

# Neomyzeten – eine anhaltende Bedrohung für den Schweizer Wald

Thomas N. Sieber Institut für integrative Biologie, ETH Zürich (CH)\*

## Neomycetes – persistent threats to Swiss forests

More than 40 neomycetes pathogenic to woody plant species were introduced to Switzerland during the last 100 years, and the number is increasing exponentially. A few neomycetes are invasive and cause serious diseases on forest and ornamental trees: *Cryphonectria parasitica*, causal agent of chestnut blight, *Hymenoscyphus pseudoalbidus* causing ash dieback, *Ophiostoma novo-ulmi* causing Dutch elm disease and *Ceratocystis platani* causing canker stain of plane. The causal agents of sudden oak death (*Phytophthora ramorum*) and collar and root rot of alder (*P. alni* ssp. *alni*) have been detected in Switzerland but have not reached epidemic levels. *Ceratocystis fagacearum*, causal agent of oak wilt, or *Leptographium wageneri* causing black stain root disease of conifers are absent from Switzerland, but are threats to Swiss forests and measures have been implemented to prevent their introduction. Prevention of threats by fungi which are harmless symbionts in their native range, e.g. endophytic fungi, is more challenging. The only way to avoid the endophyte problem is to grow trees from aseptic seed, saplings or meristem cultures. Additionally, setup of sentinel plantings in as many regions as possible all over the world could serve as early warning systems. To prevent the introduction of wilt and root diseases, only treated wood and treated potting media should be allowed for import. Natural regeneration prevents contamination of forest soils by *Phytophthora* species originating from nursery plants.

**Keywords:** invasive forest pathogens, endophytic fungi, coevolution, plant quarantine, sentinel plantings, natural regeneration

**doi:** 10.31888/szf.2014.0173

\* Universitätstrasse 16, CH-8092 Zürich, E-Mail thomas.sieber@env.ethz.ch

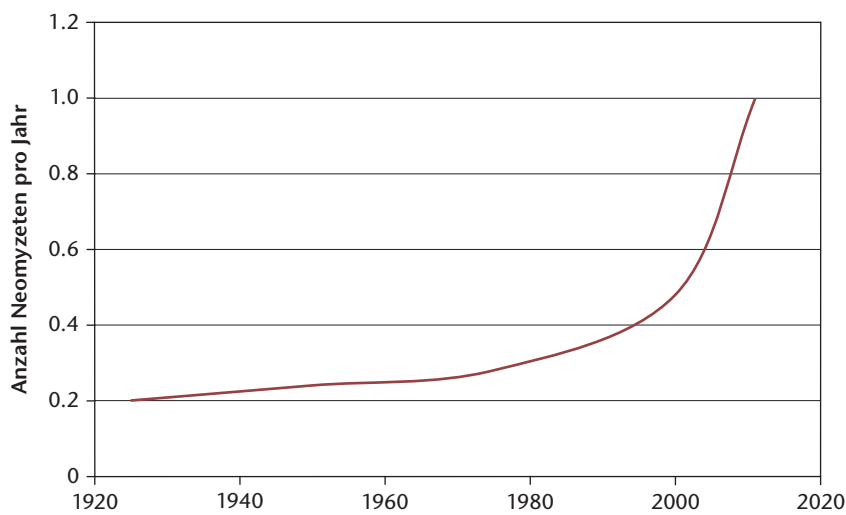
**L**ebwesen, die sich – mit oder ohne menschliche Beihilfe – in einem Gebiet etabliert haben, in dem sie zuvor nicht heimisch waren, werden als Neobiota (Etablierung nach 1492) beziehungsweise als Archäobiota (vor 1492) bezeichnet. Dieser Nomenklatur folgend, werden Pilze als Neorespektive Archäomyzeten bezeichnet. Da es im Einzelfall nicht immer möglich ist, den genauen Zeitpunkt der Einschleppung oder der Einwanderung festzustellen, wird in diesem Artikel konsequent von Neomyzeten gesprochen. Nach der Entdeckung Amerikas nahm die Bedeutung des Menschen als Vektor von Pilzen stark zu. Mit neuen Kulturpflanzen wie Mais und Kartoffel gelangten auch pathogene Pilze wie der Maisbrand (*Ustilago maydis*) oder die Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel (*Phytophthora infestans*) nach Europa, mit zum Teil verheerenden Folgen. *P. infestans* beispielsweise brachte den Kartoffelanbau in Irland ab 1840 zum Erliegen, was für rund zwei Millionen Menschen den Hungertod oder die Auswanderung bedeutete. Nach dem Berliner Mauerfall im Jahr 1989 nahm die Mobilität von Personen und Gütern nochmals signifikant zu

und damit auch die Verschleppung von Pilzen, mit Baumschulmaterial, Zierpflanzen, Verpackungen, Bau- und Möbelholz und durch Touristen (Liebold et al 2012, Pautasso et al 2010). Zudem kann die Klimaerwärmung die Etablierung von Neomyzeten erleichtern (Pautasso et al 2012). In der Schweiz nahm die Anzahl invasiver Pilze in den letzten Jahrzehnten exponentiell zu (Abbildung 1).

Im vorliegenden Artikel werden verschiedene Szenarien für die Interaktion zwischen Pilz und Wirt beschrieben. Die hoch virulenten Neomyzeten, die in der Schweiz zurzeit zu Problemen führen, werden vorgestellt, und an zwei Beispielen wird die Gefahr beschrieben, die von potenziell gefährlichen Neomyzeten ausgeht. Schliesslich werden Handlungsansätze diskutiert, die dazu beitragen, die Wahrscheinlichkeit neuer, invasiver Pilzkrankheiten tief zu halten.

## Interaktionen zwischen Pilz und Wirt

Einschleppung und Einwanderung von Pilzen finden kontinuierlich statt, aber nur wenige Pilze



**Abb 1** In die Schweiz eingeschleppte und eingewanderte Neomyzeten während der letzten knapp 100 Jahre (Daten aus Tabelle 1).

manifestieren sich in der Folge als invasiv (Philibert et al 2011). Viele sterben im neuen Gebiet wieder aus, da ihnen die Lebensgrundlage fehlt oder sie vom «Immunsystem» des Ökosystems erfolgreich abgewehrt werden (Vacher et al 2010). Andere integrieren sich unauffällig in das neue Ökosystem. Einige Neomyzeten jedoch sind invasiv und verursachen Krankheiten an einheimischen Gehölzpflanzen. Die Schwere einer Krankheit hängt von der Virulenz des Pilzes, der Anfälligkeit des Wirtes und den Umweltbedingungen ab. Je virulenter das Pathogen und je anfälliger der Wirt, desto schwerer ist die Krankheit. Treffen ein harmloser Pilz und ein potenzieller Wirt zusammen, die sich in disjunkten Gebieten ohne Koevolution entwickelt haben, kann es vorkommen, dass der Pilz auf der neuen Wirtspflanze eine schwere Krankheit verursacht (Abbildung 2). Dabei kann entweder ein Neomyzet auf einen einheimischen Wirt treffen (z.B. Erreger der Ulmenwelke oder des Eschentriebsterbens; Abbildung 2, Szenario C), oder aber ein Neophyt kann auf einen einheimischen Pilz treffen (z.B. Stoben-Blasenrost, *Cronartium ribicola*; Abbildung 2, Szenario B; Shaw & Geils 2010). Dabei ist die Entstehung einer Krankheit nicht zwingend, aber die unproblematischen Fälle werden meistens nicht bemerkt.

Wird ein Neophyt von einem Neomyzeten befallen, ist eine Fallunterscheidung nötig. Entweder stammen Pilz und Wirt aus dem gleichen Verbreitungsgebiet und sind folglich bereits aneinander angepasst (Abbildung 2, Szenario D1), oder sie kommen erst nach der Einschleppung oder Ausbreitung miteinander in Kontakt, sodass Koevolution nicht möglich war (Abbildung 2, Szenario D2). Letzterer Fall kann zu schwerer Krankheit führen (z.B. Kastanienrindenkrebs), ähnlich wie in den Szenarien B und C. Dabei hängt es vor allem von den Umweltbedingungen ab, ob es zur Krankheit kommt, wie stark sie sich manifestiert und ob epidemisches Niveau erreicht wird.

