

Potentiële fysische behandelingen van aardappelpootgoed voor de eliminatie van plaagorganismen en ziekteverwekkers

Literatuurstudie

Auteurs: L.H. Stevens en J. van der Wolf

Voorwoord

Deze literatuurstudie is gemaakt op verzoek van de projectcommissie "Plan van aanpak Erwinia" en "Stuurgroep Plan van Aanpak Meloidogyne" waarin vertegenwoordigers zitten van de pootgoed- en consumptieteelt, BO Akkerbouw, LTO-Nederland, Nederlandse Vakbond en NAO.

De studie vormt de eerste fase van een topsector project, nl. PPS "Fysische behandeling van aardappel pootgoed tegen ziekteverwekkers" (LWV19017), waarin ook het handelshuis Agrico en de Nederlandse Aardappel Organisatie partners zijn.

We danken de opdrachtgevers voor het tot stand komen van dit project en BO Akkerbouw voor de financiële bijdrage (afkomstig uit overgedragen middelen van het voormalige Productschap Akkerbouw).



Inhoud

1 Inleiding	4
1.1 Achtergrond en doelstelling	4
1.2 Aanpak en afbakening	4
2. Resultaten	7
2.1 Fysische behandelmethoden voor uitwendige desinfectie van plantaardig materiaal	7
2.1.1 Inleiding	7
2.1.2 Wassen	8
2.1.3 Temperatuur	8
2.1.4 Ioniserende straling	8
2.1.5 UV-licht en pulsed light	9
2.1.6 Ultrasonische golven	9
2.1.7 Koud plasma	10
2.1.8 Hoge hydrostatische druk (high-pressure processing)	11
2.1.9 Gepulseerde elektrische hoogspanning (<i>Pulsed electric field</i>)	12
2.1.10 Magnetisch veld	12
2.1.11 Superkritische CO ₂	13
2.2 Effecten van fysische ontsmettingsmethoden op de relevante micro-organismen en aaltjes	14
2.2.1 Inleiding	14
2.2.2 Thermische ontsmetting	14
2.2.3 Ioniserende straling	16
2.2.4 UV-licht en pulsed light (PL)	17
2.2.5 Ultrasonische golven	18
2.2.6 Koud plasma	19
2.2.7 Hoge hydrostatische druk (high-pressure processing)	19
2.2.8 Gepulseerde elektrische hoogspanning (<i>Pulsed electric field</i>)	19
2.2.9 Magnetisch veld	20
2.2.9 Superkritische CO ₂	20
2.3 Effecten van fysische ontsmettingsmethoden op prestaties van aardappelpootgoed	21
2.3.1 Inleiding	21
2.3.2 Thermische behandelingen	21
2.3.3 Ioniserende straling	21
2.3.4 UV-licht en pulsed light (PL)	22
2.3.5 Ultrasonische trillingen	22
2.3.6 Koud plasma	22
2.3.7 Hoge hydrostatische druk (high-pressure processing)	23
2.3.8 Gepulseerde elektrische hoogspanning (<i>Pulsed electric field</i>)	23
2.3.9 Magnetisch veld	23

2.3.10 Superkritische CO ₂	24
3 Conclusies.....	24
3.1 Inleiding.....	24
3.2 Thermische behandelingen.....	25
3.3 Ioniserende straling.....	25
3.4 UV-licht en <i>pulsed light</i>	25
3.5 Ultrasonische golven.....	25
3.6 Koud plasma.....	25
3.7 Hoge hydrostatische druk.....	25
3.8 Elektrische hoogspanningspulsen.....	26
3.9 Magnetisch veld.....	26
3.10 Superkritische CO ₂	26
3.11 Combinatie van fysische desinfectiemethoden.....	26
4 Literatuur.....	28

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en doelstelling

Het gebruik van ziektevrij, vitaal en weerbaar plantaardig uitgangsmateriaal is cruciaal voor duurzame landbouwproductie. Soms zijn besmettingen van uitgangsmateriaal met ziekteverwekkers of plaagorganismen praktisch onvermijdelijk. Schade kan dan beperkt worden door het uitgangsmateriaal te ontsmetten, wat feitelijk neerkomt op doding en/of verwijdering van de schadelijke organismen of infectieuze deeltjes. Hiertoe kan het besmette uitgangsmateriaal onderworpen worden aan biologische, chemische, of fysische behandelingen. Fysische methoden hebben als belangrijke voordelen dat de werking niet afhankelijk is van een levend organisme of van virussen of bacteriofagen (zoals bij biologische bestrijding), en er geen milieubelastende en gezondheidsschadelijke residuen achterblijven (zoals bij chemische bestrijding). Bovendien hebben fysische behandelingen in beginsel geen wettelijke toelating nodig, en vergen ze dus geen (kostbare) registratie, wat bij chemische, en vaak bij biologische middelen wel het geval is. Bijkomend voordeel is dat fysische methoden tot (gedeeltelijke) sterilisatie van oppervlakken leidt, wat mogelijkheden vergroot voor het eventuele aanbrengen van micro-organismen die tegen ziekten bescherming bieden (microbiële buffering). Voor alle typen van ontsmettingsmethoden geldt in beginsel dat micro-organismen er resistentie tegen kunnen ontwikkelen.

Aardappelpootgoed is plantaardig uitgangsmateriaal dat bescherming behoeft tegen met name microbiële pathogenen en bodemaaltjes. De verliezen voor de pootgoedsector door infecties met zachtrot bacteriën die behoren tot de geslachten *Dickeya* en *Pectobacterium* belopen jaarlijks naar schatting 20 tot 30 miljoen Euro. Ook ziekten veroorzaakt door schimmelpathogenen leiden tot grote verliezen, hoewel deze voor zo ver wij weten nooit gekapitaliseerd zijn. Een behandelingsmethode waarmee effectief verschillende soorten ziekteverwekkers tegelijk geëlimineerd kunnen worden is daarom van groot belang, niet alleen voor de pootgoed- maar ook voor de consumptieteelt. Door het wegvallen van gewasbeschermingsmiddelen die gebruikt mogen worden voor de behandeling van pootgoed, zoals het fungicide imazalil in de consumptieteelt, is de urgentie voor alternatieven in de vorm van fysische behandelingen sterk toegenomen. Met fysische behandeling van aardappelknollen zijn al bemoedigende resultaten geboekt. Zo resulteerde behandeling van aardappelpootgoed met stoom in een sterke reductie van een aantal bacterie- en schimmelziekten zonder dat dit de vitaliteit van het pootgoed aantastte (Afeh and Orenstein, 2002). Afgaande op ontsmettingstechnieken die bijvoorbeeld bekend zijn uit de levensmiddelentechnologie en de medische sector zijn er in beginsel meer fysische behandelmethoden van pootgoed denkbaar. Het doel van deze literatuurstudie is het maken van een inventarisatie van bekende fysische behandelmethoden die mogelijk geschikt zijn voor de desinfectie van aardappelpootgoed.

1.2 Aanpak en afbakening

Om binnen de gegeven projectruimte tot een zo volledig mogelijke inventarisatie van potentiële fysische behandelingen te komen, werd achtereenvolgens antwoord gezocht op de volgende drie vragen.

1. Welke fysische ontsmettingsbehandelingen bestaan er?
2. Welke daarvan komen in aanmerking omdat ze effectief zijn tegen de betreffende ziekten en plagen?
3. Welke daarvan komen in aanmerking omdat ze de kwaliteit en prestatie van het uitgangsmateriaal niet aantasten?

Ter beantwoording van deze vragen werd systematisch gezocht naar relevante literatuur (1945 tot heden). Hiertoe werd de zoekmachine van *Web of Science* (Clarivate Analytics) gebruikt, waarmee de online databestanden van de *Web of Science Core Collection* werden geraadpleegd, die betrekkelijk volledig *peer reviewed* literatuur, conferentie-*proceedings* en boeken in de relevante wetenschapsgebieden¹ afdekt. Voor elke zoekopdracht werden geschikte Engelstalige zoektermen ingevoerd en zoekvelden aangeklikt. Bij een te omvangrijk zoekresultaat (aantal publicaties) werden de

¹ *Web of Science Core Collection* omvat databestanden met meer dan 21.000 *peer-reviewed*, hoogwaardige wetenschappelijke tijdschriften die wereldwijd worden gepubliceerd (inclusief Open Access-tijdschriften), meer dan 205.000 conferentie-*proceedings*, en meer dan 104.000 redactioneel geselecteerde boeken; de databestanden betreffen exacte wetenschappen en overige disciplines en gaan deels terug tot ongeveer het jaar 1900 (zie voor details <http://wokinfo.com/>).

zoekopdrachten aangescherpt. De aangetroffen publicaties werden op basis van de titel en/of abstract op relevantie beoordeeld.

Om een indruk te verkrijgen van beschikbare literatuur over **ontsmetting** van **aardappelen** werd met de zoekmachine van *Web of Science* (zoekveld: 'topic'² ; timespan: 1945-2019; database: *Web of Science Core Collection*) de literatuur doorzocht met verschillende Engelstalige zoektermen voor 'ontsmetting', namelijk: 'decontamination', 'disinfection' en 'sterilization' en 'pasteurization'. De zoekopdracht 'decontamination OR disinfection OR sterilization OR pasteurization' leverde 75 026 publicaties op. Hieruit werd vervolgens een selectie gemaakt met de additionele zoekopdracht 'potato*' (zoekveld: 'topic'), wat 291 artikelen opleverde. Op basis van de titels en samenvattingen werd vastgesteld dat van deze artikelen er slechts acht een feitelijke studie behelsden naar fysische ontsmetting van aardappelweefsel, namelijk één over inactivering van *Salmonella* op aardappel middels *cold atmosphere plasma* (Fernandez et al., 2013), één over hitte inactivering van *Listeria* op aardappel (Gaze et al., 2006), één over inactivering van wolluis middels ioniserende straling, (Seth et al., 2016), één over desinfectie van consumptieaardappelen middels toepassing van O₃ en UV-straling als onderdeel van de zogenoemde Ventafresh technologie (Steffen et al., 2010), één over het inactiveren van *Salmonella* op plantaardig weefsel waaronder dat van aardappel middels ultrasone golven (Tan et al., 2017), één over desinfectie van zaden en kiemremming van pootaardappelen middels bestraling met elektronen (Todoriki and Hayashi, 2000), één over de bactericide werking tegen *Salmonella* van *nonthermal low-pressure oxygen plasma* op de oppervlakken van groenten en fruit, waaronder aardappel (Zhang et al., 2013), en één over inactivering van *Erwinia* op aardappelen middels temperatuurbehandeling (Robinson and Foster, 1987). Relevant zijn voorts twee studies naar de dodelijke effecten van *gliding arc discharge plasma* op cultures van *Erwinia* soorten (Moreau et al., 2005; Moreau et al., 2008). Uit deze exercitie kan geconcludeerd worden dat er weliswaar veel informatie over desinfectiemethoden beschikbaar is, maar dat het aantal studies specifiek gericht op desinfectie van aardappelknollen betrekkelijk gering is.

De eerste stap in deze studie (beantwoording van vraag1) is het opstellen van een lijst van fysische ontsmettingsbehandelingen. Fysisch betekent hier: niet-chemisch en niet-biologisch, dus zonder toepassing van chemische reagentia of levende organismen. Buiten de studie vallen ook fysische behandelingen die uit toegevoegde stoffen chemisch reactieve deeltjes doen ontstaan die op hun beurt de desinfectie bewerkstelligen, zoals bijvoorbeeld het geval is bij *electrolysed water* of bij fotocatalyse of fotodynamische inactivatie. Ontsmetting wordt hier opgevat in de beperkte zin van desinfectie, namelijk verwijdering en/of doding van pathogenen en plaagorganismen; verwijdering van gevaarlijke stoffen, pesticiden of residuen daarvan, hoort daar niet bij. Het beoogde object van desinfectie is de buitenkant van aardappelpootgoed, waaronder ook uitwendige fysieke niches waarin micro-organismen zich schuil kunnen houden (lenticellen, kiemen, wonden, scheuren, verkurkte schil, oneffenheden); deze kunnen de effectiviteit van desinfectie sterk verminderen. Buiten het bestek van deze studie valt verwijdering of doding van micro-organismen die zich inwendig (bijvoorbeeld vasculair) in de knol ophouden. In beginsel zoeken we dus naar fysische behandelingen waarmee desinfectie van oppervlakken van plantaardige objecten bereikt kan worden. Afhankelijk van de omstandigheden kunnen de behandelingen in meer of mindere mate desinfectie bewerkstelligen, variërend van volledige eliminatie (niet-detecteerbare hoeveelheden) tot vermindering van enkele log-eenheden *colony forming units* (CFU) pathogeen per oppervlakte-eenheid³. Het aantal CFU van de meeste microbiële ziekteverwekkers op aardappelknollen vertoont een positieve dosis-respons-relatie met de knolaantasting (Naz et al., 2008; van der Wolf et al., 2017). Dit betekent dat volledige eliminatie van het pathogeen niet noodzakelijk is om toch een significante vermindering van de ziekte incidentie te bereiken.

De fysische ontsmettingsbehandelingen werden vervolgens nader onderzocht op mogelijke effectiviteit tegen de relevante pathogenen en bodemaaltjes (beantwoording van vraag 2). Omdat het hier om aardappelpootgoed gaat, betreft het primair de bacteriën, schimmels en aaltjes (wortelknobbel-, wortellesie-, stengel- en cysteaaltjes) die opgesomd zijn in tabel 1. Merk op dat het niet om virale infecties gaat.

Behandelingen kunnen effectief zijn tegen de doelorganismen, maar tegelijk de kwaliteit van het pootgoed aantasten. Daarom is geprobeerd op basis van literatuurgegevens een inschatting te maken of

² Het zoekveld 'topic' omvat *title*, *abstract*, *author keywords*, en *Keywords Plus*

³ Een CFU-vermindering ter grootte van 1 log betekent een vermindering van 90% CFU.

de prestaties van het pootgoed te lijden hebben onder de mogelijke behandelingen (beantwoording van vraag 3).

Tabel 1.1. Doelorganismen van de beoogde ontsmettingsbehandelingen van aardappelpootgoed.

<i>Bacterieel pathogeen</i>	<i>Schimmelpathogeen</i>	<i>Aaltjes</i>
<i>Dickeya</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	<i>Meloidogyne chitwoodi</i>
<i>Pectobacterium</i>	<i>Helminthosporium solani</i>	<i>Meloidogyne falax</i>
<i>Ralstonia solani</i>	<i>Colletotrichum coccodes</i>	<i>Pratylenchus penetrans</i>
<i>Clavibacter sepedonicus</i>	<i>Fusarium sp.</i>	<i>Ditylenchus destructor</i>
<i>Streptomyces scabies</i>		<i>Globodera rostochiensis</i>
		<i>Globodera pallida</i>

2. Resultaten

2.1 Fysische behandelmethoden voor uitwendige desinfectie van plantaardig materiaal

2.1.1 Inleiding

Om een zo volledig mogelijk overzicht te verkrijgen van bestaande fysische ontsmettingsmethoden werd met de zoekmachine van *Web of Science* (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: *Web of Science Core Collection*) de literatuur doorzocht op het onderwerp '**ontsmetting**' (zoekopdracht: 'decontamination OR disinfection OR sterilization OR pasteurization'). Uit de ruim 75 duizend publicaties werden de **overzichtsartikelen** geselecteerd (document type 'review'), wat het aantal hits verkleinde tot 4380. Deze selectie werd vervolgens verder ingeperkt tot de relevante **landbouwkundige en plantkundige vakgebieden** (*Web of Sciences categories*: Agricultural engineering OR Horticulture OR Agriculture multidisciplinary OR Agronomy OR Plant Sciences) en **voedsel en microbiologisch gerelateerde vakgebieden** (*Web of Sciences categories*: Food science technology OR Microbiology OR Biotechnology applied microbiology). Dit leverde 1024 hits op. Op basis van de titels en de samenvattingen (abstracts) werd geoordeeld dat van deze 1024 overzichtsartikelen er 222 voor deze studie potentieel relevant zijn. Het betrof publicaties waarin de stand van zaken van dat moment van één specifieke fysische ontsmettingstechniek, of van fysische ontsmettingstechnieken in het algemeen besproken wordt. De te ontsmetten objecten betreffen uiteenlopende zaken als bewerkte voedingsmiddelen, groenten en fruit, granen, zaden, noten, vlees, vis, lucht, melk, vruchtensappen, dode oppervlakken, ziekenhuizen, tanden. Tabel 1 geeft een overzicht van de aangetroffen fysische ontsmettingstechnieken in volgorde van de frequentie waarin ze in het totaal van 222 titels of abstracts genoemd worden. Merk op dat ontsmetting met *electrolysed water* (methode 10 uit Tabel 1) toevoeging van chemicaliën vereist waaruit reactieve chemische verbindingen gegenereerd worden en daarom buiten het bestek van deze studie valt. Hetzelfde geldt voor de gangbare toepassingen van *photosensitization* (methode 7 uit Tabel 1) omdat hierbij lichtgevoelige stoffen toegevoegd worden die middels bestraling met energierijke golflengten fotokatalytisch tot reactieve verbindingen worden omgezet, die op hun beurt de desinfecterende werking uitvoeren. Op dit laatste bestaat echter een vermeldenswaardige uitzondering. Betrekkelijk recent is namelijk aangetoond dat endogene intercellulaire porfirine moleculen (die dus niet toegevoegd hoeven te worden) onder blauw licht (405 nm) een zuurstofafhankelijke excitatie kunnen ondergaan en in die geëxciteerde staat met zuurstof en celcomponenten reactieve zuurstofdeeltjes genereren, die schade en uiteindelijk microbiële celdood kunnen veroorzaken. Hoewel de desinfecterende werking geringer is dan dat van UV-licht, maakt de veiligheid van deze techniek toepassingen in de medische sector aantrekkelijk (zie voor review-artikelen van deze technologie (Halstea et al., 2016; Maclean et al., 2014). In dit hoofdstuk wordt uitgelegd wat de overige fysische ontsmettingsmethoden uit Tabel 1 behelzen.

Tabel 1 (Semi-)fysische ontsmettingstechnieken genoemd in titel of abstract van de als mogelijk relevant aangemerkte overzichtsartikelen.

Ontsmettingsmethode	
1	Koud plasma technologie
2	Hoge hydrostatische druk
3	Ultrageluid
4	Verhoogde temperatuur, incl stoom, <i>ohmic heating</i> , microwave
5	UV-licht
6	<i>Pulsed light</i>
7	Fotocatalyse: fotodynamische inactivatie (photosensitization)
8	Ioniserende straling (gamma-rays, electron beam, X-rays)
9	Electrische veldpulsen
10	<i>Electrolysed water</i>
11	Superkritische kooldioxide behandeling
12	Wassen
13	Magnetisch veld

2.1.2 Wassen

Het louter wassen van producten met water resulteert doorgaans hooguit in verwijdering, dus niet in doding of inactivatie van micro-organismen. Een studie naar de effectiviteit van kraanwater op de oppervlakkige ontsmetting van groene peper wees uit dat hiermee een relatief geringe reductie van 2.5 log cfu/g voor *Escherichia coli* bereikt kan worden bij onbeschadigd plantoppervlak, en 1.5 log cfu/g bij beschadigd plantweefsel (Han et al., 2000).

