

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500413142/23

Der Prozessionsspinner in Südwestdeutschland – eine szenarische Risikoanalyse für einen potenziell invasiven Schmetterling, der gleichermaßen die Gesundheit von Baum und Mensch bedroht

von J. Schuhmacher, S. Diekmann, L. Henke, S. Schäfer-Penzel

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

August 2017

KLIMOPASS

– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT KLIMOPASS	Dr. Kai Höpker, Dr. Ellinor von der Forst Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; E-Mail: klimopass@lubw.bwl.de
FINANZIERUNG	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLI- MOPASS)
BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT	Prof. Dr. habil. Jörg Schumacher i. A. von: Forstliche Versuchs-und Forschungsanstalt Baden-Württemberg Wonnhaldestr. 4, 79100 Freiburg
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U50-W03-N16
STAND	August 2017, Internetausgabe Dezember 2018

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

1	ANLASS UND ZIELSETZUNG	4
2	MATERIALIEN UND METHODEN	5
2.1	EXPERIMENTELLER TEIL	5
2.1.1	AUFBAU UND EINRICHTUNG DES SICHERHEITSGEWÄCHSHAUSES	5
2.1.1.1	SICHERHEITSVORKEHRUNGEN IM DETAIL	7
2.1.1.2	WEITERES GEWÄCHSHAUS-INVENTAR	9
2.1.2	EIGELEGE-BESCHAFFUNG UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	9
2.2	ANALYSE UND MODELLIERUNG	11
3	ERGEBNISSE UND INTERPRETATION	13
3.1	EXPERIMENTELLER TEIL	13
3.2	ANALYSE UND MODELLIERUNG	17
4	LITERATURVERZEICHNIS	24

1 ANLASS UND ZIELSETZUNG

Das natürliche Verbreitungsgebiet des thermophilen Pinienprozessionsspinners (nachfolgend auch „PPS“ genannt), *Thaumetopoea pityocampa*, erstreckt sich von Nordafrika bis in den südeuropäischen Raum (Mittelmeergebiet). Dort zählt der Schmetterling zu den wichtigsten Schadinsekten an verschiedenen Kiefern-Arten. Ähnlich wie dessen naher Verwandter, der in weiten Teilen Europas und auch in Deutschland heimische Eichenprozessionsspinner (*T. processionea*), stellt der Pinienprozessionsspinner nicht nur ein Risiko für die durch den Nadelfraß der Raupen (Parasitismus) gefährdeten Wirtsbäume dar. Die Larven des Falters sind auch allergologisch bedeutsam, da sie ab dem dritten Entwicklungsstadium Brennhaare (Setae) mit dem Nesselgift Thaumetopoein (vom wissenschaftlichen Namen der Gattung *Thaumetopoea* abgeleitet) bilden, welche zu symptomatischen Reaktionen in der Haut (Raupendermatitis) und Entzündungen in den Atemwegen (Alveolitis) führen können. Neben verschiedenen Nutz- und Haustieren ist auch der Mensch auf diese Weise gesundheitlich beeinträchtigt (Vega et al. 2011). Bei den Bäumen drückt sich der Schaden in einem allgemeinen Vitalitätsverlust und Zuwachseinbußen von ökonomischer Tragweite aus.

Neben der Gattung *Pinus* befällt der PPS gelegentlich auch Vertreter der Baumgattungen *Cedrus* (Zedern) sowie *Pseudotsuga* (Robinet et al. 2014). Die im deutschen Sprachraum als „Mittelmeer-Pinie“ bezeichnete Kiefernart *Pinus pinea* gehört allerdings - entgegen der namensbedingten Erwartung („Pinienprozessionsspinner“) - aufgrund repellent-toxischer Nadelinhaltsstoffe nicht zum präferierten Wirtsspektrum. Die Gewöhnliche Douglasie (*Pseudotsuga mensiesii*) wurde aus Nordamerika vor allem aus wirtschaftlichen Erwägungen nach Europa eingeführt und ist inzwischen auch in Baden-Württemberg weit verbreitet. Sie gilt als stabil bzw. resilient gegenüber abiotischem Stress, insbesondere gegenüber Trockenheit. Diese und weitere (vorwiegend verwendungsorientierte) Eigenschaften sind häufig Veranlassung dafür, die Baumart als „zukunftsfähig“ darzustellen. Ihr Zukunftspotenzial aus biotisch-waldhygienischer Sicht ist im Rahmen eines vorangegangenen KLIMOPASS-Projektes (Nr. 307998) allgemein bewertet worden. Dabei wurde auch der Forschungsbedarf bezüglich einer möglichen Gefährdung durch *T. pityocampa* artikuliert.