Auch völlig gesund erscheinende Pflanzen sind von Pilzen besiedelt (Abbildung 2, Szenario A). Diese Pilze werden als endophytische Pilze oder kurz Endophyten bezeichnet (Sieber 2007) und kommen in allen Pflanzenarten und -organen (ausser Meristemen) vor. Im Spross besteht das einzelne Pilzindividuum häufig nur aus wenigen Zellen, die versteckt zwischen oder in den Pflanzenzellen leben. Über die Funktion von Sprossendophyten bei Gehölzen ist nur wenig bekannt, es gibt aber starke Indizien dafür, dass sie bei der Abwehr von Herbivoren und Pathogenen eine Rolle spielen und sekundäre Metaboliten produzieren, die für den Wirt von Vorteil sind.

Die Gefährdung der Wirtspflanze durch Pilzkrankheiten hängt vom betroffenen Organ ab und nimmt in folgender Reihenfolge ab: Wurzeln und Stamm > Äste > Triebe > immergrüne Blätter (oder Nadeln) > sommergrüne Blätter (oder Nadeln). Allerdings kann ein grosser Nadelverlust bei immergrünen Koniferen, wie er durch die Rotband- oder die Braunfleckenkrankheit verursacht werden kann, zu Zuwachseinbussen oder gar Absterbeerscheinungen führen.

### Hoch virulente Neomyzeten

Befallen Neomyzeten der Szenarien C und D2 den Stamm oder die Wurzeln des Wirtes, ist mit einer starken Epidemie und grossen ökologischen und ökonomischen Schäden zu rechnen (Tabelle 1). In der Schweiz trifft dies für die Erreger des Platanenkrebses, des Kastanienrindenkrebses, der Ulmenwelke, des Eschentriebsterbens und für *Phytophthora*-Arten zu. Die Erreger des Platanenkrebses und der Ulmenwelke sind nahe verwandt und verursachen Gefässkrankheiten. Dabei besiedeln die Pilze das Splintholz und können durch Toxine die Bildung von gefässverstopfenden Thyllen auslösen. Man könnte sagen, dass die Bäume «Selbstmord» begehen. Beim Kastanienrindenkrebs und beim Eschentriebsterben verläuft die Krankheit unterschiedlich, den Erregern ist aber gemeinsam, dass sie in ihren Ursprungsgebieten harmlose Endophyten sind. Die meisten *Phytophthora*-Arten sind Primärparasiten und nur auf jungen, primären Geweben (Kambium, Primärwurzeln, frisch ausgetriebenen Blättern) konkurrenzfähig, töten diese rasch ab, sporulieren, breiten sich aus (meistens mit Zoosporen im Wasser), bilden Dauerstadien und warten auf die nächste Infektionsgelegenheit. Im Folgenden werden die Krankheiten und ihre Erreger näher vorgestellt.

#### Platanenkrebs – *Ceratocystis platani*

Der Erreger des Platanenkrebses wurde etwa 1970 von Amerika nach Italien und Frankreich verschleppt und gelangte vor rund 30 Jahren auch in

Pilz	Wirt	
	Einheimisch	Nicht einheimisch (Neophyt)
Einheimisch	mit Koevolution → keine oder leichte Krankheit	ohne Koevolution → schwere Krankheit (Epidemie) möglich
Nicht einheimisch (Neomyzet)	ohne Koevolution → schwere Krankheit (Epidemie) möglich	mit Koevolution* → keine oder leichte Krankheit
		ohne Koevolution → schwere Krankheit (Epidemie) möglich

Abb 2 Schwere der Krankheit in Abhängigkeit der Koevolution von Pilz und Wirt.

\* Koevolution im Herkunftsland, gleichzeitige beziehungsweise gestaffelte Einschleppung. Die Grossbuchstaben A bis D2 bezeichnen verschiedene Szenarien.

die Südschweiz (Gessler & Mauri 1987), wo regelmässig Platanen (*Platanus*) befallen werden und absterben. In den Jahren 2011 und 2012 war der Befall im Südtessin sehr hoch (Meier et al 2007–2013). Die Gebiete nördlich der Alpen scheinen bis jetzt bis auf einen Befallsherd im Jahr 2001 im Kanton Genf, der durch rasches Eingreifen getilgt werden konnte, von der Krankheit verschont geblieben zu sein (Engesser 2011). *C. platani* gelangt über Wunden in den Baum, tötet das Kambium ab und besiedelt über Markstrahlen den Splint. Phytotoxine und die Besiedlung der Gefässe führen zur Unterbrechung der Wasserleitung, worauf die distalen Gewebe welken. Im Ursprungsgebiet verbreiten Glanzkäfer die Krankheit, in Europa wurden Insekten als Vektoren bisher nicht nachgewiesen. Dafür wurde in Italien Krankheitsübertragung durch Wühlmäuse festgestellt. Zudem kann der Pilz über Wurzelkontakte übertragen werden. Der Pilz überlebt jahrelang im Holz (sogar in Sägemehl) und kann mit kontaminierten Werkzeugen verbreitet werden (Sinclair & Lyon 2005). Den Transport von Platanenholz und von Werkzeugen, die zum Baumschnitt verwendet wurden, von der Alpensüd- auf die Alpennordseite gilt es deshalb zu verhindern. Eine Desinfektion der für den Rückschnitt verwendeten Werkzeuge in Risikogebieten ist unverzichtbar.

#### Ulmenwelke – *Ophiostoma ulmi* und *O. novo-ulmi*

Der sehr wahrscheinlich aus Ostasien eingeschleppte Erreger der Ulmenwelke, *Ophiostoma ulmi*, vernichtete im Laufe einer ersten Epidemiewelle ab 1910 viele Ulmen (*Ulmus*) in Europa und ab 1930 in Nordamerika. Ab 1975 kam es zu einer zweiten Epidemie durch die beiden noch aggressiveren Neomyzeten *O. novo-ulmi* ssp. *novo-ulmi* (vormals EAN-Rasse) und *O. novo-ulmi* ssp. *americana* (NAN-Rasse), die innert weniger Jahre die Mehrheit der verbliebenen und nach der ersten Epidemie neu aufgekommenen Ulmen vernichteten (Brasier 2000). Während

NAN mit Fournierholz der Felsen-Ulme (*Ulmus thomasii*) aus Kanada eingeschleppt wurde, stammt EAN aus der Schwarzmeerregion. Die beiden Unterarten von *O. novo-ulmi* haben *O. ulmi* fast völlig verdrängt (Hoegger et al 1996). Ulmensplintkäfer (*Scolytus* spp.) übertragen die Krankheit auf gesunde Bäume. Die Dezimierung der Ulmen hat zu einer Abnahme der Käferpopulationen und der Erreger geführt. Als Folge davon scheint es eine Zunahme gesunder Ulmen zu geben, die genügend lange überleben, um sich fortzupflanzen. Damit besteht Hoffnung, dass sich langfristig Genotypen durchsetzen, die gegen die Ulmenwelkerreger resistent sind. Allerdings haben sich die verantwortlichen Pathogene nicht zuletzt durch horizontalen Gentransfer als evolutiv sehr plastisch erwiesen und könnten sich sehr rasch auf neue Ulmengentypen einstellen (Brasier et al 2004a). Die Einschleppung von neuen *Ophiostoma*-Genotypen und -Arten mit lebendem Pflanzenmaterial oder unbehandeltem Holz muss unbedingt vermieden werden.