2.1.3 Temperatuur

Blootstelling aan warmte is inmiddels een klassieke fysische ontsmettingsmethode (commerciële pasteurisatie van melk dateert van circa 1882; Currier and Widness, 2018). De meeste kennis over thermische ontsmetting komt uit de voedingsmiddelenindustrie en is gericht op voedselveiligheid en het verlengen van de bewaartijd van bewerkte en onbewerkte producten (zoals verse groenten en fruit). Daarnaast is er kennis beschikbaar uit onderzoek naar de thermische ontsmetting van plantaardig uitgangsmateriaal, met name zaaigoed. Het werkingsprincipe van thermische ontsmetting is denaturatie van vitale eiwitten, beschadiging van de celmembranen en beschadiging van DNA (Van Impe et al., 2018). De combinatie van temperatuur en blootstellingsduur die nodig is voor een effectieve desinfectie wordt sterk bepaald door de eigenschappen van het betreffende micro-organisme en het ontwikkelingsstadium of de overlevingsstructuur waarin ze op het moment van desinfectie verkeert; met name sporen bieden relatief goede bescherming tegen hoge temperaturen (Malek, 2019). Thermische ontsmetting is meestal effectiever onder zure- dan onder neutrale of basische condities. Vanzelfsprekend speelt ook de efficiëntie waarmee de omgeving de warmte aan de micro-organismen kan overdragen een belangrijke rol (Van Impe et al., 2018). Hitte-stress zonder voldoende afdoende werking introduceert het risico van het ontstaan van hitte-resistente bacteriën. Thermische behandelingen worden uitgevoerd door de te ontsmetten objecten een bepaalde periode bloot te stellen aan warm water of stoom (natte behandeling), of hete lucht (droge behandelingen) (Schmidt et al., 2018). Met stoom kunnen oppervlakken snel worden verhit door afgifte van condensatiewarmte. Voordelen t.o.v. een warm water behandeling zijn: de hoeveelheid water die toegepast wordt is aanzienlijk minder, het risico op kruisbesmettingen via het water wordt voorkomen en het plantmateriaal behoeft na de behandeling niet gedroogd te worden. Desinfectie met stoom lijkt kosteneffectief, gemakkelijk en veilig uit te voeren en is relatief vriendelijk voor het milieu. Tegenwoordig wordt warmte ook middels *microwave* en *radio-frequency* energie in de (dielectrische) materialen zelf opgeroepen door moleculaire frictie te creëren onder invloed van het aangelegde alternerende elektromagnetische veld (Schmidt et al., 2018; Van Impe et al., 2018). De benodigde tijd die het kost om een product op de gewenste temperatuur te brengen is langer bij toepassing van hete lucht dan voor toepassing van warm water; het gebruik van een elektromagnetisch veld is het meest efficiënt (Lurie, 2016). Een alternatief is *ohmic heating*, waarbij een elektrische stroom door het product gestuurd wordt, die warmte genereert; de hoeveelheid gedissipeerde elektrische energie is direct gerelateerd aan het toegepaste voltage en de elektrische geleidbaarheid van het product (Jaeger et al., 2016; Kaur and Singh, 2016; Tian et al., 2018).

2.1.4 Ioniserende straling

Elektromagnetische straling die voldoende energie (korte golflengte-spectrum) bezit om atomen te ioniseren, noemt men ioniserende straling. Hieronder vallen directe straling (elektronen, protonen, alfadeeltjes, zware ionen) en indirecte straling (gamma- en röntgenstraling). De stralingsdosis wordt uitgedrukt in de hoeveelheid geabsorbeerde stralingsenergie (SI-eenheid: Joules) per hoeveelheid materiaal, met 'gray' (symbool: Gy) als SI-eenheid. Deze dosis wordt bepaald door de snelheid en de massa van het stralingsdeeltje. Voor ontsmettingsdoeleinden zijn gammastraling (doorgaans Co-60 isotoop als stralingsbron), röntgenstraling en bètastraling relevant (Bhilwadikar et al., 2019; Lung et al., 2015; Pinela and Ferreira, 2017; Schmidt et al., 2018). Het penetrerend vermogen van gammastraling is beduidend hoger dan dat van bètastraling. De straling beschadigt op directe wijze het genetisch materiaal (DNA en RNA) van de micro-organismen, en genereert vanuit watermoleculen reactieve zuurstofdeeltjes die hun antimicrobiële werking met name ontleen aan hun reacties met celmembranen (Bhilwadikar et al., 2019; Lung et al., 2015). Het penetrerend vermogen, de effectiviteit tegen een breed scala aan bacteriën en schimmels, en het feit dat er geen warmteontwikkeling bij plaats vindt, worden als grote voordelen van ioniserende straling beschouwd. Om praktische redenen (sneller, lagere doseringen nodig, geen radioactiviteit maar elektriciteit als bron, flexibel en hanteerbaar) lijkt er een voorkeur te bestaan voor röntgenstraling en bestraling met elektronen (bètastraling) boven gammastraling (Freita-Silva et al., 2015; Lung et al., 2015; Moosekian et al., 2012).

2.1.5 UV-licht en pulsed light

Ultraviolette (UV) straling is de straling die in het electromagnetische spectrum tussen zichtbaar licht en zachte röntgenstraling zit. In verband met de verschillende effecten op de menselijke gezondheid en op het milieu onderscheidt men naar oplopende energie-inhoud UV-A (320-420 nm), UV-B (280-320 nm), en UV-C (100-280 nm). Door haar energierijkdom kan UV betrekkelijk gemakkelijk chemische reacties in gang zetten en schade aan organismen veroorzaken. De antimicrobiële eigenschappen van UV zijn met name te herleiden tot fotochemische schade aan DNA, eiwitdenaturatie en beschadiging van de celmembraan (Pinela and Ferreira, 2017; Schmidt et al., 2018; Van Impe et al., 2018). Omdat het penetrerend vermogen van UV gering is (circa 2 μm , Schmidt et al., 2018), beperkt de antimicrobiële werking zich tot de productoppervlakken. In reactie op UV-straling kunnen organismen, waaronder groenten en fruit, beschermende maatregelen nemen, zoals de aanmaak van stoffen die bescherming bieden tegen de straling of tegen de gevolgen van de straling. Omdat verse plantaardige producten daardoor soms in voedingswaarde toenemen, kan dit in de voedingsmiddelenindustrie een additionele reden zijn UV-straling toe te passen (Pinela and Ferreira, 2017; Urban et al., 2016). Continue blootstelling aan UV kan echter ook tot verlies van productkwaliteit leiden; bovendien kan afhankelijk van de waterinhoud interne opwarming van het product optreden met negatieve gevolgen voor de productkwaliteit (Schmidt et al., 2018). Dit heeft de ontwikkeling van zogenoemde *pulsed light* (PL) technologie in gang gezet. Deze ontsmettingsmethode behelst de toediening middels Xenon-lampen van zeer korte (< duizendste seconde) pulsen van hoge lichtintensiteit en een breed "wit" spectrum lopend van UV (200 nm) tot infrarood (1000 nm) (Gomez-Lopez et al., 2007; Gomez-Lopez et al., 2008; Pinela and Ferreira, 2017; Schmidt et al., 2018; Van Impe et al., 2018). Het aantal pulsen en de pulsintensiteit bepaalt de effectiviteit, waarbij het UV-C deel van het spectrum (200-280 nm) uiteraard het belangrijkste aandeel in microbiële inactivatie heeft. Wegens de flexibiliteit van de technologie en de snelle werking in korte behandelzeiten zonder opwarming en residuevorming wordt PL aanbevolen voor de ontsmetting van voedingsmiddelen en apparatuur, en toepassingen in de medische en farmaceutische industrie (Schmidt et al., 2018). De belangrijkste beperking vormt het geringe penetratievermogen van UV en *pulsed light*, en het daarmee samenhangende zogenoemde schaduweffect: de micro-organismen die in de schaduw van elkaar en van andere objecten zitten, blijven buiten schot (Gomez-Lopez et al., 2007). Dit betekent dat de ontsmettingsefficiëntie afneemt naarmate het te ontsmetten oppervlak meer vuil en oneffenheden bevat. Door de lichtpulsen vanuit meerdere richtingen toe te dienen, of het te ontsmetten object te laten roteren kan dit schaduweffect deels ondervangen worden. Een wasstap voorafgaande aan belichting kan ook behulpzaam zijn. Een *water-assisted* PL systeem bleek beter te werken dan een droog PL-systeem bij de ontsmetting van groene uien, blauwe bessen, aardbeien en frambozen (Pinela and Ferreira, 2017).

2.1.6 Ultrasonische golven

Ultrasonische golven, of ultrageluid, zijn geluidsgolven die voor het menselijk oor niet waarneembaar zijn; dit zijn golven met een frequentie hoger dan 20 kHz. In tegenstelling tot electromagnetische golven hebben geluidsgolven een medium (gas, vloeistof, vaste stof) nodig om zich voort te planten. Doorgaans onderscheidt men diagnostische toepassingen waarbij hoge frequenties (2-200 MHz) met een lage intensiteit (0.1-1 W/cm²) gebruikt worden (bijvoorbeeld voor prenatale echo-diagnostiek), en destructieve toepassingen waarbij lage frequenties (20-100 kHz) met hoge intensiteit (10-1000 W/cm²) gebruikt worden (zoals voor inactivatie van enzymen en micro-organismen in de levensmiddelenindustrie) (Awad et al., 2012; Bilek and Turantas, 2013). Deze laatste, de zogenoemde '*high-power ultrasound*'-toepassing is mogelijk relevant voor de desinfectie van aardappelpootgoed.

Het mechanisme waarmee *high-power* ultrageluid micro-organismen doodt, is uitgebreid onderzocht. De geluidsgolven genereren snelle drukverschillen die in vloeistoffen (zoals de inhoud van bacteriën) leiden tot microscopisch kleine holtes ('belletjes'; Engels: *cavities*); bij een kritische grootte imploderen deze waardoor zeer lokaal in een korte tijd (μs) relatief veel energie vrijkomt in de vorm van hoge temperatuur (tot 5500 °C) en druk (tot 1000 MPa) ('*hot spots*'). Behalve door deze fysische krachten wordt celdood bewerkstelligd door chemische reacties met zuurstofradicalen die tijdens dit proces uit waterdamp ontstaan (Pinela and Ferreira, 2017). Voordeel is dat hierdoor ook ontsmetting kan plaats vinden in ontoegankelijke niches. De apparatuur bestaat uit een elektrisch gevoede transducer die elektriciteit in ultrasonische frequenties omzet die vervolgens door een zender het vloeibare medium in gestuurd worden waarin zich het te ontsmetten object bevindt (Chemat et al., 2011). Van belang is dat de technologie niet zondermeer toepasbaar is omdat de apparatuur steeds voor iedere specifieke toepassing en product en volume op maat ontworpen moet worden (Pinela and Ferreira, 2017).

Het staat vast dat ultrageluid met de juiste frequentie en voldoende hoge intensiteit onder laboratorium condities micro-organismen effectief kan doden. In de literatuur lijkt echter consensus te ontbreken over de vraag of ultrageluid geschikt is voor desinfectie op industriële schaal. Zo bestaat er geen eenduidig oordeel over de relatieve (in)efficiëntie van de technologie, de energiezuinigheid, en de technische mogelijkheid om de cavitatie in het vloeistofmedium homogeen te verdelen zie bijvoorbeeld (Bilek and Turantas, 2013; Chemat et al., 2011; O'Donnell et al., 2010; Pinela and Ferreira, 2017; Schmidt et al., 2018; Van Impe et al., 2018). Voor volledige desinfectie moeten soms relatief hoge intensiteiten toegepast worden die negatieve effecten op het te ontsmetten object hebben. Ultrageluid lijkt daarom vooral interessant in combinatie met andere ontsmettingstechnologieën, zoals verhoogde temperatuur of chemische ontsmettingsmiddelen (Bilek and Turantas, 2013; Chemat et al., 2011; Pinela and Ferreira, 2017; Schmidt et al., 2018)).

2.1.7 Koud plasma

Door toevoeging van energie kan materie overgaan (1) van vaste naar (2) vloeibare toestand en van daar naar (3) de gastoestand. Plasma is geïoniseerd gas en wordt wellicht ten onrechte, zie (Burm, 2012) beschouwd als vierde fundamentele toestand van materie, die bereikt wordt door toevoeging van voldoende energie aan materie welke zich in gastoestand bevindt. Plasma bevat chemisch reactieve elektronen, ionen, neutrale en geladen deeltjes, en atomen. Bij het opwekken van plasma ontstaat tevens elektromagnetische straling in het UV, zichtbare en nabij infrarode gebied (Hertwig et al., 2018; Muhammad et al., 2018; Sakudo et al., 2019). In zogenoemd koud plasma (engels: *non-thermal plasma*, of: *cold plasma*) is de temperatuur van de relatief zeer lichte elektronen veel hoger dan die van de relatief zeer zware ionen en neutrale deeltjes, en vindt er nagenoeg geen energie-overdracht plaats van de elektronen naar de andere deeltjes; bijgevolg bezit dit plasma de temperatuur van haar omgeving. Dit is niet het geval bij zogenoemd *thermal* en *high-thermal* plasma. Hierdoor is voor de desinfectie van levende organismen uitsluitend koud plasma geschikt.

De benodigde energietoevoeging aan het gas vindt doorgaans plaats middels elektrische ontlading. Afhankelijk van de energiebron, de omgevingsdruk, en de vorm en configuratie van de elektroden, onderscheidt men uiteenlopende typen van elektrische ontladingsmethoden om koud plasma te genereren. In de Engelse taal worden deze aangeduid met: *glow discharge*, *corona discharge*, *athmospheric pressure plasma jet*, *dielectric barrier discharge*, *micro-hollow cathode discharge*, *DC discharge*, *pulse discharge*, en *high/low-frequency discharge* (Sakudo et al., 2019). Koud plasma kan vrij eenvoudig opgewekt worden onder lage druk, maar dit vereist kostbare en onpraktische vacuüm systemen. Maar er zijn ook ontladingsmethoden waarbij koud plasma onder atmosferische omstandigheden kan worden gegenereerd; deze zijn in beginsel geschikt voor de ontsmetting van verse, biologische producten die onbeschadigd de behandeling moeten doorstaan (Sakudo et al., 2019).

Het te ontsmetten object kan direct bloot gesteld worden met het plasma in de ruimte waar het plasma gegenereerd wordt, dus waar de elektrische ontlading plaats vindt. Het plasma kan ook via een nagloeier (*plasma afterglow*) vanuit de elektrische ontladingsruimte op het object overgebracht worden. Als derde optie is er de indirecte behandeling, waarbij oplossingen die met plasma behandeld zijn ("*plasma activated medium*", "*plasma activated water*", et cetera), worden toegediend aan het te ontsmetten object (Sakudo et al., 2019).

Het is niet helemaal duidelijk wat de onderliggende mechanismen zijn van de antimicrobiële werking van koud plasma, maar zeker is dat de chemisch reactieve deeltjes (afhankelijk van het gebruikte gas), en de UV-straling die bij plasmageneratie vrij komt, ongunstig zijn voor de overlevingskansen van de micro-organismen (Hertwig et al., 2018; Muhammad et al., 2018; Sakudo et al., 2019). Het gebruik van edelgassen (helium, argon, neon) op industriële schaal is kostbaar; voor grootschalige ontsmetting zijn vooral zuurstof- en stikstofgas van belang. Naast elektronen en fotonen zijn daarom met name reactieve zuurstofdeeltjes (zoals superoxide anion (O_2^-), atomaire zuurstof (O), singlet zuurstof (1O_2), hydroxyl radicalen (OH \cdot) en ozon (O_3)), en reactieve stikstofdeeltjes (zoals geëxciteerd N_2 , atomair stikstof (N), en stikstofoxide radicalen (NO \cdot)) relevant (Muhammad et al., 2018). Door hun reacties met organische moleculen kunnen ze bij kamertemperatuur de inactivatie, desintegratie en dood van micro-organismen bewerkstelligen. Dat maakt koud plasma in beginsel een interessant desinfectiemiddel voor tal van toepassingen, waaronder desinfectie van verse plantaardige producten, zoals o.a. blijkt uit recente overzichten van experimenten met groenten en fruit, eieren, noten, zaden, kruiden en vlees (Hertwig et

al., 2018; Pignata et al., 2017). Vooral nog is het nog wachten op praktijktoepassingen op industriële schaal buiten het laboratorium.

2.1.8 Hoge hydrostatische druk (high-pressure processing)

Een ruim honderd jaar oude fysische desinfectiemethode die de laatste decennia in de voedingsmiddelenindustrie meer praktische toepassing vindt, is blootstelling van het product aan hydrostatische druk 50-1000 MPa (Considine et al., 2008; Huang et al., 2014; Woldemariam and Emire, 2019). Hierbij wordt middels een vloeistof (doorgaans water indien het product zelf geen vloeistof is) in alle richtingen uniforme statische druk (dus géén dynamische druk) op het product uitgeoefend. De druk wordt momentaan in het gehele voedingsproduct voortgeplant, zodat de blootstelling onafhankelijk van productvorm of -grootte nagenoeg onmiddellijk is (dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld temperatuursbehandelingen). Afhankelijk van de productsamenstelling treedt hierbij slechts een minieme adiabatische temperatuursverhoging op circa 3°C per 100 MPa (Considine et al., 2008). Omdat covalente bindingen onder 2 GPa niet breken, blijven laag-moleculaire organische verbindingen onder de toegepaste drukken intact (vitaminen, pigmenten, geurstoffen, et cetera) (Pinela and Ferreira, 2017; Rivalain et al., 2010). Dit betekent dat de behandeling doorgaans niet tot vervorming of kwaliteitsverlies (zoals verlies van smaakeigenschappen en voedingswaarde) van het voedingsproduct leidt. De behandeling wordt uitgevoerd in een hogedruk kamer en geschiedt daarom noodzakelijkerwijze partijgewijs; de behandelingsduur varieert normaliter van enkele tot tientallen minuten (Woldemariam and Emire, 2019). Om desinfectie middels hoge druk in perspectief te plaatsen is het wellicht goed op te merken dat er op aarde vele levensvormen voorkomen die uitstekend gedijen onder hydrostatische druk. De oceanen vormen de grootste biosfeer en hebben een gemiddelde diepte van 3.8 km met een uiterste diepte van 11 km, waar drukken heersen van 3.8 respectievelijk 11 MPa (Rivalain et al., 2010).

