., U. LOLL, 1996: ATV-Handbuch Klärschlamm. Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften.
- LIEBE, S., P. MÜLLER, M. BANDTE, M. HEIERMANN, C. BÜTTNER, 2012: Überlebensfähigkeit von *Clavibacter michiganensis* ssp. *sepedonicus* in der anaeroben Vergärung. Tagungsband Deutsche Pflanzenschutztagung „Pflanzenschutz – alternativlos“, 10.-14. September 2012, Braunschweig, Julius-Kühn-Archiv **438**, 62.
- LORET, E., M.J. SALAR, J. BLAYA, J.A. PASCUAL, 2013: Two-stage mesophilic anaerobic-thermophilic digestion for sludge sanitation to obtain advanced treated sludge. Chemical Engineering Journal **230**, 59-63.
- LODHA, S., S.K. SHARMA, R.K. AGGARWAL, 2002: Inactivation of *Macrophomina phaseolina* propagules during composting and effect of composts on dry root severity and on seed yield of clusterbean. European Journal of Plant Pathology **108**, 253-261.
- LÜCKE, E., 1965: Untersuchungen über die Verschleppung zystenbildender Nematodenarten durch landwirtschaftliche Abwasser-Verwertung. Gesunde Pflanze **17** (5), 83-87.
- MAGNUSON, C., P. SAGBERG, B. HAMMERAAS, 2002: Sanitation efficacy of a combined thermal filter press and vacuum dryer on potato cyst nematode and wild oat in the production of VEAS-Biosolids. Nematology **4** (2), 304.
- MIKKELSEN, L., J. ELPHINSTONE, D.F. JENSEN, 2006: Literature review on detection and eradication of plant pathogens in sludge, soils and treated biowaste. Deskstudy on bulk density. HORIZONTAL-HYG DL 2/5 Report – SSPI-CT-2004-513660. Horizontal Standards on Hygienic Microbiological parameters for Implementation of EU Directives on Sludge, Soil and Treated Biowastes. 53 pp.
- MÖLLER, U., 1988: Entseuchung von Klärschlamm – Eine Standortbestimmung 1987. Korrespondenz Abwasser Nr. 1, 24-30.
- NOBLE, R., S.J. ROBERTS, 2004: Eradication of plant pathogens and nematodes during composting: a review. Plant Pathology **53**, 548-568.
- PARKINSON N., R. BRYANT, J. BEW, C. CONYERS, R. STONES, M. ALCOCK, J. ELPHINSTONE, 2013: Application of Variable-Number Tandem-Repeat Typing To Discriminate *Ralstonia solanacearum* Strains Associated with English Watercourses and Disease Outbreaks. Applied and Environmental Microbiology **79** (19), 6016-6022.
- PHILIPP, W., 1988: Aerob-thermophile Schlammstabilisierung mit anschließender Faulung – Hygiene. In: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e.V. (Hrsg.), Bericht des 2. Hohenheimer Seminars „Entseuchung von Klärschlamm“, Erfahrungsberichte aus der Praxis, 134-146.
- PRZEWROCKI, P., J. KULCZYCKA, Z. WZOREK, Z. KOWALSKI, K. GORAZDA, M. JODKO, 2003: Risk analysis of sewage sludge – Poland and EU Comparative Approach. Polish Journal of Environmental Studies **13** (2), 237-244.
- RETZER, M., R. BURCKHARDT, L. SEIGNER, G. POSCHENRIEDER, 2006: *Ralstonia solanacearum* Biovar 2/Rasse 3 (Erreger der Schleimkrankheit der Kartoffel) in Oberflächengewässern und *Solanum dulcamara* – Ergebnisse eines mehrjährigen Monitorings in Bayern. Gesunde Pflanzen **58**, 12-17.
- RYCKEBOER, J., S. COPS, J. COOSEMANS, 2002: The fate of plant pathogens and seeds during anaerobic digestion and aerobic composting of source separated household wastes. Compost Science & Utilization **10** (3), 204-216.
- SCHLEUSNER, Y., M. GOSSMANN, M. BANDTE, C. BÜTTNER, 2012: Inaktivierung von Phytopathogenen während der anaeroben Vergärung in Biogasanlagen anhand ausgewählter Fallbeispiele. Tagungsband Deutsche Pflanzenschutztagung „Pflanzenschutz – alternativlos“, 10.-14. September 2012, Braunschweig, Julius-Kühn-Archiv **438**, 61.