#### Kastanienrindenkrebs – *Cryphonectria parasitica*

Diese aus Südostasien stammende Krankheit hat die Amerikanische Edelkastanie (*Castanea dentata*), die im Osten der USA rund ein Viertel des Baumbestandes ausmachte, praktisch ausgerottet (Heiniger 2003). Die Kastanien kommen dort nicht über das Stockausschlagstadium hinaus, weil bereits die jungen Triebe vom Pilz befallen und abgetötet werden. Der Krankheitserreger wurde 1938 nach Europa verschleppt. Die «einheimische» Edelkastanie (*C. sativa*) hat sich von Anfang an als resistenter erwiesen als *C. dentata* und konnte dank einem späteren, den Krankheitserreger schwächenden Virusbefall (Hypovirulenz) in den meisten Kastanienregionen die akute Phase der Epidemie überstehen. In ausgedehnten Kastaniengebieten wie der Alpensüdseite ist die Krankheitssituation seit Jahren stabil (Meier et al 2007–2013). Anders sah es bei den bis 1986 befallsfreien Beständen auf der Alpennordseite aus (Heiniger & Stadler 1990), wo das Virus nicht spontan auftrat und die Bedrohung durch den Pilz deshalb gross war. Das Virus wurde mit unterschiedlichem Erfolg in diese Bestände eingebracht und verbreitet sich seither an manchen Standorten auch spontan (Heiniger & Rigling 2009). Das für die Hypovirulenz verantwortliche Virus kann nur zwischen Individuen der gleichen vegetativen Kompatibilitätsgruppe des Erregers übertragen werden (Anagnostakis & Day 1979). Die Einschleppung neuer oder nahe verwandter Kompatibilitätsgruppen aus anderen Kontinenten und Gebieten Europas muss deshalb vermieden werden. Dies gilt auch für Verschleppungen innerhalb der Schweiz von der Alpensüd- auf die Alpennordseite und umgekehrt (Prospero & Rigling 2012). *C. parasitica* ist ein Schwächepilz und kann auch in

Pilzart	Deutscher Name	Wirt* in der Schweiz	Betroffene Organe <sup>2</sup>	Heimat der Pilzart <sup>3</sup>	Szenario <sup>4</sup>	Erstnachweis in der Schweiz	Einschleppungsweg <sup>5</sup>	Natürliche Ausbreitung <sup>6</sup>
<i>Apiogonoma veneta</i>	Platanenblattbräune	<i>Platanus × hispanica</i> (Syn. <i>P. × acerifolia</i> )	sB, T	E	D1	?	Pfl, Wi	Wi, Wa
<i>Ceratocystis platani</i>	Platanenkrebs	<i>Platanus × hispanica</i> (Syn. <i>P. × acerifolia</i> )	A, S, W	NA	D2	1986	H, R, W	A, Wa, Wu
<i>Cryphonectria parasitica</i>	Kastanienrindenkrebs	<i>Castanea sativa</i> , <i>Quercus</i> spp.	A, S, T	A	D2	1948	Pfl, H, R	A, Wa, Wi
<i>Cuminisiella mirabilissima</i>	Mahonienrost	<i>Mahonia</i> spp.	iB	NA	D1	1930	Pfl	Wi
<i>Cylindrocladium buxicola</i>	Buchsbrand	<i>Buxus sempervirens</i>	iB, T	?	C	2006	Pfl	Wi
<i>Diplocarpon mali</i>	Marssonina-Blattfleckenkrankheit	<i>Malus</i> spp.	sB	A	C	2011	?	Wa, Wi
<i>Discula destructiva</i>	Hartriegelblattbräune	<i>Cornus florida</i> , <i>Cornus nuttallii</i>	sB, T	?	D2	2006	Pfl	A, Wa, Wi <sup>7</sup>
<i>Erysiphe adunca</i>	Pappel-/Weidenmehltau	<i>Populus nigra</i> , <i>P. tremula</i>	sB	?	C	1958	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe alphitoides</i>	Eichenmehltau	<i>Quercus</i> spp., andere sommergrüne Arten	sB, T	?	C	1907	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe arcuata</i>	Hainbuchenmehltau	<i>Carpinus betulus</i>	sB	A	C	1975	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe australiana</i> <sup>9</sup>	Lagerströmiemehltau	<i>Lagerstroemia indica</i>	sB	A, AU	D1	1997	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe azaleae</i> <sup>9</sup>	Azaleenmehltau	<i>Azalea</i> spp., andere Erikagewächse	iB, sB	NA	C, D1	1951	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe deutzae</i>	Deutzienmehltau	<i>Deutzia</i> spp.	sB	A	D1	2001	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe elevata</i>	Trompetenbaummehltau	<i>Catalpa</i> spp.	sB	NA	D1	2001	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe flexuosa</i> <sup>9</sup>	Roskastanienmehltau	<i>Aesculus hippocastanum</i> , <i>A. × carnea</i>	sB	NA	D1	1999	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe hypophylla</i>	Pfingstrosenmehltau	<i>Quercus</i> spp., <i>Paeonia</i> spp.	sB	A	C	1947	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe magnifica</i>	Magnolienmehltau	<i>Magnolia</i> sp.	iB, sB	A, NA	D1	2008	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe necator</i>	Rebenmehltau	<i>Vitis</i> spp., <i>Parthenocissus</i> spp., <i>Ampelopsis</i> spp.	sB	NA	D1	?	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe platani</i>	Platanenmehltau	<i>Platanus × hispanica</i> (Syn. <i>P. × acerifolia</i> )	sB	NA	D1	1988	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe symphoricarpi</i>	Schneebeerenmehltau	<i>Symphoricarpus albus</i>	sB	NA	D1	1996	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe syringae</i>	Fliedermehltau	<i>Syringa</i> spp., <i>Ligustrum vulgare</i>	sB	NA	D1	1943	Pfl, Wi	Wi
<i>Erysiphe vanbruntiana</i>	Holundermehltau	<i>Sambucus nigra</i> , <i>S. racemosa</i>	sB	NA	C	1989	Pfl, Wi	Wi
<i>Guignardia aesculi</i>	Roskastanienblattbräune	<i>Aesculus hippocastanum</i> , <i>A. × carnea</i>	sB	E, NA	D1	vor 1954	Pfl	Wa, Wi
<i>Hymenoscyphus pseudoalbidus</i>	Eschentriebsterben	<i>Fraxinus excelsior</i> , <i>F. angustifolium</i>	A, sB, S, T, W	A	C	2007	Pfl	Wi
<i>Melampsorium hiratsukanum</i>	Erlenrost	<i>Alnus</i> spp., <i>Larix</i> spp.	sB	A	C	2002	Pfl	Wi
<i>Mycosphaerella dearnessii</i>	Braunfleckenkrankheit	<i>Pinus nigra</i> , <i>P. mugo</i> , <i>P. strobus</i> , <i>P. sylvestris</i> , <i>P. cembra</i>	iB	?	C, D2	1995	Pfl, Wi	Wa, Wi
<i>Mycosphaerella pini</i>	Rotbandkrankheit	<i>Picea abies</i> , <i>P. pungens</i> , <i>P. omorika</i>	iB	?	C, D2	1989	Pfl, Wi	Wa, Wi
<i>Ophiostoma novo-ulmi</i>	Ulmenwelke	<i>Ulmus glabra</i> , <i>U. minor</i> , <i>U. laevis</i>	A, S, T, W	A, NA	C	1975	H, R	A, Wu
<i>Ophiostoma ulmi</i>	Ulmenwelke	<i>Ulmus glabra</i> , <i>U. minor</i> , <i>U. laevis</i>	A, S, T, W	A	C	1910	H, R	A, Wu
<i>Phaeocryptopus gäumannii</i> <sup>9</sup>	Russige Douglasienschütte	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	iB	NA	D1	1925	Pfl	Wi
<i>Phomopsis viticola</i>	Schwarzfleckenkrankheit der Rebe	<i>Vitis</i> spp.	sB	NA	C	1968	Pfl	Wi
<i>Phyllosticta ampelica</i>	Schwarzfäule der Rebe	<i>Vitis</i> spp.	sB	NA	C	1988	Pfl	Wi
<i>Phytophthora alni</i> ssp. <i>alni</i>	Wurzelhalsfäule der Erle	<i>Alnus incana</i> , <i>A. glutinosa</i>	S, W	E, NA	C	2008	E, Pfl	Wa
<i>Phytophthora cactorum</i>	viele Wirte	viele Wirte	S, W	?	D2	1904	E, Pfl	Wa
<i>Phytophthora cambivora</i>	Tintenkrankheit	viele Wirte	S, W	AU	C, D2	1942	E, Pfl	Wa
<i>Phytophthora cinnamomi</i>	Tintenkrankheit	viele Wirte	S, W	PN	C, D2	1981 <sup>8</sup>	E, Pfl	Wa
<i>Phytophthora plurivora</i>	viele Wirte	viele Wirte	S, W	A	C	2005	E, Pfl	Wa
<i>Phytophthora quercina</i>	Eichenkomplexkrankheit	<i>Quercus robur</i>	W	NA	C	2005	E, Pfl	Wa
<i>Phytophthora ramorum</i>	plötzlicher Eichenlod (SOD)	viele Wirte	iB, sB, A, S, T	?	C, D2	2003	E, Pfl	Wa, Wi
<i>Phytophthora syringae</i>	Loorbeermehltau	viele Wirte	A, S, T	?	D2	1975	E, Pfl	Wa
<i>Pseudoidium lauraccarum</i> <sup>9</sup>	Rostige Douglasienschütte	<i>Laurus nobilis</i>	iB	?	D1	1990	Pfl, Wi	Wi
<i>Rhabdochloa pseudotsugae</i>	Rhododendron-Knospensterben	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	iB	NA	D1	1922	Pfl	Wi
<i>Seibertia azaleae</i>	Massaria-Krankheit der Platane	<i>Rhododendron</i> spp., andere Erikagewächse	T	NA	D1	?	Pfl	A
<i>Splanchnonema platani</i>	Massaria-Krankheit der Platane	<i>Platanus × hispanica</i> (Syn. <i>P. × acerifolia</i> )	A, T	E, NA	D1	2003	Pfl, H, R	Wi