De desinfecterende werking van hoge hydrostatische druk wordt toegeschreven aan verbreking van moleculaire bindingsinteracties die de driedimensionale structuur van biologische macromoleculen zoals eiwitten in stand houden, waardoor deze complexe structuren hun taken voor overleving en reproductie van het organisme niet meer kunnen vervullen; het gaat hierbij om verbreking van uitsluitend non-covalente bindingen, zoals waterstofbruggen, hydrofobe en elektrostatische interacties (Considine et al., 2008; Rivalain et al., 2010). De gevolgen van het uiteenvallen van complexe moleculaire structuren zijn onder meer lekkage van membranen, disfunctioneren van moleculaire pompen, gemankeerde genexpressie en eiwitsynthese, verlies aan vermogen om de benodigde interne chemische evenwichten te handhaven. Naar een grove inschatting kan 50 MPa de microbiële eiwitsynthese remmen, 100 MPa kan tot gedeeltelijke eiwit denaturatie leiden, 200 MPa veroorzaakt schade aan de celmembranen en interne celstructuren, en boven de 300 MPa vindt irreversibele eiwit denaturatie plaats, wat uiteindelijk tot celdood leidt (Huang et al., 2014). Ook de structuur van suikerpolymeren als pectines en zetmeel kan onder zeer hoge druk veranderen, waardoor bijvoorbeeld bij zetmeel verstijfseling optreedt.

Voor overzichtsartikelen over de effectiviteit van deze technologie voor de inactivatie van uiteenlopende typen van micro-organismen wordt verwezen naar (Considine et al., 2008; Huang et al., 2014; Mota et al., 2013; Woldemariam and Emire, 2019). In grote lijnen neigen prokaryoten drukbestendiger te zijn dan eukaryoten, gram-positieve bacteriën drukbestendiger dan gram-negatieve, en cocci drukbestendiger dan staafvormige bacteriën. Schimmels en gisten zijn in het algemeen gevoeliger voor hoge druk dan vegetatieve bacteriën, terwijl bacteriële endosporen vaak bestand zijn tegen zeer hoge druk, evenals ascosporen van hittebestendige schimmels. Een studie naar humaan-pathogene bacteriestammen liet verschillen in inactivatie-efficiëntie zien tussen 0.5 en 8.5 log-eenheden CFU (Alpas et al., 1999). Over bacteriën wordt gerapporteerd dat ze het meest tegen druk bestand zijn bij temperaturen tussen 20 en 30°C, dus koude en warmte kunnen hier de desinfectie begunstigen (Woldemariam and Emire, 2019). Met name de enorme drukbestendigheid van sporen wordt in de literatuur als een te kraken probleem beschouwd; gelijktijdige of achtereenvolgende combinatiebehandelingen met verhoogde temperatuur worden aanbevolen. Interessant is dat lage en hoge druk (evenals temperatuursverhoging) soms kieming van bacteriesporen kan veroorzaken. Sporen gekiemd onder lage druk kunnen kwetsbaarder blijken in daaropvolgende drukbehandelingen. Behalve de temperatuur en blootstellingsduur, blijkt het substraat, dus de pH en chemische samenstelling van het voedingsproduct waarin zich het micro-organisme bevindt, een belangrijke factor te zijn voor de drukbestendigheid.

2.1.9 Gepulseerde elektrische hoogspanning (*Pulsed electric field*)

Pulsed electric field technologie betreft het toedienen van hoogspanningspulsen aan voedselproducten die tussen twee elektroden doorstromen of geplaatst zijn. Het gaat om ultrakorte pulsen (microseconden) van zeer hoge elektrische veldsterkte (tientallen kV/cm). De pulsen veroorzaken lekkage van celmembranen (zogenoemde electroporatie); indien de schade irreversibel is, kan de cel haar interne chemische evenwichten niet meer onderhouden en sterft ze (Angersbach et al., 2002). Aan dit principe ontleent de technologie haar desinfecterende werking (Knorr et al., 2011; Van Impe et al., 2018). Voor *Escherichia coli*, *Salmonella Enteritidis* en *Saccharomyces cerevisiae* bijvoorbeeld zijn CFU-reducties van 5-6 log-eenheden gerapporteerd bij veldsterktes van 25-35 kV/cm (Katiyo et al., 2017). De technologie is ongeschikt voor het doden van sporen of de inactivatie van enzymen, tenzij toegepast in combinatie met warmte (Van Impe et al., 2018). De praktische toepassing van *pulsed electric field* technologie voor desinfectie is in beginsel beperkt tot die voedingsmiddelen die hoge elektrische velden kunnen onderhouden, een lage elektrische geleidbaarheid hebben en geen bubbels hebben of produceren, zoals vruchtensappen, soepen, melk (Rajkovic et al., 2010). In de literatuur treft men overigens ook voorbeelden aan van toegepaste hoogspanningsvelden op zaailingen zonder gebruik van een vloeibaar medium te maken bijvoorbeeld (Eing et al., 2009). De capaciteit om cel lekkage te veroorzaken maakt de techniek ook interessant voor de voorbehandeling van te extraheren of te dehydrateren plantenweefsels (Rifna et al., 2019). Zo is de technologie bijvoorbeeld toegepast bij de voorbereiding van aardappelweefsel ter verbetering van het vriesdrogen van de knol, het bakproces van frieten, en de extractie van alkaloiden uit de schil (Angersbach et al., 2002). Hoewel *pulsed electric fields* dus desintegratie van plantweefsel kan bevorderen, wijst experimenteel onderzoek uit dat de kiemkracht van zaden met deze bewerking verbeterd kan worden (zie voor een kort overzicht Rifna et al., 2019, en hoofdstuk 2.4.7 van dit rapport).

2.1.10 Magnetisch veld

Een magnetisch veld is een ruimtelijk veld dat magnetische krachten uitoefent op bewegende elektrisch geladen deeltjes en deeltjes met dipolen. Dit betekent dat magnetische velden in beginsel invloed kunnen hebben op levensprocessen. Vermoedelijk mede ingegeven door zorgen over eventueel negatieve effecten van elektromagnetische straling voor de volksgezondheid en het milieu is hier betrekkelijk veel onderzoek naar verricht. Ook wordt het fenomeen onderzocht als instrument voor allerlei medische behandelingen (Buchachenko, 2016). Over de desinfecterende kwaliteiten van magnetische velden bestaat echter relatief weinig kennis. Screening van de literatuur op **desinfectie** (zoekopdracht: decontamination OR disinfection OR sterilization OR pasteurization) en **magnetische velden** ("magnetic field*") leverde 125 publicaties op, waarvan er slechts enkele over de directe werking van magnetische velden op micro-organismen gaan. Er zijn meerdere hypothesen over het werkingsmechanisme. Ji et al (2009) sommen drie gangbare hypothesen op. Een statisch magnetisch veld zou diamagnetische moleculen uit de celmembraan tot een zodanige rotatie aanzetten dat de mobiliteit van ionen door ionkanalen beïnvloed wordt. Een tweede theorie gaat uit van verstoring van het bindingsevenwicht tussen ionen en eitwitcomplexen. Ten derde wordt verondersteld dat onder invloed van het magnetisch veld schadelijke zuurstofradicalen geproduceerd worden. Dit laatste sluit aan bij het *radical pair mechanism* dat als zijnde een algemeen geaccepteerde theorie gepresenteerd wordt door (Buchachenko, 2016). Qian et al. (2016) en Qian et al. (2013) rapporteren inactivatie, en cel lekkage en schade aan celoppervlakken, celmembranen en DNA van *Bacillus subtilis* onder invloed van magnetische veldpulsen, toenemend met veldsterkte en puls aantallen. Li et al. (2004) rapporteren over inactivatie van *Escherichia coli* met en zonder toepassing van warmte. Ma et al. (2012) bestudeerden de effecten van magnetische veldpulsen op het transport van Ca²⁺ over de celmembraan van *Staphylococcus aureus*. Ma et al. (2008) concludeerden op basis van een studie met *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Saccharomyces cerevisiae* en *Bacillus subtilis* dat de gevoeligheid voor magnetische veldpulsen in belangrijke mate van het type microorganisme afhangt. Ook statische elektrische velden kunnen antimicrobiële werking hebben, zoals tegen *Enterococcus faecalis* (Albuquerque et al., 2016; Fan et al., 2018). Harte et al. (2001) vonden bij kamertemperatuur geen effect van een statisch veld van 18T en ook niet van magnetische veldpulsen van 18T op *Escherichia coli* en *Saccharomyces cerevisiae*, en concluderen dat de technologie niet interessant is voor de behandeling van voedingsmiddelen. De reproduceerbaarheid van de werking van magnetische velden lijkt een probleem te zijn (Albuquerque et al., 2016; Buchachenko, 2016). Mogelijk is dat één van de redenen dat deze technologie nog niet gangbaar is in de voedingsmiddelen sector.

2.1.11 Superkritische CO₂

Kooldioxide is relatief chemisch inert, onbrandbaar, niet giftig, goedkoop, alom beschikbaar en betrekkelijk veilig. Boven een temperatuur van 31 °C en een druk van 73 atmosfeer bevindt CO₂ zich in de zogenoemde superkritische fase toestand, waarin het tegelijk eigenschappen bezit van de vloeistof (zoals de dichtheid) en van het gas (zoals de diffusie coëfficiënt) die maken dat het in die toestand een aantrekkelijk oplosmiddel is voor het uitvoeren van allerlei extracties. Inmiddels is superkritische CO₂ in de belangstelling gekomen van de levensmiddelentechnologie als nonthermische desinfectiemethode van voedingsmiddelen, waaronder verse groenten en fruit (Lopes et al., 2018; Zhou et al., 2015). Het gaat hierbij doorgaans om de toepassing onder hoge druk (enkele MPa tot tientallen MPa), al dan niet in combinatie met verhoogde temperaturen, waarbij ook goede resultaten bereikt kunnen worden voor de inactivatie van sporen (zie voor een overzicht Lopes et al. (2018)). De antimicrobiële effecten worden toegeschreven aan fysieke schade veroorzaakt door snelle drukverschillen in de cel, permeabilisatie van de celmembranen en verlaging van de cellulaire pH door oplossen van CO₂ (Pinela and Ferreira, 2017).

2.2 Effecten van fysische ontsmettingsmethoden op de relevante micro-organismen en aaltjes

2.2.1 Inleiding

De in hoofdstuk 2.1 beschreven fysische desinfectiemethoden zijn in de praktijk meestal gericht op humaan-pathogene micro-organismen en micro-organismen die bederf van voedingsmiddelen veroorzaken of versnellen. In dit hoofdstuk komt de vraag aan de orde of die methoden ook geschikt zijn om de micro-organismen en aaltjes te beheersen die voor aardappelpootgoed relevant zijn. Daartoe werd voor elke desinfectie-methode (behalve voor wassen met water) de literatuur doorzocht op inactivatie van specifiek die relevante organismen. Hieronder volgt per desinfectiemethode een overzicht van de gevonden relevante informatie.

2.2.2 Thermische ontsmetting

Kennis over de letale effecten van warmte op plantpathogenen komt vooral uit onderzoek naar de thermische ontsmetting van plantaardig uitgangsmateriaal, zoals zaaigoed. Hieronder volgt een overzicht van de effecten van (A) warm water, (B) stoom (hete vochtige lucht), en (C) droge hitte op relevante schimmels en bacteriën. Tot slot wordt (D) literatuur besproken waarin gerapporteerd wordt over thermische uitschakeling van de hier relevante nematoden.

A. Behandeling met warm water

- *Schimmels*

De letale temperatuur van water voor pathogene schimmels die leven in associatie met aardappelknollen varieert afhankelijk van de ziekteverwekker. Reincultures van *Helminthosporium solani*, *Polyscytalum pustulans* (pukkelschurft), *Colletotrichum coccodes* sterven bij een temperatuursbehandeling van 5 minuten boven de 55 °C, terwijl *Rhizoctonia solani*, *Phoma foveata* en *Penicillium* soorten ook bij een temperatuur boven de 57 °C nog overleven (Dashwood et al., 1991). De gevoeligheid bleek sterk afhankelijk van de ouderdom van de cultures, waarbij i.h.a. 3 weken oude cultures gevoeliger waren dan een 1 week oude culture. Bij behandeling van knollen besmet met gefragmenteerd mycelium bleek een warm waterbehandeling van 5 minuten bij 55 °C wel effectief voor *H. solani*, *R. solani* en *P. pustulans*, ook bij bewaring van knollen bij 4 of 15 °C, maar niet voor *C. coccodes* en de *Penicillium* soorten (Dashwood et al., 1991). Knollen natuurlijk geïnfecteerd met *P. pustulans*, *R. solani* of *H. solani* gaven, na een behandeling met water van 20 minuten bij 50 °C, ook een (sterke) reductie van het percentage geïnfecteerde ogen in de naogst (Hide, 1975). Het effect op de kieming van de knollen was bij deze behandeling minimaal. Ook in Nederlands onderzoek werd een relatief goed effect gevonden van deze behandeling op *H. solani*. Maar hierbij werd wel kiemschade gevonden en ook resulteerde deze behandeling in meer rot (Bos and Veerman, 2001). Warm waterbehandelingen van pootgoed zijn in de tachtiger jaren al commercieel toegepast door het bedrijf Aberdeen Biotechnology Ltd, een bedrijf dat helaas niet meer bestaat. Daarbij werd gebruik gemaakt van een systeem waarbij achtereenvolgens knollen werden gewassen en rotte knollen handmatig werden verwijderd.

- *Bacteriën*

De temperatuur waarbij soft rot *Pectobacteriaceae* (SRP's) afgedood worden zal variëren afhankelijk van soort en isolaat binnen de soort. In vergelijkende studies naar de gevoeligheid van SRP's voor warm water bleek *Dickeya dianthicola* (Ddia) een hogere temperatuur te kunnen verdragen dan *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (Pcca) en *P. atrosepticum* (Patr) (Robinson and Foster, 1987). Een behandeling van een suspensie in Nutrient broth gaf bij 56 °C na 2 min een reductie van 95%, terwijl dit effect bij Pcca al bij 50 °C werd gevonden. Patr was nog gevoeliger voor warmte. Ook de maximale groeitemperatuur verschilt per soort (Du Raan et al., 2016). *Dickeya solani* stopt pas met groeien bij 42 °C, terwijl de groei van *P. atrosepticum* al bij 31 °C stopt. In experimenten waarin thermotherapie is toegepast, is er steeds van *Pectobacterium* soorten gebruik gemaakt, die dus een lager temperatuuroptimum hebben dan sommige *Dickeya* soorten. De effectiviteit van warm water zal ook afhangen van de lokalisatie van de ziekteverwekker in de knol. Een deel van het inoculum is aanwezig in de bovenste 2-3 mm van de periderm. Daar zullen de bacteriën relatief snel worden afgedood (Pérombelon et al., 1989). Een ander deel is aanwezig in dieper gelegen vaatweefsel, vooral aan het naveleinde (Czajkowski et al., 2009). Mogelijk zal het langer duren voordat daar het weefsel de juiste temperatuur heeft aangenomen. Knollen zullen eerst voorverwarmd moeten worden om een lange

opwarmingstijd te voorkomen. Pcca en *P. Patr* overleven in een vloeibare cultuur een behandeling van 5 minuten bij 53 °C niet, terwijl de bacteriën op een vast medium werden afgedood bij een behandeling van 10 minuten bij 54 °C (Mackay en Shipton, 1983). Een behandeling van aardappelknollen met warm water gedurende 10 minuten bij 55 °C doodde SRP's effectief af volgens een uitplaatmethode (Mackay en Shipton, 1983). De behandelde knollen, zowel van partijen die natuurlijk- als kunstmatig besmet waren, gaven ook geen bacterieziek meer in het veld. Gedetailleerder onderzoek liet zien dat Pcca en *Patr* gesuspenderd in Nutrient Broth een behandeling van 2 minuten bij 52 °C niet overleefden, maar ook afgedood werden bij een behandeling van 45 °C gedurende 30 minuten (Pérombelon et al., 1989). In dit onderzoek werd vastgesteld dat Pcca in natuurlijk of opzettelijk besmet pootgoed alleen volledig afgedood werden bij een behandeling met een relatief hoge temperatuur van 59 °C gedurende 3 minuten, hetgeen leidde tot een onaanvaardbare schade aan de knollen. Bij een behandeling van knollen met het 'continuous flow hot water' systeem gedurende 5 minuten bij 53 °C werd schade aan knollen voorkomen, terwijl ziekte-incidentie verlaagd werd van 63% naar 13.5%. De besmettingsniveaus van de knollen namen af van 10⁵ tot 10² cellen per knol. Bij een temperatuur van 55 °C werd 1% non-emergence gevonden en een ziekte-incidentie van 6.8%, terwijl de opbrengst toenam met 30% (Pérombelon et al., 1989). Verder kan de opkomst van de planten door de behandeling vertragen, hoewel dit niet noodzakelijkerwijs hoeft te leiden tot een verminderde opbrengst. Ook in ander Schots onderzoek werd een sterke reductie gevonden van het percentage symptomatische planten na een behandeling van 5 of 10 minuten bij 55 °C in een bad met circulerend water, zonder dat dit de vitaliteit van de knollen aantastte (Wale, 1985).

B. Stoombehandeling

- *Schimmels*

In Israël werden voor schimmels veelbelovende resultaten geboekt met stoombehandeling van knollen (Afek and Orenstein, 2002). Twintig cm boven een transportband werden mondstukken gemonteerd die verbonden waren met een stoomapparaat. De temperatuur van stoom in contact met de knollen was ca. 70 °C. Knollen van de cultivars Desiree, Mondial en Nicola waren natuurlijk besmet met *H. solani*, *R. solani*, *C. coccodes*, *Fusarium sp.*, *Streptomyces scabies* of *Spongospora subterranae*. De knollen werden gedurende 10 seconden behandeld en daarna aan de lucht gedroogd. De infectie incidentie van de behandelde knollen is weergegeven in Tabel 2. De behandelde en onbehandelde knollen werden uitgepoot en de dochterknollen werden 120 dagen na planten verzameld. Ook de infectie-incidentie van de dochterknollen was aanzienlijk lager dan van de onbehandelde controle. De behandeling had geen effect op kieming of opbrengst.

Tabel 2. Infectie incidentie (%) in pootgoed en naogst behandeld pootgoed na behandeling met stoom(Afek and Orenstein, 2002).