- SCHNÜRER, A., J. SCHNÜRER, 2005: Fungal survival during anaerobic digestion of organic household waste. Waste Management **26**, 1205-1211.
- ŠEDIVÝ, J., 1966: Die Zysten des Kartoffelnematoden (*Heterodera rostochiensis* Wollenweber) in den Klärteichen der Stärkefabriken. Nachrichtenblatt für den Deutschen Pflanzenschutzdienst in der DDR **20**, 11-13.
- SPAULL, A.M., D.M. MCCORMACK, 1988: The incidence and survival of potato cyst nematodes (*Globodera* spp.) in various sewage sludge treatment processes. Nematologica **34**, 452-461.
- SPAULL, A.M., D.M. MCCORMACK, E.B. PILE, 1988: Effects of various sewage sludge treatment processes on the survival of potato cyst nematodes (*Globodera* Spp.) and the implications for disposal. Water Science and Technology **21**, 909-916.
- SPRAU, F., 1967: Das Verhalten von Zysten des Kartoffelnematoden in Kläranlagen. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem **121**, 39-44.
- STACHEWICZ, H., 2003: Auf Befall mit Kartoffelkrebs achten. Kartoffelbau **54** (5), 200-203.
- STEINMÖLLER, S., P. MÜLLER, M. PIETSCH, 2007: Phytohygienische Anforderungen an Klärschlämme-Regelungsnotwendigkeiten und -möglichkeiten. In: Perspektiven der Klärschlammverwertung – Ziele und Inhalte einer Novelle der Klärschlammverordnung. KTBL-Schrift **453**, 2007, 56-67.
- STEINMÖLLER, S., M. BANDTE, C. BÜTTNER, P. MÜLLER, 2012: Effects of sanitation processes on survival of *Synchytrium endobioticum* and *Globodera rostochiensis*. European Journal of Plant Pathology **133**(3), 753-763.
- STEINMÖLLER, S., P. MÜLLER, M. BANDTE, C. BÜTTNER, 2013: Risk of dissemination of *Clavibacter michiganensis* ssp. *sepedonicus* with potato waste. European Journal of Plant Pathology **137**, 573-584.
- STELTER, H., 1981: Die Verschleppung von Heterodera- und Globodera-Arten mit dem Abwasser aus einer Zuckerfabrik. Nachrichtenblatt für den Pflanzenschutzdienst in der DDR **35** (2), 36-38.
- STEVENS, P., J.D. VAN ELSAS, 2010: Genetic and phenotypic diversity of *Ralstonia solanacearum* biovar 2 strains obtained from Dutch waterways. Antonie van Leeuwenhoek **97** (2), 171-188.
- TERMORSHUIZEN, A.J., D. VOLKER, W.J. BLOK, E. TEN BRUMMELER, B.J. HARTOG, J.D. JANSE, W. KNOL, M. WENNEKER, 2003: Survival of human and plant pathogens during anaerobic mesophilic digestion of vegetable, fruit, and garden waste. European Journal of Soil Biology **39**, 165-171.
- TOJO, M., K. OSHIMAN, 2000: Detection of *Phytium aphanidermatum* in sludge from drinking-water plant. Journal of General Plant Pathology **66**, 285-288.
- TURNER, J., D.A. STAFFORD, D.E. HUGHES, J. CLARSON, 1983: The reduction of three plant pathogens (*Fusarium*, *Corynebacterium* and *Globodera*) in anaerobic digesters. Agricultural wastes **6**, 1-11.
- TURNER, J., 1996: Population decline of potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis*, *G-pallida*) in field soils in Northern Ireland. Annals of Applied Biology **129**, 315-322.
- UNGER, J., M. PIETSCH, 2001: Pflanzengesundheitliche Risiken von Klärschlamm, Kompost und anderen organischen Düngern. IN: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes. KTBL-Schrift **404**, 323-333.
- WIEDEMANN, W., O. ENDERLEIN, 2004: Dekontamination von bakterielle Ringfäule-infizierten Speisekartoffelpartien durch mesophile Anaerobbehandlung in Biogasanlagen. (Abschlussbericht). Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 31 S.
- YLIMÄKI, A., A. TOIVAINEN, H. KALLIO, E. TIKANMÄKI, 1983: Survival of some plant pathogens during industrial-scale composting of wastes from a food processing plant. Annales Agriculturae Fenniae **22**, 77-85.