**Tab 1** In die Schweiz eingeschleppte und eingewanderte, pathogene Neomyzeten. 1) A = Archäophyt, N = Neophyt, E = einheimische Pflanze; 2) A = Äste, iB = immergrüne Blätter, sb = sommergrüne Blätter, S = Stamm, T = Triebe, W = Werkzeuge; 3) A = Asien, AU = Australien, E = Europa, NA = Nordamerika, PN = Papua-Neuguinea; 4) siehe Abbildung 2; 5) E = Erde, H = Holz und Holzverpackungen, Pfl = lebende Pflanzen, R = Rinde, W = Werkzeuge, Wi = Wind; 6) A = Arthropoden, Wa = Wasser (Regen), Wi = Wind, Wu = Wurzelkontakte; 7) windverbreitete Wassertropfen bei Stürmen (Sinclair & Lyon 2005); 8) 1981 in einer Baumschule, 1997 im Wald; 9) Daten teilweise aus Santini et al (2013).

der hypovirulenten Form Kastanienbäume angreifen, z.B. wenn diese nach Dürre oder nach Kastanienengallwespenbefall bereits geschwächt sind (Werme-linger 2014, dieses Heft).

### Eschentriebsterben – *Hymenoscyphus pseudoalbidus*

*H. pseudoalbidus* stammt aus Ostasien, wo er als harmloser Endophyt Eschenarten (*Fraxinus*) besiedelt (Zhao et al 2012). Anfang der 1990er-Jahre wurde der Pilz nach Polen eingeschleppt, sehr wahrscheinlich versteckt in gesunden Baumschul- oder Zierpflanzen. In der Folge hat sich der Pilz mit durchschnittlich 75 km pro Jahr ausgebreitet und wurde 2007 das erste Mal in der Schweiz diagnostiziert. Inzwischen ist er auf der ganzen Alpennordseite verbreitet (Queloz et al 2011, Gross et al 2014). 2006 wurde er in Slowenien und in den letzten Jahren zunehmend in Nordostitalien (Friaul-Julisch Venetien, Trentino und Südtirol) beobachtet (Conedera et al 2012, Engesser 2012). Im August 2013 wurde *H. pseudoalbidus* vom Autor das erste Mal in Faido (Tessin) auf der Alpensüdseite beobachtet. Die becherförmigen Fruchtkörper entstehen zwischen Juni und September in der Streu auf den Blattresten des Vorjahres. Die Sporen werden aktiv abgeschossen und mit dem Wind verbreitet. Die Infektion erfolgt auf den Blättern. Nach einer rund zweiwöchigen Inkubationsperiode entstehen die ersten Nekrosen, die rasch grösser werden. Der Pilz kann dann die Rachis (Mittelnerv eines gefiederten Blattes) erreichen und von dort Richtung Trieb weiterwachsen. Falls der Pilz den Trieb erreicht, kommt es zur Bildung typischer Nekrosen, die schliesslich zu dessen Tod führen. Von dort kann der Befall Richtung Hauptstamm und stammabwärts weitergehen. Für den Pilz ist die Besiedlung der verholzten Teile des Baumes eine Sackgasse, da er nur ganz selten auf diesen sporuliert. Der Pilz wächst auch in die Wurzeln und verhindert so die Bildung von Stockausschlägen. Neuerdings werden an Bäumen im Stangenholzalder Nekrosen an der Stammbasis beobachtet, die in den Splint hineinreichen. Dadurch werden die Bäume derart geschwächt, dass Sekundärparasiten wie Hallimasche (*Armillaria*) zum raschen Absterben der Bäume führen können (Husson et al 2012). Es gibt Hinweise auf resistente Baumindividuen. Diese Resistenz könnte darauf beruhen, dass die Blätter im Herbst früher abgeworfen werden und damit die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass der Erreger den Trieb erreicht. Zudem ist die Entwicklung der Nekrosen auf Bäumen mit frühem Blattabwurf langsamer, was auf die Präsenz eines bisher nicht näher identifizierten Resistenzfaktors hindeutet (McKinney et al 2012). Hat sich die Krankheit etabliert, sind Bekämpfungsmassnahmen aussichtslos. Die Einschleppung neuer Genotypen des Erregers nach Europa muss aber vermieden werden, um resistente Eschen nicht zu gefährden.

### Phytophthora-Arten

Weltweit gibt es etwa 150 *Phytophthora*-Arten, und jährlich werden neue beschrieben. Zudem mutieren und hybridisieren viele Arten laufend (Brasier et al 2004b). Die meisten Arten sind bodenbürtig und werden mit Wasser transportiert (Zoosporen), wenige sind luftbürtig oder beides (*P. ramorum*, *P. infestans*). Viele sind polyphag, einige wirtsspezifisch (*P. alni* ssp. *alni*, *P. quercina*; Tabelle 1), und sie können mehrere Jahre mit Dauersporen (Oosporen, Chlamydosporen) überleben. Die Herkunft von *Phytophthora*-Arten ist oft unklar, phylogenetische Daten weisen aber darauf hin, dass sich die heutigen Arten aus tropischen entwickelt haben. Manche *Phytophthora*-Arten führten zu dramatischen Epidemien wie z.B. *P. infestans* auf Kartoffel, *P. cinnamomi* in *Eucalyptus marginata*-Wäldern (Jarrah forests) in Südostaustralien (Podger et al 1965) und *P. ramorum* auf vielen Gehölzpflanzen in kalifornischen Küstenwäldern (Rizzo & Garbelotto 2003). Der Nachweis ist schwierig, da es sich um Primärparasiten handelt, welche die Gewebe rasch abtöten, danach aber durch konkurrenzstärkere Sekundärparasiten ersetzt werden. Die Schweiz blieb bis jetzt von Epidemien verschont, obschon Arten, die andernorts zu Schäden führten, wie zum Beispiel *P. ramorum* und *P. alni*, auch in der Schweiz nachgewiesen wurden (Tabelle 1).