	<i>Pectobacterium</i>	<i>H. solani</i>	<i>R. solani</i>	<i>C. coccodes</i>	<i>Fusarium</i>	<i>S. scabies</i>	<i>S. subterranae</i>
Pootgoed							
Controle	47	46	40	52	35	42	41
Stoom	2	3	2	3	2	2	2
Naogst							
Controle	26	32	31	44	20	27	26
Stoom	3	4	5	8	4	5	5

- *Bacteriën*

Dezelfde stoombehandeling als beschreven voor knollen geïnfecteerd met schimmels werd uitgevoerd op knollen van de cultivars Desiree, Mondial en Nicola besmet met Pcca of *Patr* (Afek and Orenstein, 2002). De infectie incidentie van de behandelde knollen was 2% t.o.v. 46% voor de behandelde knollen (Tabel 1). De behandelde en onbehandelde knollen werden uitgepoot en de dochterknollen 120 dagen na planten verzameld. Ook de infectie-incidentie van de dochterknollen was aanzienlijk lager (3%) dan van de onbehandelde controle (26%). Een stoombehandeling zou ook resistentie in de aardappelknollen kunnen induceren door veranderingen in het niveau van componenten betrokken bij een afweerreactie net als in andere gewassen is gevonden (Fallik, 2004). De effectiviteit van stoombehandelingen kan mogelijk vergroot worden door toepassing van een ultrasound golven die stilstaande luchtlagen verwijderen waardoor transmissie van de hitte beter verloopt <https://sonosteam.com/working-principles/>. M.b.v. een zogenaamde SonoSteam behandeling heeft men zaden van spruitgroenten op een

transportband behandeld tegen humaan pathogenen. Er werd niet alleen een substantiële reductie gevonden van het percentage contaminaties, maar de bonen bleken ook beter te kiemen, mogelijk door verwijdering van pathogenen die de kieming negatief beïnvloedden. Behandelingen kunnen ook gecombineerd worden met het gebruik van antimicrobiële stoffen. Zo resulteerde een behandeling van knollen met stoom waar waterstofperoxide aan toe was gevoegd tijdens de bewaring in een sterke reductie van natrot veroorzaakt door *Pcca* (Afek et al., 1999). De behandeling werd uitgevoerd in een Tabor Atomizing System waarin onder druk minuscule waterdruppels werden gevormd die fungeerden als carrier voor waterstofperoxide. Tijdens de bewaring van vijf maanden bij 8 °C en 95% RH liep bij natuurlijk besmet materiaal het percentage rotte knollen terug van 15 naar 1% en voor materiaal dat extra besmet was met actief rottende knollen van 26 naar 4%.

C. Behandeling met hete lucht

Bij het toepassen van hete droge lucht voor behandeling van kuubskisten moet lucht goed gecirculeerd worden om een goede transmissie van de warmte te bereiken in alle knollen. Na de warmtebehandeling dient condensatie voorkomen te worden. Net als bij een stoombehandeling is er geen risico op cross-contaminaties en hoeven knollen niet terug gedroogd te worden. De warmtetransmissie bij droge lucht verloopt wel trager, waardoor er langer behandeld moet worden en er een risico ontstaat op het uitdrogen van knollen met een verminderde kiemkracht als gevolg.

- *Schimmels*

De behandeling met hete lucht had een reducerend effect op poederschurft (*Spongospora subterranea*) en lakschurft (*Rhizoctonia solani*) (Mackay en Shipton, 1983).

- *Bacteriën*

Behandeling van besmette knollen met hete lucht gedurende 30 minuten bij 60 °C resulteerde in een sterke reductie van het infectieniveau met SRP's (Wale, 1985).

D. Thermische behandeling ter uitschakeling van nematoden

Over de thermische uitschakeling van nematoden is beduidend minder literatuur te vinden dan over thermische uitschakeling van plantpathogene schimmels en bacteriën. Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **ontsmetting** (zoekterm: decontamination OR disinfection OR sterilization OR pasteurization) op één van de voor deze studie **relevante aaltjes** (zoekterm: *Meloidogyne* OR *Pratylenchus* OR *Ditylenchus* OR *Globodera*) leverde na selectie 36 publicaties op, waarvan er slechts 3 gaan over desinfectie middels warmte. Dompeling in achtereenvolgens water van 38 °C voor 30, 45, of 60 minuten gevolgd door dompeling in water van 49 °C voor 15-30 minuten onderdrukte gedeeltelijk *Ditylenchus dipsaci* in knoflooktenen, terwijl de opkomst van de knoflookplantjes, hoewel wat vertraagd, normaal was (Roberts and Matthews, 1995). Steinmoller et al. (2012) stelden in composteringsexperimenten vast dat cysten van *Globodera rostochiensis* 7 dagen bij 50-55 °C of 30 minuten pasteurisatie bij 70 °C niet overleefden. Van Kruistum et al. (2014) combineerden warmte succesvol met verhoogde CO₂ voor de doding van *Meloidogyne hapla* in aardbeistekken met behoud van plantkwaliteit door de stekken bloot te stellen aan 20 uur bij 35 °C en 50% CO₂ gevolgd door 20 uur bij 40 °C.

2.2.3 Ioniserende straling

Behalve door de sterkte van de stralingsbron wordt de toegediende dosering van ioniserende straling bepaald door de blootstellingsduur en de afstand tot de stralingsbron. Hoe hoger de dosering, des te effectiever de ontsmetting. Voor gammastraling onderscheidt men drie doseringsniveaus: een lage dosering (tot 1 kGy) gebruikt voor inactivering van insecten en parasieten, een medium dosering (1 tot 10 kGy) voor reductie van niet-sporenvormende pathogenen en bederf veroorzakende micro-organismen, en een hoge dosering (boven 10 kGy) om sterilisatie te verkrijgen (Crawford en Ruff, 1996). Daarnaast hangt de effectiviteit van de behandeling af van de groeiomstandigheden en het type van het relevante micro-organisme; doorgaans zijn Gram-positieve bacteria resistenter dan Gram-negatieve bacteria, en zijn prokaryote micro-organismen resistenter dan eukaryote micro-organismen (Moosekian et al., 2012).

Freita-Silva et al. (2015), Lung et al. (2015), en Schmidt et al. (2018) geven gedetailleerde overzichten van studies naar de desinfectie middels gamma- en bètastraling (dosering < 10 kGy) van diverse zaden, granen, bonen, noten, kool, spinazie, ijsbergsla, tomaten, appels, en truffels en andere paddenstoelen.

Doelorganismen zijn vooral humaan-pathogene bacteriën (*Salmonella*, *Escherichia coli*) en mycotoxine-producerende schimmels waaronder die van de hier relevante geslachten *Fusarium* en *Helminthosporium*.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van ioniserende bestraling (zoekterm: irradiation) op één van de voor deze studie **relevante bacteriën** (zoekterm: Dickeya OR Pectobacterium OR Ralstonia OR Clavibacter OR Streptomyces OR Erwinia) leverde na selectie drie relevante publicaties op, namelijk Abd El-Ghany et al. (2017), Janisiewicz et al. (1985), en Jeong et al. (2016). Suspensies van de zachtrot bacteriën *Pectobacterium carotovorum* subsp. *brasiliense* en *P. atrosepticum* vertoonden met oplopende gammastraling een afname in log CFU/ml met volledige sterilisatie bij respectievelijk 2 kGy en 2.5 kGy (Abd El-Ghany et al., 2017). Gammabestraling van knollen die kunstmatig met deze bacteriën besmet waren, remde de ontwikkeling van zachtrot en verlengde de bewaarbaarheid (Abd El-Ghany et al., 2017). Deze resultaten sluiten aan bij de waarnemingen van Jeong et al. (2016) dat gammastralen een dosis-afhankelijke schade aanrichtte aan de celmembranen van *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* en dat toepassing van circa 0.6 kGy tot complete inactivatie van celsuspensies van deze bacterie leidde. Geconcludeerd werd dat deze technologie gebruikt kan worden voor de beheersing van zachtrot paprika (Jeong et al., 2016). In een studie met *Erwinia amylovora* werd gevonden dat een beduidend hogere dosering gammastraling nodig was voor de doding van de bacterie in natuurlijk besmette appels dan in appels die geïnoculeerd waren vanuit een bacteriesuspensie (Janisiewicz et al., 1985).

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van ioniserende bestraling (zoekterm: irradiation) op één van de voor deze studie **relevante schimmels** (zoekterm: Rhizoctonia OR Helminthosporium OR Colletotrichum OR Fusarium) leverde na selectie twaalf relevante publicaties op. De meesten betroffen de inactivatie van *Fusarium* soorten in granen en mais middels gammastralen (Aziz et al., 1997; Aziz et al., 2007; Deepthi et al., 2017; Ferreira-Castro et al., 2007; Kalagatur et al., 2018b; Kalagatur et al., 2018c; Mansur et al., 2014) en middels bètastraling (Gryczka et al., 2010; Kottapalli et al., 2006). De overige twee publicaties gingen over beheersing van *Colletotrichum gloeosporioides* en *Penicillium expansum* in de naogstfase van appels middels gammastralen (Cheon et al., 2016), en doding van *Rhizoctonia solani* op chrysant en in potaarde (Orlikowski et al., 2012).

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van ioniserende bestraling (zoekterm: irradiation) op één van de voor deze studie **relevante aaltjes** (zoekterm: Meloidogyne OR Pratylenchus OR Ditylenchus OR Globodera) leverde na selectie géén publicaties op die relevant zijn voor het gewas aardappel. Drie studies rapporteren over de effecten van ioniserende straling op verwante soorten uit genoemde nematode-geslachten (Chinnasri et al., 1997; Cox et al., 1976; Siddiqui and Viglierchio, 1970).

2.2.4 UV-licht en pulsed light (PL)

Aangetoond is dat UV en *pulsed light* (PL) technologie succesvol ingezet kunnen worden voor de oppervlakkige ontsmetting van verpakkingsmaterialen en voedingsmiddelen tegen een breed scala aan humaan-pathogene en bederf veroorzakende micro-organismen (Kramer et al., 2017; Mahendran et al., 2019). UV licht is in staat bacteriële sporen te inactiveren (Van Impe et al., 2018). Naar de toepassing van UV en PL voor zaadontsmetting is weinig onderzoek verricht. In tarwe zaden kon een 4-log reductie van *Aspergillus spp.* bereikt worden met PL (dose: 51 J.g⁻¹) (Maftai et al., 2014). Op Chiazaad werd met PL (dose: 15 s 19 J.cm⁻²) een 4-log reductie verkregen van een *Salmonella*-inoculum (Reyes-Jurado et al., 2019).

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **UV en pulsed light** (zoekterm: UV OR "pulsed light") op één van de voor deze studie **relevante bacteriën** (zoekterm: Dickeya OR Pectobacterium OR Ralstonia OR Clavibacter OR Streptomyces OR Erwinia) leverde 750 publicaties op. Nadere selectie (zoekopdracht: decontamination OR disinfection OR sterilization OR pasteurization) resulteerde in 14 publicaties. Hiervan waren er vier voor deze studie relevant. Twee artikelen beschrijven de inactivatie van plantpathogenen in oppervlaktewater middels toepassing van UV (Jones et al., 2014; Scarlett et al., 2016). Het betrof *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*, and *Phytophthora capsici* (Jones et al., 2014), en *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, *Alternaria alternata*, *Chalara elegans*, *Colletotrichum gloeosporioides*, *Calonectria pauciramosa*, *Fusarium oxysporum*,

Phytophthora cinnamomi en *Pythium aphanidermatum* (Scarlett et al., 2016). Hieruit bleek dat de gevoeligheid voor UV-inactivatie tussen de verschillende pathogenen varieert, en ook tussen de overlevingsvormen (sporen, mycelium, planktonische cellen) binnen hetzelfde pathogeen. In een studie naar verschillende plantpathogene bacteriën en schimmels werd gevonden dat een golflengte van 222 nm effectiever is tegen sporen van uiteenlopende bacteriën en schimmels dan 254 nm (Clauss, 2006). Hadjok et al. (2008) stelden vast dat UV gecombineerd met waterstofperoxide een goed alternatief is voor hypochloriet voor de desinfectie van bladgroenten tegen *Escherichia coli*, *Pectobacterium carotovora*, *Pseudomonas fluorescens* en *Salmonella*.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **UV en pulsed light** (zoekterm: UV OR "pulsed light") op één van de voor deze studie **relevante schimmels** (zoekterm: Rhizoctonia OR Helminthosporium OR Colletotrichum OR Fusarium) leverde 781 publicaties op. Nadere selectie (zoekopdracht: decontamination OR disinfection OR sterilization OR pasteurization) resulteerde in 25 publicaties. Hiervan waren er negen voor deze studie relevant. De meesten betreffen ontsmetting van irrigatiewater (Downey et al., 1998; Ehret et al., 2001; Hageskal et al., 2012; Nosir, 2016; Scarlett et al., 2016; Sutton et al., 2000; Urban et al., 2011). Anderson et al. (2000) onderzochten dosis-respons relaties van pulsed light op reïncultures van *Aspergillus niger* en *Fusarium culmorum*. Interessant is de recente vondst dat bij de desinfectie van aardbeienplanten volstaan kan worden met lagere *pulsed light* doseringen indien deze opgevolgd worden door een donkerperiode; kennelijk hebben de onderzochte plantpathogene schimmels (waaronder species van *Colletotrichum*) daglicht nodig om van de UV-C pulsen te herstellen (Takeda et al., 2019).

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **UV en pulsed light** (zoekterm: UV OR "pulsed light") op één van de voor deze studie **relevante nematoden** (zoekterm: Meloidogyne OR Pratylenchus OR Ditylenchus OR Globodera) leverde 18 publicaties op. Geen van deze publicaties betreft inactivatie van nematoden middels UV-licht.

2.2.5 Ultrasonische golven

Studies waarin ultrageluid onderzocht is voor ontsmettingsdoeleinden in plantaardige producten (o.a. aardbeien, sla, paprika, wortel, tomaat, appel, spinazie) betroffen voornamelijk humaan-pathogenen (*Salmonella*, *Listeria*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas*) en bacteriën, schimmels en gisten in algemene zin ("total viable counts"). Combinaties van toedieningsduur (tot tientallen minuten) en kracht (tot enkele honderden Watt per liter) bij frequenties van 20-45 kHz resulteerden in microbiële reducties van circa 0.5 tot 2 log CFU/g product. (Bilek and Turantas, 2013) geven een gedetailleerd overzicht van de studies uitgevoerd tot 2013.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **ultrasonische golven** (zoekterm: ultrason*) op één van de voor deze studie **relevante bacteriën** (zoekterm: Dickeya OR Pectobacterium OR Ralstonia OR Clavibacter OR Streptomyces OR Erwinia) leverde 32 publicaties op. Geen daarvan ging over inactivatie van micro-organismen middels ultrasonische golven.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **ultrasonische golven** (zoekterm: ultrason*) op één van de voor deze studie **relevante schimmels** (zoekterm: Rhizoctonia OR Helminthosporium OR Colletotrichum OR Fusarium) leverde 30 publicaties op, waarvan er twee over desinfectie gingen. Ren en Niu (1998) stelden een optimum vast van 26 kHz voor de complete afdoding van sporen van *Aspergillus flavus* en *Fusarium*. Khayankarn et al. (2013) vonden dat de houdbaarheid van ananasvruchten verlengd kon worden door toediening van ultrasonische trillingen, zonder meetbaar verlies aan productkwaliteit.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **ultrasonische golven** (zoekterm: ultrason*) op één van de voor deze studie **relevante nematoden** (zoekterm: Meloidogyne OR Pratylenchus OR Ditylenchus OR Globodera) leverde geen enkele publicatie op.

2.2.6 Koud plasma

Fernandez et al. (2013) vergeleken de effectiviteit van stikstof koud plasma voor de inactivatie van *Salmonella enterica* op weefsel van aardappel, aardbei en sla, en concludeerden dat microscopische structuurverschillen tussen de weefseloppervlakken een rol speelde bij de behaalde CFU-reducties (respectievelijk 0.94, 1.76 en 2.72 log-eenheden in 15 minuten) omdat die structuren bescherming zouden kunnen bieden aan de micro-organismen tegen het plasma.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **koude plasma** (zoekterm: cold plasma) op één van de voor deze studie **relevante bacteriën** (zoekterm: Dickeya OR Pectobacterium OR Ralstonia OR Clavibacter OR Streptomyces OR Erwinia) leverde 10 publicaties op waarvan er één hier relevant is. In deze studie (Moreau et al., 2005) werd aangetoond dat planktonische cultures van *Erwinia carotovora carotovora*, *Erwinia carotovora atroseptica* and *Erwinia chrysanthemi* met koud plasma opgewekt in een *gliding arc* reactor binnen 10 minuten volledig gesteriliseerd konden worden zonder de vorming van resistente vormen.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **koude plasma** (zoekterm: cold plasma) op één van de voor deze studie **relevante schimmels** (zoekterm: Rhizoctonia OR Helminthosporium OR Colletotrichum OR Fusarium) leverde 13 publicaties op, waarvan er hier 5 relevant zijn. Koud plasma bleek effectief voor de inactivatie van reïncultures en conidia-suspensies van *Colletotrichum* species uit Avocado (Siddique et al., 2019), van reïncultures van *Fusarium* (Abbasian et al., 2017), van schimmels waaronder *Fusarium* op maiskorrels (Zahoranova et al., 2018), uien (Chang et al., 2018) en tarwe (Zahoranova et al., 2016).

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **koude plasma** (zoekterm: cold plasma) op één van de voor deze studie **relevante nematoden** (zoekterm: Meloidogyne OR Pratylenchus OR Ditylenchus OR Globodera) leverde geen enkele publicatie op.

2.2.7 Hoge hydrostatische druk (*high-pressure processing*)

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **hoge hydrostatische druk** (zoekterm: "high-pressure processing" OR "high hydrostatic pressure") op één van de voor deze studie **relevante bacteriën** (zoekterm: Dickeya OR Pectobacterium OR Ralstonia OR Clavibacter OR Streptomyces OR Erwinia) leverde 11 publicaties op waarvan er twee hier relevant zijn omdat ze de (gedeeltelijke) inactivatie van *Pectobacterium* en *Streptomyces* species rapporteren (in respectievelijk wortel- en appelsap) middels hoge hydrostatische druk (McKay et al., 2011; Patterson et al., 2012).

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **hoge hydrostatische druk** (zoekterm: "high-pressure processing" OR "high hydrostatic pressure") op één van de voor deze studie **relevante schimmels** (zoekterm: Rhizoctonia OR Helminthosporium OR Colletotrichum OR Fusarium) leverde 6 publicaties op, waarvan er hier de volgende 4 relevant zijn. Kalagatur et al. (2018a) bestudeerden de relatie tussen druk, temperatuur en behandelingsduur op de inactivatie van *Fusarium*(sporen) in mais. Goh et al (2007) onderzochten de beschermende effecten tegen hoge druk van mediumcomponenten voor gist en schimmels, waaronder *Fusarium*. Palhano (Palhano et al., 2004) zagen positieve resultaten van combinatiebehandelingen van hoge druk en etherische oliën voor de desinfectie *Colletotrichum* in papaya. Park et al. (2003) rapporteerden een volledige afdoding van *Fusarium* species bij 500 MPa onder de gecombineerde toepassing van CO₂.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **hoge hydrostatische druk** (zoekterm: "high-pressure processing" OR "high hydrostatic pressure") op één van de voor deze studie **relevante nematoden** (zoekterm: Meloidogyne OR Pratylenchus OR Ditylenchus OR Globodera) leverde geen enkele publicatie op.