### «Plötzlicher Eichtod», sudden oak death (SOD) – *Phytophthora ramorum*

Die Krankheit trat in der Schweiz erstmals im Jahr 2003 in einer Gärtnerei an *Viburnum bodnantense* auf (Heiniger & Stadler 2003). Seither gab es jährlich einen bis sieben neue Befallsherde, jedoch immer in Gärten oder Baumschulen auf *Rhododendron*-, *Viburnum*-, *Camellia*- und *Pieris*-Arten (Meier et al 2007–2013, Prospero et al 2013). Die Krankheit ist luftbürtig, wurde bis jetzt in der Schweiz aber noch nie in natürlichen Ökosystemen beobachtet, ganz im Gegensatz zu den USA oder Grossbritannien. In den küstennahen Wäldern Kaliforniens und Oregons kam es zu grossflächigen Schäden an Eichen (*Quercus* spp.) und «Tanoak» (*Notholithocarpus densiflorus*; Grünwald et al 2012), und im Südwesten Grossbritanniens wurden einige Tausend gepflanzte Japanlärchen (*Larix kaempferi*) befallen und starben zum Teil ab (Webber et al 2010). Die Schweizer Population von *P. ramorum* ist klonal und umfasst nur gerade sieben Genotypen, alle mit demselben Paarungstyp (Prospero et al 2013). Der komplementäre Paarungstyp kommt zurzeit nur in den Niederlanden und Nordamerika vor (Prospero et al 2013). Neue Genotypen, die durch Rekombination nach der Einschleppung des komplementären Paarungstyps oder spontan durch Mutation entstehen könnten, stellen eine zukünftige Gefahr dar. Das bisherige Ausbleiben einer Epidemie in Zentraleuropa könnte aber auch darauf hindeuten, dass *P. ramorum* nur bei an-

haltend hoher Luftfeuchtigkeit, wie sie in küstennahen Gebieten gegeben ist, epidemisch auftritt.

### ***Phytophthora*-Wurzelhalsfäule der Erlen – *Phytophthora alni* ssp. *alni***

1993 wurde in Grossbritannien an Erlen (*Alnus*) in Ufernähe von Gewässern eine bisher unbekannte, letale *Phytophthora*-Art entdeckt, die sehr wahrscheinlich rezent durch Hybridisierung entstanden ist (Brasier et al 1999). Die Art wurde von Brasier et al (2004b) als eine Gruppe polyploider Hybriden beschrieben, mit einer fast tetraploiden *P. alni* ssp. *alni* (Paa) und zwei Unterarten mit intermediären Chromosomensätzen zwischen diploid und tetraploid, *P. alni* ssp. *uniformis* (Pau) und *P. alni* ssp. *multiformis* (Pam). Neuere Untersuchungen zeigen, dass es sich bei Paa um einen Hybriden von Pau und Pam handelt (Ioos et al 2006). Paa ist viel virulenter als seine beiden Vorfahren und lässt sich inzwischen an den Unterläufen aller grösseren Fließgewässer Bayerns nachweisen (Jung & Blaschke 2004). In der Schweiz gab es 2006 die ersten Verdachtsfälle, der Nachweis gelang 2008 (Meier et al 2007–2013). Seither gibt es jährlich mehrere Meldungen von *A. glutinosa* und *A. incana* in Ufernähe von Gewässern mit Schleimfluss an der Stammbasis, Wurzelhalsfäule und lichten Kronen – Symptome, die auf den Erreger hindeuten. Die natürliche Ausbreitung von Paa erfolgt mit Zoosporen im Wasser, aber die wirksamste Ausbreitung der Krankheit erfolgt durch das Auspflanzen von befallenen Baumschulpflanzen.

### **Potenziell gefährliche Neomyzeten**

Es bestehen umfangreiche internationale und nationale Regelwerke mit dem Ziel, unerwünschten

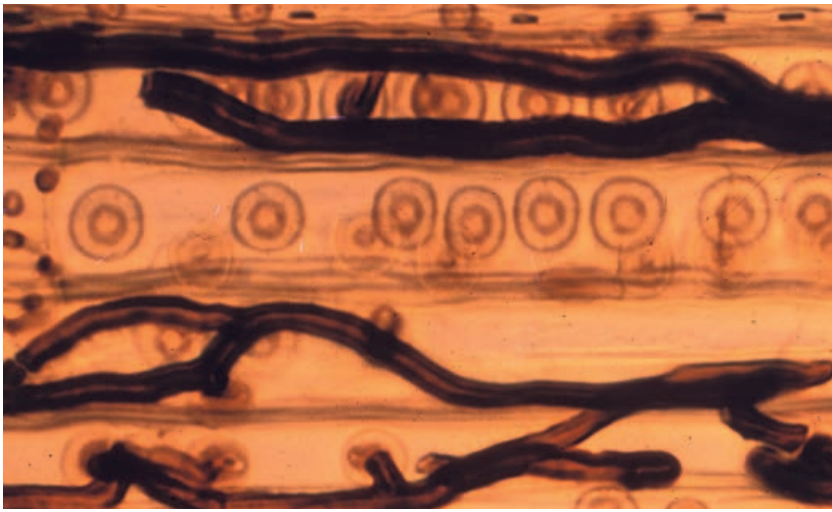


**Abb 3** Eichenwelke (*Ceratocystis fagacearum*) an einer Nadel-eiche (*Quercus ellipsoidalis*). Foto: Steven Katovich, USDA Forest Service, Bugwood.org

Einschleppungen vorzubeugen. Die Einfuhr von für die Schweiz potenziell gefährlichen Pilzen sowie Pflanzen, Pflanzenteilen und Substraten, auf denen diese Pilze vorkommen können, ist in der Verordnung vom 27. Oktober 2010 über Pflanzenschutz geregelt (Pflanzenschutzverordnung, PSV, SR 916.20). Eine besonders starke Gefährdung geht von Pathogenen aus, die Schäden am Stamm oder an den Wur-



**Abb 4** Durch den Schwärzepilz (*Leptographium wageneri*) abgetötete zweinadlige Pinyon-Kiefern (*Pinus edulis*). Foto: Ogden Archive, USDA Forest Service, Bugwood.org



**Abb 5** Dunkelbraune, dickwandige Hyphen von *Leptographium wageneri* in den Holztracheiden einer Pinyon-Kiefer (*Pinus edulis*). Bei den ringförmigen Strukturen handelt es sich um Hoftüpfel. Foto: Ogden Archive, USDA Forest Service, Bugwood.org

zeln verursachen können, wie die folgenden zwei Beispiele zeigen.

#### **Eichenwelke – *Ceratocystis fagacearum***

Die Eichenwelke ist eine systemische, meistens letale Gefässkrankheit in Nordamerika. Der Erreger ist nahe verwandt mit den Erregern der Ulmenwelke und hat eine ähnliche Biologie. Über 20 Eichenarten sind anfällig, wobei Roteichen anfälliger sind als Weisseichen (Abbildung 3). Unsere Eichen (*Q. robur*, *Q. petraea*, *Q. pubescens*), alles Weisseichen, gelten als anfällig und starben bei Versuchen in Nordamerika innerhalb eines Jahres nach der Inokulation ab (Pinson et al 2003). Der Erreger scheint auf Eichen spezialisiert zu sein, es ist aber unklar, ob er auch andere Fagaceen befallen kann. Die Verschleppung nach Europa wäre eine Katastrophe.

#### **Schwärzepilz – *Leptographium wageneri***

*L. wageneri* ist ein weiteres Pathogen, das mit den Erregern der Ulmenwelke nahe verwandt ist und via Wurzelkontakte in Nachbarbäume gelangt. Es ist im Westen Nordamerikas beheimatet und kommt in drei Varietäten mit unterschiedlicher Wirtspräferenz vor (Sinclair & Lyon 2005). Die am stärksten betroffenen Wirte sind Arten aus der Gattung *Pinus* (Abbildungen 4 und 5) und die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*). Die Krankheit ist besonders häufig an Standorten mit trocken-heissen Sommern, wie sie auch für die zentralalpineren, von West nach Ost verlaufenden Täler charakteristisch sind. Zudem ist die Waldföhre (*Pinus sylvestris*) anfällig. Der Pilz stellt also auch für die Schweiz eine potenzielle Bedrohung dar.