2.2.8 Gepulseerde elektrische hoogspanning (*Pulsed electric field*)

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **hoogspanningspulsen** ("pulsed electric field") op één van de voor deze studie **relevante bacteriën** (zoekterm: Dickeya OR Pectobacterium OR Ralstonia OR

Clavibacter OR Streptomyces OR Erwinia) leverde 3 publicaties op waarvan 2 hier relevant zijn. (Altuntas et al., 2010) gebruikten de techniek voor gedeeltelijke inactivatie van *Pectobacterium catovora* (in bessensap) en (Seo et al., 2010) voor gedeeltelijke inactivatie van *Ralstonia solanacearum* (in grond).

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **hoogspanningspulsen** ("pulsed electric field") op één van de voor deze studie **relevante schimmels** (zoekterm: Rhizoctonia OR Helminthosporium OR Colletotrichum OR Fusarium) leverde 3 publicaties op: (Feng et al., 2019) voerden een microscopische studie uit naar de effecten van hoogspanningspulsen op de celmembranen van *Rhizoctonia solani*, (Zhong et al., 2019) onderzochten de effectiviteit van hoogspanningspulsen op de doding van *Fusarium oxysporum* in nutriënten oplossingen, en (Evrendilek et al., 2019) stelden vast dat de desinfecterende werking van de pulsen tegen schimmelpathogenen (waaronder *Fusarium graminearum*) op zaden van o.a. wintertarwe, gerst, tomaat, peterselie gepaard kan gaan met verbetering van zaadkwaliteit.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **hoogspanningspulsen** ("pulsed electric field") op één van de voor deze studie **relevante nematoden** (zoekterm: Meloidogyne OR Pratylenchus OR Ditylenchus OR Globodera) leverde geen enkele publicatie op.

2.2.9 Magnetisch veld

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **magnetisch veld** ("magnetic field*") op één van de voor deze studie **relevante bacteriën** (zoekterm: Dickeya OR Pectobacterium OR Ralstonia OR Clavibacter OR Streptomyces OR Erwinia) leverde 6 publicaties op waarvan er geen over microbiële inactivatie of desinfectie ging.

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **magnetisch veld** ("magnetic field*") op één van de voor deze studie **relevante schimmels** (zoekterm: Rhizoctonia OR Helminthosporium OR Colletotrichum OR Fusarium) leverde 7 publicaties op, waarvan er slechts twee desinfectie betroffen. Het ging hier om waargenomen groeiremming van kolonies en kiemremming van conidia van o.a. *Fusarium* onder invloed van magnetisch veld (Albertini et al., 2003; Nagy and Fischl, 2004).

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **magnetisch veld** ("magnetic field*") op één van de voor deze studie **relevante nematoden** (zoekterm: Meloidogyne OR Pratylenchus OR Ditylenchus OR Globodera) leverde geen enkele publicatie op.

2.2.9 Superkritische CO₂

(Lopes et al., 2018) geven een uitgebreid overzicht van studies uitgevoerd naar de uitschakeling van diverse micro-organismen en hun sporen middels toepassing van superkritische kooldioxide. Deze betreffen voornamelijk humaan-pathogene micro-organismen. Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **superkritische CO₂** ("supercritical carbon dioxide" OR "high-pressure carbon dioxide" OR "dense phase carbon dioxide") op één van de voor deze studie **relevante bacteriën** (zoekterm: Dickeya OR Pectobacterium OR Ralstonia OR Clavibacter OR Streptomyces OR Erwinia) of **relevante schimmels** (zoekterm: Rhizoctonia OR Helminthosporium OR Colletotrichum OR Fusarium) of **relevante nematoden** (zoekterm: Meloidogyne OR Pratylenchus OR Ditylenchus OR Globodera) leverde geen relevante publicaties op.

2.3 Effecten van fysische ontsmettingsmethoden op prestaties van aardappelpootgoed

2.3.1 Inleiding

Behalve ontsmettende werking kunnen de diverse fysische behandelingen ook uiteenlopende materiële, fysiologische en (bio)chemische (neven)effecten op het te ontsmetten plantaardige object zelf hebben. Zoals hieronder zal blijken is daarover met betrekking tot aardappelpootgoed weinig kennis beschikbaar. Om dat hiaat enigszins te compenseren is geprobeerd om ook aanvullende informatie te vinden over de fysiologische reacties op de diverse behandelingen van andere plantaardige producten. Interessant in dit verband is dat diverse fysische ontsmettingsmethoden vaak onderzocht zijn op hun potentie om de kiemkwaliteit van zaden te verbeteren (Rifna et al., 2019).

2.3.2 Thermische behandelingen

Het is welbekend dat thermische behandeling van levende objecten, zoals aardappelen, groenten en fruit, kunnen ingrijpen op fysiologische processen, zoals de ademhaling, rijping, de productie of afbraak van bepaalde metabolieten, of de weerbaarheid tegen biotische of abiotische stress. Zo kan hitte stress bijvoorbeeld als positieve nevenwerking negatieve effecten van koele bewaring van groente en fruit onderdrukken (Lurie, 2016). Maar de denaturatie van eiwitten en de beschadiging van celmembranen die bedoeld zijn om de pathogenen uit te schakelen, kunnen ook het weefsel van de aardappelknol treffen. De uitdaging is dan ook om een combinatie van behandelingsduur en temperatuur te vinden waarmee de ziekteverwekker kan worden geëlimineerd zonder dat er kiemschade ontstaat. De voorbeelden uit hoofdstuk 2.3.1 lieten zien dat dit in beginsel wel mogelijk is. In Canadees onderzoek uitgevoerd met knollen van cv. Superior die in rust waren bleek dat een warm water behandeling van 10 minuten bij 52.5 °C al leidde tot substantiële kiemschade (Ranganna et al., 1998). Maar in ander onderzoek uitgevoerd met cv. Maris Piper of met een onbekende cultivar resulteerde een behandeling van 10 tot 20 minuten bij 55 °C niet of nauwelijks in kiemschade (Dashwood et al., 1991; Hide, 1975). De marges lijken dus betrekkelijk smal en dienen proefondervindelijk te worden vastgesteld, waarbij rekening gehouden moet worden met factoren als cultivar en fysiologische conditie van de knollen ten tijde van de behandeling en het type van het te bestrijden micro-organisme of aaltje. De wijze waarop de thermische behandeling wordt uitgevoerd en de invloed die deze heeft op de efficiëntie van de daadwerkelijke warmteoverdracht naar de knollen is eveneens van belang. Bij blootstelling aan warm water, stoom en hete lucht wordt het oppervlak van de knol aan de verhoogde temperatuur blootgesteld, waarna – afhankelijk van de blootstellingsduur – vervolgens de warmte relatief traag de knol binnendringt. Bij opwarming middels *microwave* of *ohmic heating* wordt ook het binnenste van de knol direct aan de temperatuursbehandeling blootgesteld. Beide opwarmingstechnieken zijn om die reden waarschijnlijk aanzienlijk schadelijker voor de kwaliteit van het pootgoed dan warm water, stoom of hete lucht bij het bewerkstelligen van gelijke cfu-reducties. Bij warm water behandelingen worden slechts beperkte volumina pootgoed gelijktijdig behandeld, ten einde het water op een constante temperatuur te kunnen houden. Verder moeten ondergedompelde knollen snel gedroogd worden via ventilatie. Als knollen te lang bedekt blijven door een waterfilm en daardoor bloot gesteld worden aan een lage zuurstof spanning kan dat een negatief effect hebben op het afweermecanisme van de knol tegen ziekteverwekkers, met name tegen organismen die facultatief anaeroob zijn zoals soft rot *Pectobacteriaceae*.

2.3.3 Ioniserende straling

Toepassing van ioniserende straling om oppervlakkig aanwezige plantpathogenen te inactiveren brengt een inherent risico met zich mee van ongewenste neveneffecten op de te ontsmetten pootaardappelknollen. Omdat het penetrerend vermogen van gammastraling aanzienlijk hoger is dan dat van bètastraling, ligt toepassing van *e-beams* om deze reden (en eerder genoemde praktische redenen) meer voor de hand dan toepassing van gammastraling. Effecten van ioniserende straling op de aardappelknol lopen uiteen van kiemremming tot gewijzigde metabole processen die suiker- en zetmeelgehalte, en gehaltes aan fenolische en gezondheidsbevorderende stoffen controleren (Abd El-Ghany et al., 2017; Avdyukhina et al., 2018; Blessington et al., 2015; Boe and Demoura, 1977; Borsa et al., 1989; Coffin et al., 1988; Dale et al., 1997; Haverkort et al., 1991; McCollum, 1977; Ramamurthy et al., 2000; Rezaee et al., 2011; Siemens et al., 1988; Sparrow and Christensen, 1950). Afhankelijk van de situatie worden deze ongewenste neveneffecten soms beschouwd als gewenst hoofdeffect, waardoor ioniserende bestraling een alternatief wordt voor het gebruik van chemische kiemremmers tijdens de bewaring van consumptieaardappelen zie bijvoorbeeld (Frazier et al., 2006; Todoriki and Hayashi, 2004). De *International Consultative Group on Food Irradiation* beveelt een dosering van 50 tot 150 Gy gammastraling aan voor de kiemremming van aardappelen en groenten; voor bètastraling ligt die

dosering vermoedelijk rond de 200 Gy (Blessington et al., 2015). Dat zijn relatief lage doseringen. Dit roept de vraag op of doseringen die nodig zijn voor desinfectie negatief uitpakken voor de prestaties van pootgoed. Studies uit de negentiger jaren van de vorige eeuw waarin doseringen van 0.1 tot 10 Gy uit verschillende stralingsbronnen op pootgoed werden toegepast, gaven wisselende resultaten te zien (Haverkort et al., 1991). (Haverkort et al., 1991) behandelde pootgoed voor of na voorkieming eenmalig met gammastraling in doses van 0, 3, 9 of 27 Gy en stelden vast dat met 3 Gy het aantal knollen per plant vergroot kon worden, vermoedelijk door doding van de apex van de groeiende spruit en inductie van laterale groei punten. Toediening van 27 Gy resulteerde in atypische planten en een drastische reductie in aantal knollen. Dit wijst er op dat de doseringen die nodig zijn voor desinfectie (>1 kGy) desastreus zijn voor de vermeerderingskwaliteit van pootaardappelen.

2.3.4 UV-licht en pulsed light (PL)

De literatuur wijst op mogelijke neveneffecten van UV en *Pulsed light* op de kwaliteit van plantaardig uitgangsmateriaal. Zo zorgde PL toegepast op tarwezaden weliswaar voor een significante desinfectie van de zaden, maar tevens voor 15% afname van de zaadvitaliteit (Maftai et al., 2014). UV-C kan gebruikt worden om de kieming van aardappelen te remmen. In een studie met zes verschillende aardappelcultivars (Cools et al., 2014) leidde een matige dosis UV-C (254 nm; 5-20 kJ.m⁻² gedurende 1,5 minuut) toegediend rond het tijdstip van kieming tot vermindering van aantal en lengte van de kiemen; die kiemremming was geringer wanneer de UV-C werd toegediend rond het oogsttijdstip van de knollen. Bij geen van de UV-C doseringen werd DNA schade of geprogrammeerde celdood vastgesteld in het knolperiderm; een dosis van 30 kJ.m⁻² zorgde voor een tijdelijke toename van chlorogeenzuur; volgens de auteurs omvat de kiemremming mogelijk de door UV-C geïnduceerde omzetting van het hormoon ABA naar een inactief ABA-conjugaat. Of desinfecterende doseringen UV en *pulsed light* schade aan de kwaliteit van pootaardappelen toebrengen, zal experimenteel onderzocht moeten worden.

2.3.5 Ultrasonische trillingen

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **ultrasoon geluid** (zoekterm: ultrason*) voor **desinfectie** (zoekopdracht: decontamination OR disinfection OR sterili?ation OR pasteurization) leverde 804 publicaties op. Geen daarvan ging over behandeling van pootaardappelen of consumptie-aardappelen. Ultrasonische desinfectie vindt vooral toepassing in de voedingsmiddelenindustrie, met name bij de pasteurisatie van vruchten- en groentesappen. Studies naar ultrasonische behandeling van ander plantaardig weefsel dan aardappelknollen kunnen een indruk geven over de eventuele schadelijke effecten op de kwaliteit van pootgoed. De meeste studies naar vers plantaardig materiaal betreffen echter voedingsmiddelen en behandelen dan ook niet kwaliteitsparameters die van belang zijn voor plantaardige vermeerdering (zie voor een overzicht (Bilek, 2013 #786). Ultrasonische trillingen zijn onderzocht als middel om de kieming van zaden (zoekopdracht: AND seed*) te verbeteren. Deze studies wijzen op een gunstig effect van ultrasonische golven op kwaliteitsparameters van zaad (Chiu, 2015; Chiu and Sung, 2014; Miano et al., 2015; Wang et al., 2019). (Chiu, 2015) rapporteerden een desinfectie tot 3-log CFU.g⁻¹ en een verbeterde kieming van alfalfa, mungbonen, erwten en radijs. (Pinheiro et al., 2015) rapporteren goede resultaten voor verlenging van houdbaarheid van tomaten. Studies met verse aardbeien lieten zien dat met een juiste frequentie en intensiteit het bederf van de vruchten en de microbiologische populatie significant verminderd kan worden, met behoud van fysiologische kwaliteitsparameters (Aday et al., 2013; Cao et al., 2010).

2.3.6 Koud plasma

Hoewel er betrekkelijk veel studies zijn verricht naar koud plasma behandelingen van vers plantaardig weefsel, leverde screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **koud plasma** (zoekterm: cold plasma) voor **aardappel** (zoekterm: potato*) geen informatie op over de fysiologische effecten van de behandeling op aardappelpootgoed. Over de fysiologische effecten op zaad zijn daarentegen wel behoorlijk veel waarnemingen gepubliceerd, met name waarnemingen die vergaard zijn in de zoektocht naar fysiologische methoden om de kiemkwaliteit en kiemrust van zaden te verbeteren. Het gunstige effect wordt toegeschreven aan de etsende werking van de behandeling op het zaadoppervlak, wat onder andere de hydratatie van de zaden zou bevorderen, en aan de inductie van gunstige stress-reacties. Een zeer recent overzicht van de literatuur op dit terrein wordt geboden door (Rifna et al., 2019). Op basis van deze informatie lijkt het redelijk te veronderstellen dat pootgoedaardappelen mogelijk ook bestand

zijn tegen (milde) koud plasma behandelingen; zekerheid hierover kan slechts uit experimenteel onderzoek komen.

2.3.7 Hoge hydrostatische druk (high-pressure processing)

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **hoge hydrostatische druk** ("high-pressure processing" OR "high hydrostatic pressure") voor **desinfectie** (zoekopdracht: decontamination OR disinfection OR sterilization OR pasteurization) leverde 712 publicaties op. Slechts een twintigtal daarvan geven enige informatie over eventuele negatieve effecten van hoge hydrostatische druk op biologische structuren en levensprocessen van plantaardig weefsel. De rest betreft voornamelijk puree, sappen, melk, vlees en vis. Op basis van de literatuur is het redelijk te veronderstellen dat de potentiële schade van hoge hydrostatische druk primair toegebracht wordt aan de integriteit van de celmembranen en de membranen die de celcompartimenten omgeven (bijvoorbeeld de tonoplast die de vacuole omsluit), wat zich materieel vertaalt in verlies aan turgor en celcompartimentalisatie. De vraag is dan in hoeverre het betreffende plantorgaan in staat is deze schade te herstellen. Recentelijk onderzochten Rux et al voor knolletjes van radijs de relatie van druk, behandelingsduur en temperatuur op turgorverlies en turgorherstel (Rux et al., 2019). Vastgesteld werd dat er ook na 5-10 minuten blootstelling aan druk tot circa 100 MPa bij 20-40 °C vermogen aanwezig bleef tot turgorherstel; verondersteld wordt dat boven die drukgrens de activiteit en expressie van eiwitten die de homeostase verzorgen irreversibel beschadigd worden (Rux et al., 2019). Over de effecten op de kieming van pootgoed is nauwelijks gepubliceerd. Drie maanden oud aardappelpootgoed dat 5 en 10 minuten blootgesteld was aan 100 MPa vertoonde geen kieming meer, terwijl aan de hand van kiemlengte, -groei en -massa bij toepassing van lagere druk (30 en 50 MPa) enige kiemremming werd vastgesteld; vijf maanden oud pootgoed bleek drukgevoeliger dan drie maanden oud pootgoed (Saraiva and Rodrigues, 2011). Ook de kiemprestaties van zaden (alfalfa, broccoli, mosterd, erwten, knolraap) heeft te lijden van blootstelling aan hoge druk, waarbij de schade toeneemt met toenemende druk en blootstellingsduur (zie voor een recent literatuuroverzicht (Rifna et al., 2019).

2.3.8 Gepulseerde elektrische hoogspanning (*Pulsed electric field*)

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **hoogspanningspulsen** ("pulsed electric field") op **aardappel** (zoekopdracht: potato*) leverde 72 publicaties op. Deze betroffen nagenoeg allemaal studies naar het gebruik van de technologie voor de voorbereiding van aardappelweefsel ten behoeve van de verdere verwerking tot voedingsproduct. Geen van deze publicaties geeft inzicht in mogelijk kwaliteitsverlies van pootgoed als gevolg van toepassing van *pulsed electric fields*. Wel wijzen de resultaten van enkele studies erop dat aardappelen in staat zijn door hoogspanningspulsen veroorzaakte schade te repareren en de daartoe benodigde metabole processen te mobiliseren (Ben Ammar et al., 2010; Ben Ammar et al., 2011; Grimi et al., 2011; Wu et al., 2011). Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **hoogspanningspulsen** ("pulsed electric field") op **zaad** (zoekopdracht: seed*) leverde 55 publicaties op, waarvan er 10 rapporteren over gunstige fysiologische effecten van hoogspanningspulsen toegepast op zaden van gerst (Dymek et al., 2012), *Arabidopsis* (Songnuan and Kirawanich, 2012; Songnuan et al., 2015), *Haloxylon ammodendron* (Su et al., 2015), kool (Atanov et al., 2016), met water geïmbibeerd graszaad (Leong et al., 2016) of zaailingen van *Arabidopsis* (Eing et al., 2009) en mais (He et al., 2017; He et al., 2016). Gunstige fysiologische effecten die gemeld worden, zijn o.a. verhoging van het kiempercentage, groeibevordering van blad en wortel, en geïnduceerde droogteresistentie. Zie voor aanvullende informatie het recente overzichtsartikel van (Rifna et al., 2019). Of die niet-lethale doseringen (van veldsterkte, toedieningsduur, en toedieningsfrequentie) voldoende zijn voor een substantiële reductie van de pathogenen en nematoden die voor pootaardappelen van belang zijn, moet experimenteel onderzoek uitwijzen. Bij zaden van sla en tarwe werd gevonden dat met deze technologie een reductie van tenminste 2.8 log-eenheden gehaald kon worden voor totaal aanwezige mesofiele aerobe bacteriën en totaal aanwezige schimmels zonder optreden van zaadkwaliteitsverlies (Evrendilek and Tanasov, 2017).

2.3.9 Magnetisch veld

Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **magnetisch veld** ("magnetic field*") op **aardappel** (zoekopdracht: potato*) leverde 28 publicaties op. Geen daarvan gaan over het effect op pootgoed. Wel

zijn er effecten gerapporteerd op *in vitro* plantjes (waaronder aardappelplantjes), zoals op morfologie, groei van scheut en wortel, op bladgroen, op gehalten aan bepaalde enzymen en planthormonen (da Silva and Dobranszki, 2015; Rakosy-Tican et al., 2005). Dergelijke waarnemingen zijn ook gedaan op hele aardappelplanten (Marks and Szecowka, 2010). Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **magnetisch veld** ("magnetic field*") op **zaad** (zoekopdracht: seed*) leverde 228 publicaties op. Hieronder bevonden zich 61 overzichtsartikelen (review), waarvan er 8 een overzicht geven van studies waarin gunstige effecten gerapporteerd worden van magnetische velden op onder andere de zaadkwaliteit en de kieming van zaden (da Silva and Dobranszki, 2016; Maffei, 2014; Pietruszewski and Martinez, 2015; Radhakrishnan, 2019; Rakosy-Tican et al., 2005; Rifna et al., 2019; Wang et al., 2019). Niettemin zal toekomstig onderzoek moeten uitwijzen wat de effecten zijn op de kwaliteit van aardappelpootgoed.

2.3.10 Superkritische CO₂

(Zhou et al., 2015) geven een overzicht van de neveneffecten van superkritische CO₂ op smaak, textuur en kleur van een breed scala aan voedingsmiddelen. Zij refereren aan onderzoek waaruit blijkt dat verse producten van groente en fruit door de behandeling schade aan celmembranen kunnen oplopen, met elektrolytlekkage en turgorverlies tot gevolg, toenemend met oplopende druk. Screening van de literatuur (zoekveld: 'topic'; timespan: 1945-2019; database: Web of Science Core Collection) naar studies over de toepassing van **superkritische CO₂** ("supercritical carbon dioxide" OR "high-pressure carbon dioxide" OR "dense phase carbon dioxide") op **aardappel** (zoekopdracht: potato*) leverde geen informatie op over eventuele neveneffecten van de behandeling op de kwaliteit van aardappelpootgoed. Screening van de literatuur voor informatie over eventuele neveneffecten van de technologie op de kieming van zaad ("supercritical carbon dioxide" OR "high-pressure carbon dioxide" OR "dense phase carbon dioxide", gecombineerd met de zoektermen seed* en germination), leverde een viertal publicaties op. Park et al. (2013) en Park et al. (2012) rapporteerden dat de desinfecterende effectiviteit van de behandelingen op zaden van gerst tegen *Penicillium oxalicum* toeneemt bij hogere druk, maar dat daarmee de kiemkracht significant afneemt. Min of meer hetzelfde werd gevonden bij alfalfa ten aanzien van *Listeria*, *Escherichia coli* en *Salmonella* (Jung et al., 2009; Mazzoni et al., 2001). De auteurs claimen dat de technologie niettemin van nut kan zijn voor de desinfectie van zaden met behoud van kiemkracht. Of dat ook het geval is voor aardappelpootgoed zal toekomstig onderzoek moeten uitwijzen.

3 Conclusies

3.1 Inleiding

Deze rapportage geeft een overzicht van in de literatuur besproken fysische methoden (hoofdstuk 2.1) waarmee pathogenen en plaagorganismen geïnactiveerd, gedood of verwijderd kunnen worden. De methoden blijken vooral gangbaar of deels in ontwikkeling te zijn voor met name de desinfectie en verwerking van voedingsmiddelen, en veel minder, of in het geheel niet voor desinfectie van aardappelpootgoed. Het gaat dan voornamelijk om humaan-pathogene en bederf veroorzakende micro-organismen. Dit verklaart wellicht waarom er niet voor alle methoden onderzoeksgegevens beschikbaar zijn over de effectiviteit tegen de voor specifiek voor pootgoed relevante pathogenen en nematoden (hoofdstuk 2.2). Hetzelfde geldt *mutatis mutandis* voor de relatief geringe hoeveelheid literatuurgegevens over de mogelijke schade die toepassing van deze technieken op de kwaliteit van aardappelpootgoed kan hebben (hoofdstuk 2.3). Interessant is dat veel van de fysische behandelingen ook onderwerp van onderzoek zijn voor verbetering van de kiemeigenschappen van zaaigoed. Opmerkelijk is dat toepassing van alle genoemde technologieën, met uitzondering van hoge hydrostatische druk en UV, als potentieel gunstig beschouwd worden voor de kiemkwaliteit van zaden (zie de review van Rifna et al., 2019). Voor zaden lijken dus diverse fysische methoden beschikbaar waarmee zowel desinfectie als verbetering van zaadkwaliteit bereikt kan worden. Op basis van de verzamelde informatie (hoofdstukken 2.2 en 2.3) wordt in dit hoofdstuk per fysische behandelingsmethode een bondige inschatting gemaakt van de potentie voor desinfectie van aardappelpootgoed.

3.2 Thermische behandelingen

Aangetoond is dat met onderdompeling van pootgoed in *warm water* substantiële reducties van relevante pathogene schimmels, bacteriën en aaltjes bereikt kunnen worden, met behoud van de kiemkwaliteit van de knol. Het succes is echter sterk afhankelijk van de combinatie van het aardappelras en de benodigde temperatuur/behandelingsduur, welke op haar beurt gediceerd wordt door het te bestrijden type van micro-organisme of aaltje. Vaak zal daarom slechts een beperkte CFU-reductie haalbaar zijn om de kiemkwaliteit van de knol te kunnen behouden. Warm water behandelingen kunnen daarom vooral interessant zijn in combinatie met één of meer andere fysische desinfectiemethoden.

Hetzelfde kan geconcludeerd worden over de potentie van *stoom*behandelingen, zij het dat hiervoor minder literatuurgegevens beschikbaar zijn en dat gegevens met betrekking tot de bestrijding van relevante aaltjes ontbreken. Gezien de geringe hoeveelheid data is het lastig over *hete lucht* behandelingen uitspraken te doen. Een belangrijk voordeel van stoom en hete lucht ten opzichte van warm water is dat de kans op kruisbesmetting veel kleiner is. Warmte-toediening middels *microwave* of *ohmic heating* is wegens de te verwachten schade aan de knol niet aan te bevelen.

3.3 Ioniserende straling

Op basis van de verzamelde literatuurgegevens kan geconcludeerd worden dat doseringen ioniserende straling die toegepast moeten worden om substantiële CFU-reducties van microbiële pathogenen te bereiken aanzienlijk hoger liggen dan de doseringen die onaanvaardbare schade aan de kiemen van het pootgoed toebrengen. Deze fysische desinfectiemethode lijkt daarom ongeschikt voor de desinfectie van aardappelpootgoed.

3.4 UV-licht en *pulsed light*

Met UV-licht en *pulsed light* zijn substantiële CFU-reducties te bereiken van pathogene schimmels en bacteriën die relevant zijn voor pootgoed; over het effect op pathogene aaltjes zijn geen literatuurgegevens gevonden. De gerapporteerde kiemremmende effecten van UV op pootgoed, en de negatieve effecten op vitaliteit van zaad vormen een aanwijzing dat de dosering en daarmee de desinfectie veelal beperkt zal moeten worden om pootgoedkwaliteit te kunnen behouden. Deze technologie is daarom vermoedelijk interessant in combinatie met andere fysische desinfectiemethoden.

3.5 Ultrasonische golven

De literatuur biedt geen informatie over de potentie van ultrasonische golven voor de bestrijding van relevante bacteriën en aaltjes in pootgoed, en over eventuele negatieve effecten op de kwaliteit van aardappelpootgoed. Wel is aangetoond dat ultrasonische golven een gunstig effect kunnen hebben op kwaliteitsparameters van zaaizaad. Toepassing van de technologie op praktijkschaal lijkt niet eenvoudig te zijn. De literatuur roept een wisselend beeld op van de effectiviteit. De noodzaak een vloeibaar medium te gebruiken introduceert een verhoogd risico van kruisbesmetting. Gebruik van de technologie voor ontsmetting van pootgoed ligt niet voor de hand; wellicht kan het in combinatie met andere ontsmettingsmethoden zinvol zijn. Dat zal naar verwachting relatief complex onderzoek vergen.

3.6 Koud plasma

Met koud plasma zijn substantiële CFU-reducties te bereiken van pathogene schimmels en bacteriën die relevant zijn voor pootgoed; over het effect op pathogene aaltjes zijn geen literatuurgegevens gevonden. Studies met zaden en verse aardbeien duiden op succesvolle desinfectie met gunstige effecten voor de fysiologie van het product. Over eventuele kwaliteitsschade voor aardappelpootgoed zijn hier geen data aangetroffen in de literatuur. Omdat het om oppervlakkige desinfectie gaat met een geringe penetratie is het niet onredelijk te veronderstellen dat er mogelijkheden zijn om atmosferische, koude zuurstof of stikstof plasma succesvol toe te passen voor (gedeeltelijke) desinfectie met behoud van pootgoedkwaliteit.

3.7 Hoge hydrostatische druk

Met hoge hydrostatische druk is inactivatie mogelijk van pathogene schimmels en bacteriën die relevant zijn voor pootgoed; over het effect op pathogene aaltjes zijn geen literatuurgegevens gevonden. De toepassing van deze technologie vereist dat het pootgoed in water wordt gebracht, wat het risico op kruisbesmetting verhoogt. Bij drukniveau's die minimaal enige relevante desinfectie teweeg brengen, kan

op basis van de beschikbare literatuur schade aan plantaardig weefsel, waaronder de kiemen van zowel zaden als pootgoed, verwacht worden. Hoewel weefsel tot op zekere hoogte het vermogen bezit om deze schade te herstellen, is deze desinfectiemethode vanwege dit schaderisico niet als eerste keuze aan te bevelen.

3.8 Elektrische hoogspanningspulsen

Aangetoond is dat elektrische hoogspanningspulsen pathogene schimmels en bacteriën kunnen uitschakelen die relevant zijn voor aardappelpootgoed; over de werkzaamheid tegen relevante aaltjes zijn hier geen gegevens gevonden. De technologie is niet effectief voor het doden van sporen. Over de effecten op de kwaliteit van pootgoed is geen informatie beschikbaar. De literatuur bevat vele voorbeelden van de opwekking van gunstige fysiologische effecten bij zaad en zaailingen middels toediening van elektrische hoogspanningspulsen. Voor desinfectie van pootgoed dient gezocht te worden naar de effectieve dosering (hoogspanningsniveau, en duur en aantal pulsen) die geen kwaliteitsverlies voor de pootaardappel oplevert.

3.9 Magnetisch veld

Hoewel er wel gepubliceerd is over waargenomen inactivatie van micro-organismen, waaronder *Fusarium*, onder toepassing van magnetische velden, lijkt er in de literatuur geen consensus te bestaan over het praktisch nut van magnetisme als desinfectie-methode, omdat effect ook wel eens uitbleef. Het is geen gangbare technologie in de voedingmiddelensector. Over negatieve effecten op pootgoedkwaliteit is niets bekend. Op basis van gunstige fysiologische effecten gerapporteerd voor andere gewassen, kan wellicht gespeculeerd worden dat het risico op kwaliteitsverlies relatief klein is. De literatuur biedt niettemin te weinig gegevens die toepassing van magnetische velden rechtvaardigen voor desinfectie van pootgoed.

3.10 Superkritische CO₂

De geraadpleegde databestanden bevatten geen publicaties over toepassing van superkritische CO₂ op aardappelpootgoed, of op de voor pootgoed relevante organismen. Wel is aangetoond dat met deze technologie uiteenlopende micro-organismen inclusief sporen geïnactiveerd kunnen worden. Dit maakt het aannemelijk dat superkritische CO₂ in principe mogelijkheden biedt voor desinfectie van pootgoed. De literatuur rapporteert echter over teruglopende kiemkracht bij zaden als gevolg van de behandeling, afhankelijk van de gebruikte druk. Om de potentie van deze technologie voor pootgoedontsmetting te kunnen inschatten is dus zowel onderzoek naar de desinfecterende werking zelf, als onderzoek naar de neveneffecten op de fysiologie van de knol nodig.

3.11 Combinatie van fysische desinfectiemethoden

Zowel de keuze van de desinfectiemethode, als de dosering van de behandeling dienen zodanig te zijn dat de kwaliteit van het pootgoed niet aangetast wordt. Dit kan betekenen dat een deel van de desinfectie-capaciteit van de behandeling onbenut gelaten moet worden en met de methode slechts een gedeeltelijke reductie van pathogene micro-organismen en aaltjes bereikt kan worden. Gezien de hier geëvalueerde literatuurgegevens zal deze situatie zich vermoedelijk vaak voor doen. Om die reden werd hierboven al gezinspeeld op het combineren van desinfectie-methoden. Ook in de literatuur wordt veelvuldig geopperd om meerdere methoden tegelijk of direct na elkaar toe te passen. Bij voorkeur kiest men dan methoden die de te bestrijden organismen op verschillende wijze onder druk zetten, dus methoden die een complementaire, niet identieke werking hebben. Volgens het zogenoemde hurdle-principe (Leistner, 1978) kunnen micro-organismen energetisch uitgeput raken door toepassing van meerdere typen van relatief milde stress. Voordeel is dat het pootgoed hierbij slechts blootstaat aan (combinaties van) relatief milde stress. Een voorbeeld van wassen gecombineerd met thermische behandeling is de lijn voor aardappels gepresenteerd door (Lurie, 2016), waarbij de knollen eerst schoon gespoeld worden met kraanwater, vervolgens op borstelrollers blootgesteld worden aan warmwaterdouches, en tenslotte onder geforceerde lucht gedroogd worden. Een ander voorbeeld, waarbij niet uitsluitend fysische, maar ook chemische desinfectiemethoden gebruikt worden is de zogenoemde Ventafresh technologie, waarbij combinaties van ozon met UV-C, wassen, ultrageluid en verpakking onder gemodificeerde atmosfeer toegepast worden (Steffen et al., 2010). Behandelcombinaties van temperatuur en gemodificeerde atmosfeer, zoals verlaagde zuurstofspanning of verhoogde CO₂, staat bekend als *controlled atmosphere and temperature treatment* (CATT). Deze

technologie is met name interessant voor de bestrijding van schimmels, insecten en aaltjes (zie bijvoorbeeld (Van Kruistum, 2014 #945).

4 Literatuur

- Abbasian, E.G., M. Bayat, A.C. Nosrati, S.J. Hashemi, and M. Ghoranneviss. 2017. Study of the effect of plasma jet on Fusarium isolates with ability to produce DON toxins. *World Family Medicine*. 15:204-207.
- Abd El-Ghany, H., Z. Moussa, E.A. Salem, and A.F. Abd El-Rahman. 2017. Management of Potato Soft Rot by Gamma Irradiation. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*. 50:159-173.
- Aday, M.S., R. Temizkan, M.B. Buyukcan, and C. Caner. 2013. An innovative technique for extending shelf life of strawberry: Ultrasound. *Lwt-Food Science and Technology*. 52:93-101.
- Afek, U., and J. Orenstein. 2002. Disinfecting potato tubers using steam treatments. *Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne De Phytopathologie*. 24:36-39.
- Afek, U., J. Orenstein, and E. Nuriel. 1999. Fogging disinfectants inside storage rooms against pathogens of potatoes and sweet potatoes. *Crop Protection*. March, 1999;. 18:111-114.
- Albertini, M.C., A. Accorsi, B. Citterio, S. Burattini, M.P. Piacentini, F. Uguccioni, and E. Piatti. 2003. Morphological and biochemical modifications induced by a static magnetic field on Fusarium culmorum. *Biochimie*. 85:963-970.
- Albuquerque, W.W.C., R. Costa, T.D.E. Fernandes, and A.L.F. Porto. 2016. Evidences of the static magnetic field influence on cellular systems. *Progress in Biophysics & Molecular Biology*. 121:16-28.
- Alpas, H., N. Kalchayanand, F. Bozoglu, A. Sikes, C.P. Dunne, and B. Ray. 1999. Variation in resistance to hydrostatic pressure among strains of food-borne pathogens. *Applied and Environmental Microbiology*. 65:4248-4251.
- Altuntas, J., G.A. Evrendilek, M.K. Sangun, and H.Q. Zhang. 2010. Effects of pulsed electric field processing on the quality and microbial inactivation of sour cherry juice. *International Journal of Food Science and Technology*. 45:899-905.
- Anderson, J.G., N.J. Rowan, S.J. MacGregor, R.A. Fouracre, and O. Farish. 2000. Inactivation of food-borne enteropathogenic bacteria and spoilage fungi using pulsed-light. *Ieee Transactions on Plasma Science*. 28:83-88.
- Angersbach, A., V. Heinz, and D. Knorr. 2002. Evaluation of process-induced dimensional changes in the membrane structure of biological cells using impedance measurement. *Biotechnology Progress*. 18:597-603.
- Atanov, I.V., M.A. Mastepanenko, A.V. Ivashina, V.G. Zhdanov, E.A. Logacheva, and V.N. Avdeeva. 2016. Seed Treatment by Pulsed Electric Field Before Sowing. *Research Journal of Pharmaceutical Biological and Chemical Sciences*. 7:1664-1671.
- Avdyukhina, V.M., U.A. Bliznyuk, P.Y. Borschegovskaya, A.V. Buslenko, A.S. Ilyushin, E.G. Kondratieva, G.A. Krusanov, I.S. Levin, A.P. Sinitsyn, F.R. Studenikin, and A.P. Chernyaev. 2018. An Investigation of the Effects of X-Ray Treatment on the Concentration of Reducing Sugars in Potatos and Their Sprouting. *Moscow University Physics Bulletin*. 73:334-338.
- Awad, T.S., H.A. Moharram, O.E. Shaltout, D. Asker, and M.M. Youssef. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*. 48:410-427.
- Aziz, N.H., E.S.A. Attia, and S.A. Farag. 1997. Effect of gamma-irradiation on the natural occurrence of Fusarium mycotoxins in wheat, flour and bread. *Nahrung-Food*. 41:34-37.
- Aziz, N.H., F.M. El-Far, A.A.M. Shahin, and S.M. Roushy. 2007. Control of Fusarium moulds and fumonisin B-1 in seeds by gamma-irradiation. *Food Control*. 18:1337-1342.
- Ben Ammar, J., J.L. Lanoiselle, N.I. Lebovka, E. Van Hecke, and E. Vorobiev. 2010. Effect of a Pulsed Electric Field and Osmotic Treatment on Freezing of Potato Tissue. *Food Biophysics*. 5:247-254.
- Ben Ammar, J., J.L. Lanoiselle, N.I. Lebovka, E. Van Hecke, and E. Vorobiev. 2011. Impact of a Pulsed Electric Field on Damage of Plant Tissues: Effects of Cell Size and Tissue Electrical Conductivity. *Journal of Food Science*. 76:E90-E97.
- Bhilwadikar, T., S. Pounraj, S. Manivannan, N.K. Rastogi, and P.S. Negi. 2019. Decontamination of Microorganisms and Pesticides from Fresh Fruits and Vegetables: A Comprehensive Review from Common Household Processes to Modern Techniques. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 18:1003-1038.
- Bilek, S.E., and F. Turantus. 2013. Decontamination efficiency of high power ultrasound in the fruit and vegetable industry, a review. *International Journal of Food Microbiology*. 166:155-162.
- Blessington, T., D.C. Scheuring, M.N. Nzaramba, A.L. Hale, L. Reddivari, T.A. Vestal, J.E. Maxim, and J.C. Miller. 2015. The Use of Low-Dose Electron-Beam Irradiation and Storage Conditions for Sprout Control and their Effects on Xanthophylls, Antioxidant Capacity, and Phenolics in the Potato Cultivar Atlantic. *American Journal of Potato Research*. 92:609-618.
- Boe, A.A., and J. Demoura. 1977. Effect of low dosage gamma-irradiation on emergence, growth, yield, and sugar and protein-content of potato. *Hortscience*. 12:64-66.
- Borsa, J., A.J. Siemens, and G. Mazza. 1989. Effects of gamma-irradiation on sprout inhibition and processing quality of Norchip and Russet Burbank potatoes. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal-Journal De L Institut Canadien De Science Et Technologie Alimentaires*. 22:491-495.
- Bos, D., and A. Veerman. 2001. Toetsing van de effectiviteit van een warmwaterbehandeling tegen zilverschuif in aardappelen. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Lelystad.
- Buchachenko, A. 2016. Why magnetic and electromagnetic effects in biology are irreproducible and contradictory? *Bioelectromagnetics*. 37:1-13.
- Burm, K. 2012. Plasma: The Fourth State of Matter. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 32:401-407.