Diese beiden Pilzarten sind als potenzielle Gefahr für unsere Gehölze bekannt. Daher sind gezielte Massnahmen gegen eine Einschleppung möglich. Schwieriger wird es, wenn nicht bekannt ist, wer der «Feind» ist und woher er kommt, wie dies beispielsweise bei endophytischen Pilzen der Fall ist.

## **Handlungsansätze**

Die meisten invasiven Pilzkrankheiten, die zu ökologischen und ökonomischen Katastrophen geführt haben, sind auf menschliches Handeln zurückzuführen. Folglich liegt es auch in unserer Hand, die Wahrscheinlichkeit neuer, invasiver Pilzkrankheiten tief zu halten. Es ergeben sich drei Handlungsansätze: Prävention, Früherkennung und Management nach erfolgter Einschleppung (Kowarik 2010).

### **Prävention**

Die Verhinderung von Einschleppungen hat oberste Priorität. Zur Verringerung des Risikos von Einschleppungen aus anderen Kontinenten gibt es mindestens drei Handlungsansätze: a) Infektionsversuche auf einheimischen Gehölzen mit potenziellen Pathogenen, die auf anderen Kontinenten heimisch sind, b) Aufbau eines Frühwarnsystems durch Pflanzung möglichst naturnaher Wälder (sentinel forests oder «Wächterwälder») mit einheimischen Gehölzen auf anderen Kontinenten und c) Verhinderung der Einfuhr von potenziell gefährlichen Pilzen sowie Pflanzen, Pflanzenteilen und Substraten, die diese Pilze enthalten könnten.

### *Infektionsversuche*

Für bekannte Krankheitserreger wie *C. fagacearum* und *L. wageneri* sind Informationen aus Infektionsversuchen zum Teil bereits vorhanden, fehlen aber für Pilze, die in ihrer Heimat nie negativ aufgefallen sind (Abbildung 2, Szenario A), ausserhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets aber invasiv sein könnten (Szenario C). So kommen zum Beispiel auf *Nothofagus*-Arten auf der Südhemisphäre diverse harmlose *Ceratocystis*-Arten (Verwandte der Ulmenwelke) vor (Butin & Aquilar 1984), von denen nicht bekannt ist, ob sie auf verwandten Wirten wie unseren Buchen, Eichen oder Erlen Gefässkrankheiten (Welken) verursachen könnten.

### *Frühwarnsysteme (sentinel forests)*

Dieser Handlungsansatz dient der Vorbeugung gegen Szenario C, indem das Eintreten von Szenario B getestet wird (Abbildung 2). Einheimische Baumarten werden weltweit an möglichst vielen Standorten mit ähnlichen Umweltbedingungen (Klima, Boden) angepflanzt, um Pilze zu ködern, die in diesen Gebieten beheimatet und unauffällig sind (z.B. endophytische Pilze), bei uns aber invasiv sein könnten. Dabei muss gewährleistet sein, dass bei der «Verpflanzung» unserer Baumarten keine unerwünschten Organismen ins Testgebiet eingeschleppt werden. Einzelne Exemplare der häufigsten einheimischen Waldbäume wachsen bereits in vielen botanischen Gärten rund um den Globus und stellen ein gewisses Frühwarnsystem dar. Zur Verbesserung dieses Systems sollten die Anstrengungen jedoch

vermehrt in Richtung «ökologisch-botanische Gärten» gehen, in denen anstelle von Einzelexemplaren, ganze Wälder (sentinel forests) angepflanzt werden (Britton et al 2010). Solche müssten die genetische Diversität der Populationen hier in der Schweiz möglichst gut repräsentieren. Zumindest für unsere häufigsten beiden Baumarten, Fichte und Buche, sollte diese Idee geprüft werden.

Gerade für die Entdeckung potenziell pathogener Endophyten könnten «sentinel forests» nützlich sein. Da bis heute keine endophytenfreie Pflanzenart bekannt ist (Sieber 2007), stehen alle Pflanzenarten unter Verdacht, Träger von Pilzen zu sein, die ausserhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebietes pathogen werden könnten. Quarantäne, d.h. Beobachtung von eingeführten Pflanzen während einiger Monate, bevor sie in den Handel kommen, ist in diesem Falle nutzlos, da die Endophyten im Originalwirt nicht bemerkt werden und erst später auf neue Wirte springen (Slippers et al 2005). Die meisten eingeschleppten Endophyten sterben im neuen Gebiet jedoch ab, weil die Umweltbedingungen ungünstig sind, geeignete Wirte fehlen oder einheimische Endophyten konkurrenzfähiger sind. Aber in mindestens zwei Fällen, dem Eschentriebsterben und dem Kastanienrindenkrebs, waren Endophyten erfolgreich und wurden zu invasiven Pathogenen.

#### *Einfuhrbeschränkungen*

Die Einschleppung von Endophyten war und ist mit den geltenden Regeln nicht zu verhindern. Folglich müssen die Einfuhrbestimmungen in der EU und in der Schweiz dahin gehend angepasst werden, dass es keine Einfuhr von unbehandelten lebenden Pflanzen mehr gibt. Eingeführt werden dürften nur noch Pflanzen, die aus gebeizten (mit Fungiziden behandelten) oder wärmebehandelten Samen, Stecklingen oder sterilen Meristemkulturen in speziell hygienisch arbeitenden, zertifizierten, vorzugsweise einheimischen Betrieben angezogen wurden (Pflanzenpass).

Gefässkrankheiten (Ulmen-, Platanen- oder Eichenwelke) zählen zu den gefährlichsten Krankheiten. Ihre Erreger sind nahe verwandt, und zur gleichen Verwandtschaft gehören auch viele, mehrheitlich harmlose Holz- und Rindenbesiedler wie zum Beispiel «Bläuepilze», die ausgiebig in den Gängen von Arthropoden (z.B. Borkenkäfern) sporulieren und von diesen auf neue Pflanzenindividuen übertragen werden. Fast jede Gehölzart hat ihre spezifischen Besiedler. Für einige Arten wird eine latente endophytische Lebensweise in gesunden Bäumen vermutet (Bohar 1996), die auf ihren natürlichen Wirten kein Problem darstellen, bei Kontakt mit einem neuen Wirt aber zu einem solchen werden könnten (Roux & Wingfield 2009). Zur Prävention von Gefässkrankheiten müsste daher die Einfuhr von unbehandeltem Holz und unbehandelter Rinde aller Gehölz-

arten (oder zumindest von Koniferen, Buchen- und Seifenbaumartigen, zu denen unsere Hauptbaumarten gehören) in jeglicher Form verboten werden.

Auch Pflanzsubstrate (Erde, Torf, Kompost und Rinde) sind potenzielle Quellen nicht einheimischer Pilze. Gerade wegen der bodenbürtigen Pilze wie der *Phytophthora*-Arten wären regelmässige Kontrollen der Böden in Baumschulen und die Reinheit des Giesswassers ein Muss (Prospero et al 2013). Jung & Blaschke (2004) stellten fest, dass 553 Baumschulen (91%) in 16 europäischen Ländern mit total 43 *Phytophthora*-Arten verseucht waren. Darunter fanden sich auch die gegenüber den jeweiligen Baumarten aggressivsten Schaderreger. Eine bewährte waldbauliche Technik, um Verseuchungen mit *Phytophthora* vorzubeugen, stellt die Naturverjüngung dar.