- Cao, S.F., Z.C. Hu, B. Pang, H.O. Wang, H.X. Xie, and F. Wu. 2010. Effect of ultrasound treatment on fruit decay and quality maintenance in strawberry after harvest. *Food Control*. 21:529-532.
- Chang, E.H., Y.S. Bae, I.S. Shin, H.J. Choi, J.H. Lee, and J.W. Choi. 2018. Microbial Decontamination of Onion by Corona Discharge Air Plasma during Cold Storage. *Journal of Food Quality*.
- Chemat, F., H. Zill e, and M.K. Khan. 2011. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*. 18:813-835.
- Cheon, W., Y.S. Kim, K. Balaraju, B.S. Kim, B.H. Lee, and Y. Jeoni. 2016. Postharvest Disease Control of Colletotrichum gloeosporioides and Penicillium expansum on Stored Apples by Gamma Irradiation Combined with Fumigation. *Plant Pathology Journal*. 32:460-468.
- Chinnasri, B., J.H. Moy, B.S. Sipes, and D.P. Schmitt. 1997. Effect of gamma-irradiation and heat on root-knot nematode, Meloidogyne javanica. *Journal of Nematology*. 29:30-34.
- Chiu, K.Y. 2015. Ultrasonication-enhanced microbial safety of sprouts produced from selected crop species. *Journal of Applied Botany and Food Quality*. 88:120-126.
- Chiu, K.Y., and J.M. Sung. 2014. Use of ultrasonication to enhance pea seed germination and microbial quality of pea sprouts. *International Journal of Food Science and Technology*. 49:1699-1706.
- Clauss, M. 2006. Higher effectiveness of photoinactivation of bacterial spores, UV resistant vegetative bacteria and mold spores with 222 nm compared to 254 nm wavelength. *Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica*. 34:525-532.
- Coffin, R.H., R.Y. Yada, E.C. Loughed, M.K. Keenan, and M. Slavnik. 1988. Effects of gamma-irradiation on sprout inhibition and processing quality of Norchip and Russet Burbank potatoes. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal-Journal De L Institut Canadien De Science Et Technologie Alimentaires*. 21:363-363.
- Considine, K.M., A.L. Kelly, G.F. Fitzgerald, C. Hill, and R.D. Sleator. 2008. High-pressure processing - effects on microbial food safety and food quality. *Fems Microbiology Letters*. 281:1-9.
- Cools, K., M.D. Alamar, and L.A. Terry. 2014. Controlling sprouting in potato tubers using ultraviolet-C irradiance. *Postharvest Biology and Technology*. 98:106-114.
- Cox, R.J., E.H. Moody, and C.J. Southards. 1976. Effects of neutron irradiation on Meloidogyne incognita. *Journal of Nematology*. 8:282-282.
- Crawford, L.M., and E.H. Ruff. 1996. A review of the safety of cold pasteurization through irradiation. *Food Control*. 7:87-97.
- Currier, R.W., and J.A. Widness. 2018. A Brief History of Milk Hygiene and Its Impact on Infant Mortality from 1875 to 1925 and Implications for Today: A Review. *Journal of Food Protection*. 81:1713-1722.
- Czajkowski, R., G.J. Grabe, and J.M. van der Wolf. 2009. Distribution of Dickeya spp. and Pectobacterium carotovorum subsp carotovorum in naturally infected seed potatoes. *European Journal of Plant Pathology*. 125:263-275.
- da Silva, J.A.T., and J. Dobranszki. 2015. How do magnetic fields affect plants in vitro? *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 51:233-240.
- da Silva, J.A.T., and J. Dobranszki. 2016. Magnetic fields: how is plant growth and development impacted? *Protoplasma*. 253:231-248.
- Dale, M.F.B., D.W. Griffiths, H. Bain, and B.A. Goodman. 1997. The effect of gamma irradiation on glycoalkaloid and chlorophyll synthesis in seven potato cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 75:141-147.
- Dashwood, E.P., E.M. Burnett, and M.C.M. Perombelon. 1991. Effect of a continuous hot water treatment of potato tubers on seed-borne fungal pathogens. *Potato Research*. 34:71-78.
- Deepthi, B.V., A.P. Gnanaprakash, and M.Y. Sreenivasa. 2017. Effect of gamma-irradiation on fumonisin producing Fusarium associated with animal and poultry feed mixtures. *3 Biotech*. 7.
- Downey, D., D.K. Giles, M.J. Delwiche, and J.D. MacDonald. 1998. Development and validation of a general model for predicting biological efficacy of UV reactors against plant pathogens in irrigation water. *Transactions of the Asae*. 41:849-857.
- Du Raan, S., T.A. Coutinho, and J.E. Van der Waals. 2016. Cardinal temperature differences, determined in vitro, between closely related species and subspecies of pectinolytic bacteria responsible for blackleg and soft rot on potatoes. *European Journal of Plant Pathology*. 144:361-369.
- Dymek, K., P. Dejmek, V. Panarese, A.A. Vicente, L. Wadso, C. Finnie, and F.G. Galindo. 2012. Effect of pulsed electric field on the germination of barley seeds. *Lwt-Food Science and Technology*. 47:161-166.
- Ehret, D.L., B. Alsanius, W. Wohanka, J.G. Menzies, and R. Utkhede. 2001. Disinfestation of recirculating nutrient solutions in greenhouse horticulture. *Agronomie*. 21:323-339.
- Eing, C.J., S. Bonnet, M. Pacher, H. Puchta, and W. Frey. 2009. Effects of Nanosecond Pulsed Electric Field Exposure on Arabidopsis thaliana. *Ieee Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 16:1322-1328.
- Evrendilek, G.A., B. Karatas, S. Uzuner, and I. Tanasov. 2019. Design and effectiveness of pulsed electric fields towards seed disinfection. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 99:3475-3480.
- Evrendilek, G.A., and I. Tanasov. 2017. Configuring pulsed electric fields to treat seeds: an innovative method of seed disinfection. *Seed Science and Technology*. 45:72-80.
- Fallik, E. 2004. Prestorage hot water treatments (immersion, rinsing and brushing). *Postharvest biology and technology*. 32:125-134.
- Fan, W., Z. Huang, and B. Fan. 2018. Effects of prolonged exposure to moderate static magnetic field and its synergistic effects with alkaline pH on Enterococcus faecalis. *Microbial Pathogenesis*. 115:117-122.
- Feng, X.B., Q.H. Jiang, M.Y. Zhu, J. Jiang, W.Q. Yin, and H. Li. 2019. Damaging Effects of Pulsed Electric Field Process Parameters on Rhizoctonia solani Cells Using Response Surface Methodology. *Applied Sciences-Basel*. 9.
- Fernandez, A., E. Noriega, and A. Thompson. 2013. Inactivation of Salmonella enterica serovar Typhimurium on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology. *Food Microbiology*. 33:24-29.

- Ferreira-Castro, F.L., S. Aquino, R. Greiner, D.H.B. Ribeiro, T.A. Reis, and B. Correa. 2007. Effects of gamma radiation on maize samples contaminated with *Fusarium verticilloides*. *Applied Radiation and Isotopes*. 65:927-933.
- Frazier, M.J., G.E. Kleinkopf, R.R. Brey, and N.L. Olsen. 2006. Potato sprout inhibition and tuber quality after treatment with high-energy ionizing radiation. *American Journal of Potato Research*. 83:31-39.
- Freita-Silva, O., P.S. de Oliveira, and M. Freire. 2015. Potential of Electron Beams to Control Mycotoxigenic Fungi in Food. *Food Engineering Reviews*. 7:160-170.
- Gaze, J.E., A.R. Boyd, and H.L. Shaw. 2006. Heat inactivation of *Listeria monocytogenes* Scott A on potato surfaces. *Journal of Food Engineering*. 76:27-31.
- Goh, E.L.C., A.D. Hocking, C.A. Stewart, K.A. Buckle, and G.H. Fleet. 2007. Baroprotective effect of increased solute concentrations on yeast and moulds during high pressure processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 8:535-542.
- Gomez-Lopez, V.M., P. Ragaert, J. Debevere, and F. Devlieghere. 2007. Pulsed light for food decontamination: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 18:464-473.
- Gomez-Lopez, V.M., P. Ragaert, J. Debevere, and F. Devlieghere. 2008. Decontamination methods to prolong the shelf-life of minimally processed vegetables, state-of-the-art. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 48:487-495.
- Grimi, N., F. Mamouni, N. Lebovka, E. Vorobiev, and J. Vaxelaire. 2011. Impact of apple processing modes on extracted juice quality: Pressing assisted by pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*. 103:52-61.
- Gryczka, U., M. Ptaszek, W. Migdal, and L.B. Orlikowski. 2010. Application of electron beam irradiation for inhibition of *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* activity. *Nukleonika*. 55:359-362.
- Hadjok, C., G.S. Mittal, and K. Warriner. 2008. Inactivation of human pathogens and spoilage bacteria on the surface and internalized within fresh produce by using a combination of ultraviolet light and hydrogen peroxide. *Journal of Applied Microbiology*. 104:1014-1024.
- Hageskal, G., I. Tryland, H. Liltved, and I. Skaar. 2012. No simple solution to waterborne fungi: various responses to water disinfection methods. *Water Science and Technology-Water Supply*. 12:220-226.
- Halstea, F.D., J.E. Thwaite, R. Burt, T.R. Laws, M. Raguse, R. Moeller, M.A. Webber, and B.A. Oppenheim. 2016. Antibacterial Activity of Blue Light against Nosocomial Wound Pathogens Growing Planktonically and as Mature Biofilms. *Applied and Environmental Microbiology*. 82:4006-4016.
- Han, Y., D.M. Sherman, R.H. Linton, S.S. Nielsen, and P.E. Nelson. 2000. The effects of washing and chlorine dioxide gas on survival and attachment of *Escherichia coli* O157 : H7 to green pepper surfaces. *Food Microbiology*. 17:521-533.
- Harte, F., M.F. San Martin, A.H. Lacerda, H.L.M. Lelieveld, B.G. Swanson, and G.V. Barbosa-Canovas. 2001. Potential use of 18 Tesla, static and pulsed magnetic fields on *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Food Processing and Preservation*. 25:223-235.
- Haverkort, A.J., D.I. Langerak, and M. Vandewaart. 1991. Effects of gamma-irradiation of seed potatoes on numbers of stems and tubers. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 39:81-90.
- He, R.R., G. Xi, and K. Liu. 2017. Alleviating effect of extremely low frequency pulsed electric field on drought damage of maize seedling roots. *Journal of Luminescence*. 188:441-447.
- He, R.R., G. Xi, K. Liu, and Y.Y. Zhao. 2016. Effect of Pulsed Electric Field on Drought Resistance of Maize Seedling Based on Delayed Fluorescence Induced with LED. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 36:1959-1965.
- Hertwig, C., N. Meneses, and A. Mathys. 2018. Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 77:131-142.
- HIDE, G.A. 1975. Effect of Heat Treatment of Potato Tubers on *Oospora pustulans*. *Plant Pathology*. 24:233-236.
- Huang, H.W., H.M. Lung, B.B. Yang, and C.Y. Wang. 2014. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing. *Food Control*. 40:250-259.
- Jaeger, H., A. Roth, S. Toepfl, T. Holzhauser, K.H. Engel, D. Knorr, R.F. Vogel, N. Bandick, S. Kulling, V. Heinz, and P. Steinberg. 2016. Opinion on the use of ohmic heating for the treatment of foods. *Trends in Food Science & Technology*. 55:84-97.
- Janisiewicz, W.J., T. Vanderzwet, and P.B. Jahrling. 1985. Effect of gamma-irradiation on survival of *Erwinia amylovora*. *Phytopathology*. 75:626-626.
- Jeong, R.D., E.H. Chu, D.H. Park, and H.J. Park. 2016. Control of Postharvest Bacterial Soft Rot by Gamma Irradiation and its Potential Modes of Action. *Plant Pathology Journal*. 32:157-161.
- Ji, W.J., H.M. Huang, A.H. Deng, and C.Y. Pan. 2009. Effects of static magnetic fields on *Escherichia coli*. *Micron*. 40:894-898.
- Jones, L.A., R.W. Worobo, and C.D. Smart. 2014. UV Light Inactivation of Human and Plant Pathogens in Unfiltered Surface Irrigation Water. *Applied and Environmental Microbiology*. 80:849-854.
- Jung, W.Y., Y.M. Choi, and M.S. Rhee. 2009. Potential use of supercritical carbon dioxide to decontaminate *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella typhimurium* in alfalfa sprouted seeds. *International Journal of Food Microbiology*. 136:66-70.
- Kalagatur, N.K., J.R. Kamasani, V. Mudili, K. Krishna, O.P. Chauhan, and M.H. Sreepathi. 2018a. Effect of high pressure processing on growth and mycotoxin production of *Fusarium graminearum* in maize. *Food Bioscience*. 21:53-59.
- Kalagatur, N.K., J.R. Kamasani, C. Siddaiah, V.K. Gupta, K. Krishna, and V. Mudili. 2018b. Combinational Inhibitory Action of *Hedychium spicatum* L. Essential oil and gamma-Radiation on Growth Rate and Mycotoxins Content of *Fusarium graminearum* in Maize: Response Surface Methodology. *Frontiers in Microbiology*. 9.

- Kalagatur, N.K., V. Mudili, J.R. Kamasani, and C. Siddaiah. 2018c. Discrete and combined effects of Ylang-Ylang (*Cananga odorata*) essential oil and gamma irradiation on growth and mycotoxins production by *Fusarium graminearum* in maize. *Food Control*. 94:276-283.
- Katiyo, W., R.J. Yang, and W. Zhao. 2017. Effects of combined pulsed electric fields and mild temperature pasteurization on microbial inactivation and physicochemical properties of cloudy red apple juice (*Malus pumila* Niedzwetzkyana (Dieck)). *Journal of Food Safety*. 37.
- Kaur, N., and A.K. Singh. 2016. Ohmic Heating: Concept and Applications-A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 56:2338-2351.
- Khayankarn, S., J. Uthaibutra, S. Setha, and K. Whangchai. 2013. Using electrolyzed oxidizing water combined with an ultrasonic wave on the postharvest diseases control of pineapple fruit cv. 'Phu Lae'. *Crop Protection*. 54:43-47.
- Knorr, D., A. Froehling, H. Jaeger, K. Reineke, O. Schlueter, and K. Schoessler. 2011. Emerging Technologies in Food Processing. In Annual Review of Food Science and Technology, Vol 2. Vol. 2. M.P. Doyle and T.R. Klaenhammer, editors. 203-235.
- Kottapalli, B., C.E. Wolf-Hall, and P. Schwarz. 2006. Effect of electron-beam irradiation on the safety and quality of *Fusarium*-infected malting barley. *International Journal of Food Microbiology*. 110:224-231.
- Kramer, B., J. Wunderlich, and P. Muranyi. 2017. Recent findings in pulsed light disinfection. *Journal of Applied Microbiology*. 122:830-856.
- Leistner, L., 1978. Hurdle effect and energy saving. In: Downey, W.K. Editor, 1978. Food Quality and Nutrition, Applied Science Publishers, London, UK, pp. 553-557.
- Leong, S.Y., D.J. Burritt, and I. Oey. 2016. Electropriming of wheatgrass seeds using pulsed electric fields enhances antioxidant metabolism and the bioprotective capacity of wheatgrass shoots. *Scientific Reports*. 6.
- Li, M., J.H. Qu, and Y.Z. Peng. 2004. Sterilization of *Escherichia coli* cells by the application of pulsed magnetic field. *Journal of Environmental Sciences*. 16:348-352.
- Lopes, R.P., M.J. Mota, A.M. Gomes, I. Delgadillo, and J.A. Saraiva. 2018. Application of High Pressure with Homogenization, Temperature, Carbon Dioxide, and Cold Plasma for the Inactivation of Bacterial Spores: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 17:532-555.
- Lung, H.M., Y.C. Cheng, Y.H. Chang, H.W. Huang, B.B. Yang, and C.Y. Wang. 2015. Microbial decontamination of food by electron beam irradiation. *Trends in Food Science & Technology*. 44:66-78.
- Lurie, S. 2016. Prestorage heat stress to improve storability of fresh produce: a review. *Israel Journal of Plant Sciences*. 63:17-21.
- Ma, H.L., Z.L. Pan, M.X. Gao, and L. Luo. 2008. Efficacy in Microbial Sterilization of Pulsed Magnetic Field Treatment. *International Journal of Food Engineering*. 4.
- Ma, H.L., S.S. Xu, R.H. He, and Y.Q. Duan. 2012. Study on Ca²⁺ Transmembrane Behaviors of Magnetic-Treated *S. aureus* with Fura-2/AM Fluorescence Probe and LCSM. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 32:407-410.
- MACKAY, J.M., and P.J. SHIPTON. 1983. Heat treatment of seed tubers for control of potato blackleg (*Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica*) and other diseases. *Plant Pathology*. 32:385-393.
- Maclean, M., K. McKenzie, J.G. Anderson, G. Gettinby, and S.J. MacGregor. 2014. 405 nm light technology for the inactivation of pathogens and its potential role for environmental disinfection and infection control. *Journal of Hospital Infection*. 88:1-11.
- Maffei, M.E. 2014. Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Frontiers in Plant Science*. 5.
- Maftei, N.A., A.Y. Ramos-Villarroel, A.I. Nicolau, O. Martin-Belloso, and R. Soliva-Fortuny. 2014. Pulsed light inactivation of naturally occurring moulds on wheat grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 94:721-726.
- Mahendran, R., K.R. Ramanan, F.J. Barba, J.M. Lorenzo, O. Lopez-Fernandez, P.E.S. Munekata, S. Roohinejad, A.S. Sant'Ana, and B.K. Tiwari. 2019. Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life. *Trends in Food Science & Technology*. 88:67-79.
- Malek, F. 2019. Sporulating bacteria and biofilms: a recurring problem in production lines of reconstituted or recombinant pasteurized milk. *Canadian Journal of Microbiology*. 65:405-420.
- Mansur, A.R., C.C. Yu, and D.H. Oh. 2014. Efficiency of Gamma Irradiation to Inactivate Growth and Fumonisin Production of *Fusarium moniliforme* on Corn Grains. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 24:209-216.
- Marks, N., and P.S. Szecowka. 2010. Impact of variable magnetic field stimulation on growth of aboveground parts of potato plants. *International Agrophysics*. 24:165-170.
- Mazzoni, A.M., R.R. Sharma, A. Demirci, and G.R. Ziegler. 2001. Supercritical carbon dioxide treatment to inactivate aerobic microorganisms on alfalfa seeds. *Journal of Food Safety*. 21:215-223.
- McCollum, G.D. 1977. Growth response of potato-tuber eyes to irradiation with X-rays and fast neutrons. *American Potato Journal*. 54:593-602.
- McKay, A.M., M. Linton, J. Stirling, A. Mackle, and M.F. Patterson. 2011. A comparative study of changes in the microbiota of apple juice treated by high hydrostatic pressure (HHP) or high pressure homogenisation (HPH). *Food Microbiology*. 28:1426-1431.
- Miano, A.C., V.A. Forti, H.F. Abud, F.G. Gomes-Junior, S.M. Cicero, and P.E.D. Augusto. 2015. Effect of ultrasound technology on barley seed germination and vigour. *Seed Science and Technology*. 43:297-302.
- Moosekian, S.R., S. Jeong, B.P. Marks, and E.T. Ryser. 2012. X-Ray Irradiation as a Microbial Intervention Strategy for Food. In Annual Review of Food Science and Technology, Vol 3. Vol. 3. M.P. Doyle and T.R. Klaenhammer, editors. 493-510.
- Moreau, M., M.G.J. Feuilloley, N. Orange, and J.L. Brisset. 2005. Lethal effect of the gliding arc discharges on *Erwinia* spp. *Journal of Applied Microbiology*. 98:1039-1046.