Mit den «Next-Generation-Sequencing-Technologien» (NGS-Technologien) kann innert kürzester Zeit die Basensequenz von Millionen von DNA-Fragmenten bestimmt werden, die sich zur Bestimmung von Organismen wie Pilzen eignen (Metzker 2010). Damit steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem sich die in Pflanzen- und Bodenmaterial vorhandenen Pilze relativ schnell bestimmen lassen. Allerdings wird auch DNA von toten Pilzen detektiert, die keine Gefahr darstellen. Zudem sind die Technologien im Moment noch teuer. Dank der Konkurrenz verschiedener Technologien und dem technologischen Fortschritt werden die Preise in den kommenden Jahren aber stark fallen. In Zukunft sollte die Ausstellung eines Pflanzenpasses ein Screening der vorhandenen Pilz-DNA mittels NGS-Technologie voraussetzen.

#### **Früherkennung**

Bei der Früherkennung von Krankheiten in unseren Wäldern sind die Förster und die an der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL angesiedelte Fachstelle «Waldschutz Schweiz» von unschätzbarem Wert. Auch Baumschulen sind für die Früherkennung wichtig. Allerdings werden dort Krankheiten durch den Einsatz von Fungiziden vielfach maskiert. Um Krankheiten frühzeitig zu erkennen, sollte vor dem Auspflanzen für eine bestimmte Frist auf Fungizide verzichtet werden.

#### **Management nach erfolgter Einschleppung**

Eine neue Krankheit sollte bekämpft werden, solange die Notwendigkeit einer Bekämpfung noch nicht offensichtlich ist; denn Ausrottung ist nur in einem frühen Stadium möglich. Danach beschränken sich die Massnahmen auf Zurückdrängung, deren Erfolg mit einer Erfolgskontrolle (Monitoring) überprüft werden sollte. Sind Ausrottung oder Zurückdrängung erfolglos, bleibt nur noch die Berücksichtigung der neuen Situation in der forstlichen Planung. ■

*Eingereicht: 31. Oktober 2013, akzeptiert (mit Review): 21. Januar 2014*



## Dank

Ich danke ganz herzlich meinem Kollegen Ottmar Holdenrieder für seine Unterstützung beim Verfassen dieses Artikels – mit Arbeiten aus seinem Literaturfundus, konstruktiven Diskussionen bei der Niederschrift der Arbeit und der kritischen Durchsicht des Manuskripts. Ebenso gebührt bester Dank Valentin Queloz für die Durchsicht und Korrektur der französischen Zusammenfassung.

## Literatur

- ANAGNOSTAKIS SL, DAY PR (1979) Hypovirulence conversion in *Endothia parasitica*. *Phytopathology* 69: 1226–1229.
- BOHAR G (1996) *Ceratocystis erinaceus*: A new endophyte in the heartwood of oak. *Acta Phytopathol Hun* 31: 213–218.
- BRASIER CM, COOKE DEL, DUNCAN JM (1999) Origin of a new *Phytophthora* pathogen through interspecific hybridization. *P Nat Acad Sci USA* 96: 5878–5883.
- BRASIER CM (2000) Intercontinental spread and continuing evolution of the Dutch elm disease pathogens. In: Dunne CP, editor. *The elms: breeding, conservation and disease management*. Boston: Kluwer. pp. 61–72.
- BRASIER CM, BUCK KW, PAOLETTI M, CRAWFORD L, KIRK SA (2004A) Molecular analysis of evolutionary changes in populations of *Ophiostoma novo-ulmi*. *Forest Syst* 13: 93–103.
- BRASIER CM, KIRK SA, DELCAN J, COOKE DEL, JUNG T ET AL (2004B) *Phytophthora alni* sp. nov. and its variants: designation of emerging heteroploid hybrid pathogens spreading on *Alnus* trees. *Mycol Res* 108: 1172–1184.
- BRITTON KO, WHITE P, KRAMER A, HUDLER G (2010) A new approach to stopping the spread of invasive insects and pathogens: early detection and rapid response via a global network of sentinel plantings. *New Zeal J For Sci* 40: 109–114.
- BUTIN H, AQUILAR AM (1984) Blue-stain fungi on *Nothofagus* from Chile – including two new species of *Ceratocystis* Ellis & Halst. *Phytopathol Z* 109: 80–89.
- CONEDERA M, ENGESESSER R, MARESI G (2012) *Chalara fraxinea*: nuova minaccia per il bosco ticinese? *Agricoltura Ticinese* 144: 10.
- ENGESESSER R (2011) Der Platanenkrebs. *g'plus* 15: 2.
- ENGESESSER R (2012) Das Eschentriebsterben – eine neue Pilzkrankheit erobert die Schweiz. *Bündner Wald* 65 (3): 74–78.
- GESSLER C, MAURI G (1987) Diseases and pests of the plane tree – situation in Ticino (Southern Switzerland). *Bot Helv* 97: 349–356.
- GROSS A, HOLDENRIEDER O, PAUTASSO M, QUELOZ V, SIEBER TN (2014) *Hymenoscyphus pseudoalbidus*, the causal agent of European ash dieback. *Mol Plant Pathol* 15: 5–21. doi: 10.1111/mpp.12073
- GRÜNWARD NJ, GARBELOTTO M, GOSS EM, HEUNGENS K, PROSPERO S (2012) Emergence of the sudden oak death pathogen *Phytophthora ramorum*. *Trends Microbiol* 20: 131–138.
- HEINIGER U, STADLER B (1990) Kastanienrindenkrebs auf der Alpennordseite. *Schweiz Z Forstwes* 141: 383–388.
- HEINIGER U (2003) Das Risiko eingeschleppter Krankheiten für die Waldbäume. *Schweiz Z Forstwes* 154: 410–414. doi: 10.3188/szf.2003.410
- HEINIGER U, STADLER B (2003) Gefährliche Quarantänekrankheit gefunden. *Der Gartenbau* 124 (51/52): 10–12.
- HEINIGER U, RIGLING D (2009) Application of the *Cryphonectria hypovirus* (Chv-1) to control the chestnut blight, experience from Switzerland. In: Soylyu A, Mert C, editors. *International Workshop on Chestnut Management in Mediterranean Coun-*
- tries – Problems and Prospects. Leuven: International Soc Horticultural Sci. pp. 233–245.
- HOEGGER PJ, BINZ T, HEINIGER U (1996) Detection of genetic variation between *Ophiostoma ulmi* and the NAN and EAN races of *O. novo-ulmi* in Switzerland using RAPD markers. *Eur J Forest Pathol* 26: 57–68.
- HUSSON C, CAEL O, GRANDJEAN JP, NAGELEISEN LM, MARÇAIS B (2012) Occurrence of *Hymenoscyphus pseudoalbidus* on infected ash logs. *Plant Pathol* 61: 889–895.
- IOOS R, ANDRIEUX A, MARÇAIS B, FREY P (2006) Genetic characterization of the natural hybrid species *Phytophthora alni* as inferred from nuclear and mitochondrial DNA analyses. *Fungal Genet Biol* 43: 511–529.
- JUNG T, BLASCHKE M (2004) *Phytophthora* root and collar rot of alders in Bavaria: distribution, modes of spread and possible management strategies. *Plant Pathol* 53: 197–208.
- KOWARIK I (2010) Biologische Invasionen; Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa. Stuttgart: Ulmer, 2 ed. 492 p.
- LIEBHOLD AM, BROCKERHOFF EG, GARRETT LJ, PARKE JL, BRITTON KO (2012) Live plant imports: the major pathway for forest insect and pathogen invasions of the US. *Front Ecol Environ* 10: 135–143.
- MCKINNEY LV, THOMSEN IM, KJAER ED, NIELSEN LR (2012) Genetic resistance to *Hymenoscyphus pseudoalbidus* limits fungal growth and symptom occurrence in *Fraxinus excelsior*. *Forest Pathol* 42: 69–74.
- MEIER F, ENGESESSER R, FORSTER B, ODERMATT O, ANGST A (2007–2013) Forstschutz-Überblick 2006–2012. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch. anstalt Wald Schnee Landschaft.
- METZKER ML (2010) Applications of next-generation sequencing: sequencing technologies – the next generation. *Nat Rev Genet* 11: 31–46.
- PAUTASSO M, DEHNEN-SCHMUTZ K, HOLDENRIEDER O, PIETRAVALLE S, SALAMA N ET AL (2010) Plant health and global change – some implications for landscape management. *Biol Rev* 85: 729–755.
- PAUTASSO M, DOERING TF, GARBELOTTO M, PELLIS L, JEGER M (2012) Impacts of climate change on plant diseases – opinions and trends. *Eur J Plant Pathol* 133: 295–313.
- PHILIBERT A, DESPREZ-LOUSTAU M-L, FABRE B, FREY P, HALKETT F ET AL (2011) Predicting invasion success of forest pathogenic fungi from species traits. *J Appl Ecol* 48: 1381–1390.
- PINON J, MACDONALD W, DOUBLE M, TAINTER F (2003) Les risques pour la chênaie européenne d'introduction de *Ceratocystis fagacearum* en provenance des Etats-Unis. Paris: Académie d'Agriculture France. 5 p.
- PODGER FD, DOEPEL RF, ZENTMYER GA (1965) Association of *Phytophthora cinnamomi* with a disease of *Eucalyptus marginata* forest in western Australia. *Plant Dis Rep* 49: 943–947.
- PROSPERO S, RIGLING D (2012) Invasion Genetics of the Chestnut Blight Fungus *Cryphonectria parasitica* in Switzerland. *Phytopathology* 102: 73–82.
- PROSPERO S, VERCAUTEREN A, HEUNGENS K, BELBAHRI L, RIGLING D (2013) *Phytophthora* diversity and the population structure of *Phytophthora ramorum* in Swiss ornamental nurseries. *Plant Pathol* 62: 1063–1071.
- QUELOZ V, GRÜNIG CR, BERNDT R, KOWALSKI T, SIEBER TN ET AL (2011) Cryptic speciation in *Hymenoscyphus albidus*. *Forest Pathol* 41: 133–142.
- RIZZO DM, GARBELOTTO M (2003) Sudden oak death: endangering California and Oregon forest ecosystems. *Front Ecol Environ* 1: 197–204.
- ROUX J, WINGFIELD MJ (2009) *Ceratocystis* species: emerging pathogens of non-native plantation *Eucalyptus* and *Acacia* species. *South Forests* 71: 115–120.
- SANTINI A, GHELARDINI L, DE PACE C, DESPREZ-LOUSTAU ML, CAPRETTI P ET AL (2013) Biogeographical patterns and determinants of invasion by forest pathogens in Europe. *New Phytol* 197 (1): 238–250.

- SHAW CGT, GEILS BW (2010) White pines, *Ribes*, and blister rust. *Forest Pathol* 40: 145–418.
- SIEBER TN (2007) Endophytic fungi in forest trees: are they mutualists? *Fungal Biol Rev* 21: 75–89.
- SINCLAIR WA, LYON HH (2005) Diseases of trees and shrubs. Ithaca: Comstock, 2 ed. 680 p.
- SLIPPERS B, STENLID J, WINGFIELD MJ (2005) Emerging pathogens: fungal host jumps following anthropogenic introduction. *Trends Ecol Evol* 20: 420–421.
- VACHER C, DAUDIN J-J, PIOUS D, DESPREZ-LOUSTAU M-L (2010) Ecological integration of alien species into a tree-parasitic fungus network. *Biol Invasions* 12: 3249–3259.
- WEBBER JF, MULLETT M, BRASIER CM (2010) Dieback and mortality of plantation Japanese larch (*Larix kaempferi*) associated with infection by *Phytophthora ramorum*. *New Disease Rep* 22: 19.
- WERMELINGER B (2014) Invasive Gehölzinsekten: Bedrohung für den Schweizer Wald? *Schweiz Z Forstwes* 165: 166–172. doi: 10.3188/szf.2014.0166
- ZHAO Y-J, HOSOYA T, BARAL H-O, HOSAKA K, KAKISHIMA M (2012) *Hymenoscyphus pseudoalbidus*, the correct name for *Lambertella albida* reported from Japan. *Mycotaxon* 122: 25–41.

## Neomyzeten – eine anhaltende Bedrohung für den Schweizer Wald

Mehr als 40 für einheimische Gehölze pathogene Neomyzeten wurden in den letzten 100 Jahren in die Schweiz eingeschleppt, und die Anzahl Einschleppungen nimmt exponentiell zu. Einige Neomyzeten sind invasiv und verursachen schwere Krankheiten: *Cryphonectria parasitica*, Erreger des Kastanienrindenkrebsses, *Hymenoscyphus pseudoalbidus*, Erreger des Eschentriebsterbens, *Ophiostoma ulmi* und *O. novo-ulmi*, Erreger der Ulmenwelke, und *Ceratocystis platani*, Erreger des Platanenkrebsses. Die Erreger des «sudden oak death» (*Phytophthora ramorum*) und der Wurzelhalsfäule der Erlen (*P. alni* ssp. *alni*) kommen in der Schweiz vor, haben aber noch nicht epidemisches Niveau erreicht. *Ceratocystis fagacearum*, Erreger der Eichenwelke, oder *Leptographium wageneri*, ein Schwärzepilz von Koniferen, fehlen bisher in der Schweiz, stellen aber eine potenzielle Gefahr für den Schweizer Wald dar. Während Massnahmen gegen bekannte Krankheitserreger in Kraft sind, ist die Vorbeugung gegen unbekannte Gefahren eine grosse Herausforderung, zum Beispiel gegen potenzielle Krankheiten, die von Pilzen ausgehen, welche im Ursprungsgebiet harmlose Endophyten sind. Das Endophytenproblem kann nur durch die Aufzucht von Pflanzen aus pilzfrienen Samen, Stecklingen oder Meristemkulturen vor Ort umgangen werden. Zudem könnten «sentinel forests» von einheimischen Gehölzarten an möglichst vielen Standorten rund um die Welt als Frühwarnsysteme nützlich sein. Um Welke- und Wurzelkrankheiten vorzubeugen, müsste der Import von unbehandeltem Holz und unbehandelten Pflanzsubstraten (Erde) verhindert werden. Naturverjüngung beugt der Verseuchung von Böden mit *Phytophthora*-Arten aus Baumschulen vor.

## Néomycètes – un danger permanent pour la forêt suisse

Plus de 40 espèces de néomycètes pathogènes des espèces ligneuses ont été introduites en Suisse durant les 100 dernières années, et le nombre de nouvelles introductions augmente exponentiellement. Certains néomycètes sont envahissants et causent de sérieuses maladies: *Cryphonectria parasitica*, agent pathogène du chancre de l'écorce du châtaignier, *Hymenoscyphus pseudoalbidus*, agent pathogène du dépérissement du frêne, *Ophiostoma ulmi* et *O. novo-ulmi*, agents pathogènes de la graphiose de l'orme, et *Ceratocystis platani*, agent pathogène du chancre coloré du platane. L'agent pathogène du «sudden oak death» (*Phytophthora ramorum*) et l'agent pathogène de la pourriture de la couronne des aulnes (*P. alni* ssp. *alni*) sont présents en Suisse, mais ces deux maladies n'ont pas encore atteint un niveau épidémique. *Ceratocystis fagacearum* provoquant le flétrissement américain du chêne, ou *Leptographium wageneri* provoquant le noircissement des racines des pins sont encore absents, mais constituent un danger permanent pour la forêt suisse. Alors que des mesures contre les maladies connues peuvent être appliquées, la prévention des dangers inconnus est un plus grand défi, comme par exemple la lutte préventive contre l'introduction de champignons endophytes considérés comme bénins dans leurs territoires d'origine. Le «problème des endophytes» peut être contourné uniquement en utilisant des plantes issues de semences, de boutures ou de cultures de méristème aseptiques. Des «forêts sentinelles» de ligneux endémiques plantés à différents endroits autour du globe pourraient servir de dispositif d'alerte précoce. Pour la prévention des graphioses, des flétrissements ou des pourritures racinaires, il faut interdire l'importation de bois et de terre non traités. Finalement, le rajeunissement naturel de la forêt prévient la contamination du sol avec des espèces de *Phytophthora* présentes dans les pépinières.