- Moreau, M., N. Orange, and M.G.J. Feuilloley. 2008. Non-thermal plasma technologies: New tools for bio-decontamination. *Biotechnology Advances*. 26:610-617.
- Mota, M.J., R.P. Lopes, I. Delgadillo, and J.A. Saraiva. 2013. Microorganisms under high pressure - Adaptation, growth and biotechnological potential. *Biotechnology Advances*. 31:1426-1434.
- Muhammad, A.I., X.Y. Liao, P.J. Cullen, D.H. Liu, Q.S. Xiang, J. Wang, S.G. Chen, X.Q. Ye, and T. Ding. 2018. Effects of Nonthermal Plasma Technology on Functional Food Components. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 17:1379-1394.
- Nagy, P., and G. Fischl. 2004. Effect of static magnetic field on growth and sporulation of some plant pathogenic fungi. *Bioelectromagnetics*. 25:316-318.
- Naz, F., C.A. Rauf, N.A. Abbasi, H. Irfan Ul, and I. Ahmad. 2008. Influence of inoculum levels of *Rhizoctonia solani* and susceptibility on new potato germplasm. *Pakistan Journal of Botany*. 40:2199-2209.
- Nosir, W. 2016. New technique for rose production in soilless culture system and disease reduction. *Journal of Plant Nutrition*. 39:181-188.
- O'Donnell, C.P., B.K. Tiwari, P. Bourke, and P.J. Cullen. 2010. Effect of ultrasonic processing on food enzymes of industrial importance. *Trends in Food Science & Technology*. 21:358-367.
- Orlikowski, L.B., U. Gryczka, M. Ptaszek, and W. Migdal. 2012. Effectiveness of electron beam irradiation in the control of *Rhizoctonia solani*. *Nukleonika*. 57:551-554.
- Palhano, F.L., T.T.B. Vilches, R.B. Santos, M.T.D. Orlando, J.A. Ventura, and P.M.B. Fernandes. 2004. Inactivation of *Colletotrichum gloeosporioides* spores by high hydrostatic pressure combined with citral or lemongrass essential oil. *International Journal of Food Microbiology*. 95:61-66.
- Park, H.S., H.J. Choi, and K.H. Kim. 2013. Effect of Supercritical CO₂ Modified with Water Cosolvent on the Sterilization of Fungal Spore-Contaminated Barley Seeds and the Germination of Barley Seeds. *Journal of Food Safety*. 33:94-101.
- Park, H.S., Y.H. Lee, W. Kim, H.J. Choi, and K.H. Kim. 2012. Disinfection of wheat grains contaminated with *Penicillium oxalicum* spores by a supercritical carbon dioxide-water cosolvent system. *International Journal of Food Microbiology*. 156:239-244.
- Park, S.J., H.W. Park, and J. Park. 2003. Inactivation kinetics of food poisoning microorganisms by carbon dioxide and high hydrostatic pressure. *Journal of Food Science*. 68:976-981.
- Patterson, M.F., A.M. McKay, M. Connolly, and M. Linton. 2012. The effect of high hydrostatic pressure on the microbiological quality and safety of carrot juice during refrigerated storage. *Food Microbiology*. 30:205-212.
- Pérombelon, M., E. Burnett, J. Melvin, and S. Black. 1989. Preliminary studies on the control of potato blackleg by a hot water treatment of seed tubers. In *Vascular Wilt Diseases of Plants*. Springer. 557-566.
- Pietruszewski, S., and E. Martinez. 2015. Magnetic field as a method of improving the quality of sowing material: a review. *International Agrophysics*. 29:377-389.
- Pignata, C., D. D'Angelo, E. Fea, and G. Gilli. 2017. A review on microbiological decontamination of fresh produce with nonthermal plasma. *Journal of Applied Microbiology*. 122:1438-1455.
- Pinela, J., and I. Ferreira. 2017. Nonthermal physical technologies to decontaminate and extend the shelf-life of fruits and vegetables: Trends aiming at quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 57:2095-2111.
- Pinheiro, J., C. Alegria, M. Abreu, E.M. Goncalves, and C.L.M. Silva. 2015. Influence of postharvest ultrasounds treatments on tomato (*Solanum lycopersicum*, cv. Zinac) quality and microbial load during storage. *Ultrasonics Sonochemistry*. 27:552-559.
- Qian, J.Y., H.L. Ma, S.J. Li, F.J. Cui, and W.J. Qu. 2013. Inactivation of *Bacillus subtilis* by a Pulsed Magnetic Field and Kinetics Model. *Journal of Pure and Applied Microbiology*. 7:3043-3050.
- Qian, J.Y., C.S. Zhou, H.L. Ma, S.J. Li, A.A. Yagoub, and M.A.Y. Abdualrahman. 2016. Biological Effect and Inactivation Mechanism of *Bacillus subtilis* Exposed to Pulsed Magnetic Field: Morphology, Membrane Permeability and Intracellular Contents. *Food Biophysics*. 11:429-435.
- Radhakrishnan, R. 2019. Magnetic field regulates plant functions, growth and enhances tolerance against environmental stresses. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 25:1107-1119.
- Rajkovic, A., N. Smigic, and F. Devlieghere. 2010. Contemporary strategies in combating microbial contamination in food chain. *International Journal of Food Microbiology*. 141:S29-S42.
- Rakosy-Tican, L., C.M. Aurori, and V.V. Morariu. 2005. Influence of near null magnetic field on in vitro growth of potato and wild *Solanum* species. *Bioelectromagnetics*. 26:548-557.
- Ramamurthy, M.S., K.K. Ussuf, P.M. Nair, and P. Thomas. 2000. Lignin biosynthesis during wound healing of potato tubers in response to gamma irradiation. *Postharvest Biology and Technology*. 18:267-272.
- Ranganna, B., G. Raghavan, and A. Kushalappa. 1998. Hot water dipping to enhance storability of potatoes. *Postharvest Biology and Technology*. 13:215-223.
- Ren, J.L., and Y. Niu. 1998. Experimental study of sterilizing molds by ultrasound. *Chinese Physics Letters*. 15:115-116.
- Reyes-Jurado, F., A.R. Navarro-Cruz, J. Mendez-Aguilar, C.E. Ochoa-Velasco, E. Mani-Lopez, M.T. Jimenez-Munguia, E. Palou, A. Lopez-Malo, and R. Avila-Sosa. 2019. High-Intensity Light Pulses To Inactivate *Salmonella Typhimurium* on Mexican Chia (*Salvia hispanica* L.) Seeds. *Journal of Food Protection*. 82:1272-1277.
- Rezaee, M., M. Almassi, A.M. Farahani, S. Minaei, and M. Khodadadi. 2011. Potato Sprout Inhibition and Tuber Quality after Post Harvest Treatment with Gamma Irradiation on Different Dates. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 13:829-842.
- Rifna, E.J., K.R. Ramanan, and R. Mahendran. 2019. Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*. 86:95-108.
- Rivalain, N., J. Roquain, and G. Demazeau. 2010. Development of high hydrostatic pressure in biosciences: Pressure effect on biological structures and potential applications in Biotechnologies. *Biotechnology Advances*. 28:659-672.

- Roberts, P.A., and W.C. Matthews. 1995. Disinfection alternatives for control of *Ditylenchus dipsaci* in garlic seed cloves. *Journal of Nematology*. 27:448-456.
- Robinson, K., and G. Foster. 1987. Control of potato blackleg by tuber pasteurization- the determination of time temperature combinations for the inactivation of pectolytic *Erwinia*. *Potato Research*. 30:121-125.
- Rux, G., R. Gelewsky, O. Schluter, and W.B. Herppich. 2019. High hydrostatic pressure effects on membrane-related quality parameters of fresh radish tubers. *Postharvest Biology and Technology*. 151:1-9.
- Sakudo, A., Y. Yagyu, and T. Onodera. 2019. Disinfection and Sterilization Using Plasma Technology: Fundamentals and Future Perspectives for Biological Applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 20.
- Saraiva, J.A., and I.M. Rodrigues. 2011. Inhibition of potato tuber sprouting by pressure treatments. *International Journal of Food Science and Technology*. 46:61-66.
- Scarlett, K., D. Collins, L. Tesoriero, L. Jewell, F. van Ogtrop, and R. Daniel. 2016. Efficacy of chlorine, chlorine dioxide and ultraviolet radiation as disinfectants against plant pathogens in irrigation water. *European Journal of Plant Pathology*. 145:27-38.
- Schmidt, M., E. Zannini, and E.K. Arendt. 2018. Recent Advances in Physical Post-Harvest Treatments for Shelf-Life Extension of Cereal Crops. *Foods*. 7.
- Seo, H.N., B.Y. Jeon, H.T. Tran, D.H. Ahn, and D.H. Park. 2010. Influence of pulsed electric field on growths of soil bacteria and pepper plant. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 27:560-566.
- Seth, R.K., M. Zarin, Z. Khan, and R. Seth. 2016. Ionizing radiation as a phytosanitary treatment against *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae). *Florida Entomologist*. 99:76-87.
- Siddique, S.S., G.E.S. Hardy, and K.L. Bayliss. 2019. Cold plasma as a novel treatment to reduce the in vitro growth and germination of *Colletotrichum* species. *Plant Pathology*. 68:1361-1368.
- Siddiqui, I.A., and D.R. Viglierchio. 1970. Effects of gamma irradiation on motility, infectivity, reproduction and morphology of *Ditylenchus disaci*. *Nematologica*. 16:459-.
- Siemens, A.J., G. Mazza, and J. Borsa. 1988. Effect of gamma-irradiation on sprout inhibition and processing quality of Norchip and Russet Burbank potatoes. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal-Journal De L Institut Canadien De Science Et Technologie Alimentaires*. 21:365-365.
- Songnuan, W., and P. Kirawanich. 2012. Early growth effects on *Arabidopsis thaliana* by seed exposure of nanosecond pulsed electric field. *Journal of Electrostatics*. 70:445-450.
- Songnuan, W., U. Siri wattanakul, and P. Kirawanich. 2015. Physiological and Genetic Analyses of *Arabidopsis Thaliana* Growth Responses to Electroporation. *Ieee Transactions on Nanobioscience*. 14:773-779.
- Sparrow, A.H., and E. Christensen. 1950. Effects of X-ray, neutron, and chronic gamma-irradiation on growth and yield of potatoes. *American Journal of Botany*. 37:667-667.
- Steffen, H., P. Zumstein, and R.G. Rice. 2010. Fruit and Vegetables Disinfection at SAMRO, Ltd. Using Hygienic Packaging by Means of Ozone and UV Radiation. *Ozone-Science & Engineering*. 32:144-149.
- Steinmoller, S., M. Bandte, C. Buttner, and P. Muller. 2012. Effects of sanitation processes on survival of *Synchytrium endobioticum* and *Globodera rostochiensis*. *European Journal of Plant Pathology*. 133:753-763.
- Su, B., J.S. Guo, W.F. Nian, H.Q. Feng, K.L. Wang, J. Zhang, and J. Fang. 2015. Early Growth Effects of Nanosecond Pulsed Electric Field (nsPEFs) Exposure on *Haloxylon ammodendron*. *Plasma Processes and Polymers*. 12:372-379.
- Sutton, J.C., H. Yu, B. Grodzinski, and M. Johnstone. 2000. Relationships of ultraviolet radiation dose and inactivation of pathogen propagules in water and hydroponic nutrient solutions. *Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne De Phytopathologie*. 22:300-309.
- Takeda, F., W.J. Janisiewicz, B.J. Smith, and B. Nichols. 2019. A new approach for strawberry disease control. *European Journal of Horticultural Science*. 84:3-13.
- Tan, M.S.F., S. Rahman, and G.A. Dykes. 2017. Sonication reduces the attachment of *Salmonella Typhimurium* ATCC 14028 cells to bacterial cellulose-based plant cell wall models and cut plant material. *Food Microbiology*. 62:62-67.
- Tian, X.J., Q.Q. Yu, W. Wu, and R.T. Dai. 2018. Inactivation of Microorganisms in Foods by Ohmic Heating: A Review. *Journal of Food Protection*. 81:1093-1107.
- Todoriki, S., and T. Hayashi. 2000. Disinfection of seeds and sprout inhibition of potatoes with low energy electrons. *Radiation Physics and Chemistry*. 57:253-255.
- Todoriki, S., and T. Hayashi. 2004. Sprout inhibition of potatoes with soft-electron (low-energy electron beams). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 84:2010-2014.
- Urban, L., F. Charles, M.R.A. de Miranda, and J. Aarrouf. 2016. Understanding the physiological effects of UV-C light and exploiting its agronomic potential before and after harvest. *Plant Physiology and Biochemistry*. 105:1-11.
- Urban, M., J. Motteram, H.C. Jing, S. Powers, J. Townsend, J. Devonshire, I. Pearman, K. Kanyuka, J. Franklin, and K.E. Hammond-Kosack. 2011. Inactivation of plant infecting fungal and viral pathogens to achieve biological containment in drainage water using UV treatment. *Journal of Applied Microbiology*. 110:675-687.
- van der Wolf, J.M., E.G. de Haan, P. Kastelein, M. Krijger, B.H. de Haas, H. Velvis, O. Mendes, M. Kooman-Gersmann, and P.S. van der Zouwen. 2017. Virulence of *Pectobacterium carotovorum* subsp *brasiliense* on potato compared with that of other *Pectobacterium* and *Dickeya* species under climatic conditions prevailing in the Netherlands. *Plant Pathology*. 66:571-583.
- Van Impe, J., C. Smet, B. Tiwari, R. Greiner, S. Ojha, V. Stulic, T. Vukusic, and A.R. Jambrik. 2018. State of the art of nonthermal and thermal processing for inactivation of micro-organisms. *Journal of Applied Microbiology*. 125:16-35.
- van Kruistum, G., J. Verschoor, and H. Hoek. 2014. CATT as a non-chemical pest and nematode control method in strawberry mother planting stock. *Journal of Berry Research*. 4:29-35.

- Wale, S.J. 1985. the potential of heat treatment as a practical method of reducing bacterial contamination of potato tubers. *In* Report of the International conference on Potato Blackleg Disease. D.C. Graham and M.D. Harrison, editors. Potato Marketing Board, Edinburgh. 24.
- Wang, J.F., H. Ma, and S.M. Wang. 2019. Application of Ultrasound, Microwaves, and Magnetic Fields Techniques in the Germination of Cereals. *Food Science and Technology Research*. 25:489-497.
- Woldemariam, H.W., and S.A. Emire. 2019. High Pressure Processing of Foods for Microbial and Mycotoxins Control: current trends and future prospects. *Cogent Food & Agriculture*. 5.
- Wu, Y., Y.M. Guo, and D.G. Zhang. 2011. Study of the Effect of High-Pulsed Electric Field Treatment on Vacuum Freeze-Drying of Apples. *Drying Technology*. 29:1714-1720.
- Zahoranova, A., M. Henselova, D. Hudecova, B. Kalinakova, D. Kovacik, V. Medvecká, and M. Cernak. 2016. Effect of Cold Atmospheric Pressure Plasma on the Wheat Seedlings Vigor and on the Inactivation of Microorganisms on the Seeds Surface. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 36:397-414.
- Zahoranova, A., L. Hoppanova, J. Simoncicova, Z. Tuekova, V. Medvecká, D. Hudecova, B. Kalinakova, D. Kovacik, and M. Cernak. 2018. Effect of Cold Atmospheric Pressure Plasma on Maize Seeds: Enhancement of Seedlings Growth and Surface Microorganisms Inactivation. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 38:969-988.
- Zhang, M., J.K. Oh, L. Cisneros-Zevallos, and M. Akbulut. 2013. Bactericidal effects of nonthermal low-pressure oxygen plasma on *S. typhimurium* LT2 attached to fresh produce surfaces. *Journal of Food Engineering*. 119:425-432.
- Zhong, C.S., X.X. Guan, Z. Fan, W.T. Song, R. Chen, Y. Wang, X.Y. Sun, and S.X. He. 2019. Pulsed electric field disinfection treatment of *Fusarium oxysporum* in nutrient solution. *Water Science and Technology-Water Supply*. 19:2116-2122.
- Zhou, L.Y., X.F. Bi, Z.H. Xu, Y.J. Yang, and X.J. Liao. 2015. Effects of High-Pressure CO₂ Processing on Flavor, Texture, and Color of Foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 55:750-768.