In den letzten Jahrzehnten hat sich der Pinienprozessionsspinner deutlich über die nördliche Grenze seines bisherigen Areals ausgebreitet, wofür der Klimawandel als wesentliche Ursache angenommen wird (Battisti et al. 2005). Im Jahr 2007 rückte der invasive Schmetterling auf französischem Territorium erstmals bis in die unmittelbare Nähe von Deutschland (Baden-Württemberg) vor. Durch eine Verschleppung schlupfbereiter Puppen in Wurzelballen urbaner Container-Großpflanzen (*Pinus nigra*) aus südfranzösischer Aufzucht gelangte der Falter in das elsässische Obernai (vgl. Halbig et al. 2012). Dieses lokale, inzwischen aber wahrscheinlich etablierte Vorkommen stellt aktuell die am weitesten nordöstlich gelegene Exklave des Gesamtverbreitungsgebietes dar. Der PPS tritt dort vorwiegend an der Gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*) auf. Darüber hinaus kam es vor einigen Jahren im Zuge der aktuellen Expansion auch erstmalig zu einem relevanten Übergreifen des Schaderregers auf Douglasien-Bestände in Frankreich (Roques 2010). Der bis dahin für eine „Wirtsbaubarriere“ gegen die nördlich gerichtete Ausbreitung des PPS gehaltene „Douglasien-Gürtel“ erwies sich somit nicht als ausreichend effektiv.

Die Zielstellung des Forschungsprojektes bestand darin zu untersuchen, ob eine Invasion bzw. Etablierung nach Einschleppung des Falters unter den gegenwärtigen Bedingungen in Südwestdeutschland bereits möglich erscheint oder unter der Annahme einer weiteren globalen Erwärmung in naher Zukunft bevorstehen könnte und wie eine nachfolgende Ausbreitung unter den Gegebenheiten des aktuellen Wirtsangebotes in Baden-Württemberg aussähe. Neben der Kiefer kam aus den genannten Gründen auch der Douglasie eine besondere Beachtung in den Studien zu.

2 MATERIAL UND METHODEN

Der im Forschungsprojekt verfolgten Fragestellung nach dem Gefährdungspotential des PPS für den Fall einer Einwanderung bzw. Verschleppung nach Baden-Württemberg wurde in zwei zum Teil parallel durchgeführten Arbeitsschritten nachgegangen. Zum einen (experimenteller Teil) sollten autökologische Informationen über den Schadorganismus im Rahmen variabel angelegter Versuche gesammelt werden. Dafür ist die Entwicklung des Schmetterlings vom Eistadium bis zur Verpuppung an Jungpflanzen der Wirtsbaumarten Schwarzkiefer (*Pinus nigra*) und Douglasie (*Pseudotsuga mensiesii*) unter freilandähnlichen Bedingungen des südwestdeutschen Regionalklimas beobachtet worden. Die Schwarzkiefer wurde in diesem Zusammenhang als Hauptwirt, welcher eine vollständige Entwicklung grundsätzlich gewährleistet, die Douglasie hingegen als Nebenwirt mit „Brücken- bzw. Trittstein“-Funktion sowie potenzierender Schadwirkung angesehen. Zum Schutz vor einer möglichen Raupenabwanderung sowie Brennhaarbelastung wurden die Experimente in einem modifizierten Sicherheits-Gewächshaus durchgeführt, dessen vorherrschende Bedingungen als eingeschränkt freilandtypisch gelten können (vgl. 2.1).

Zum anderen (analytisch-modellierender Teil) ist ein für Südeuropa entwickelter Populationsalgorithmus auf seine Übertragbarkeit geprüft und exemplarisch angewendet worden. Dabei wurden die im Mittelmeerraum maßgeblich an der vor allem nord- und nordostwärts gerichteten Expansion beteiligten Einflussparameter eruiert und eine Anpassung für Baden-Württemberg durch die Verwendung aufbereiteter Regionaldaten vorgenommen. Die Grundlagen dieses Teils (Analyse und Modellierung) sind im Rahmen einer Werkvertragsvergabe (Fa. GeoOmnia, Freiburg) erbracht worden.

2.1 EXPERIMENTELLER TEIL

2.1.1 AUFBAU UND EINRICHTUNG DES SICHERHEITS-GEWÄCHSHAUSES

Der Pinienprozessionsspinner tritt in Deutschland bislang noch nicht unter natürlichen Bedingungen auf. Um die Art dennoch so nahe wie möglich unter den klimatischen Gegebenheiten Südwestdeutschlands zu untersuchen, wurde ein Gewächshaus errichtet und so modifiziert, dass die beabsichtigten Experimente unter freilandähnlichen Bedingungen durchgeführt werden konnten. Da der PPS in Teilen Südeuropas heimisch ist bzw. mindestens als etabliert gelten kann, bestehen zwar nach dem EU-Recht (RL 2000/29/EG) keine amtlichen Quarantäneauflagen, jedoch wurden für die Projektstudien vergleichbare Sicherheitsvorkehrungen getroffen, um einerseits eine nicht beabsichtigte Aussiedlung des gebietsfremden Schädlings zu verhindern und andererseits humanhygienische Risiken auszuschließen.

Meteorogene Faktoren wie Sonnenstrahlung, Luft (Wind) und Regen konnten somit grundsätzlich, wenn auch nicht völlig ungehindert, die Gazeüberzüge penetrieren. Die Temperatur im Inneren der Versuchskammern unterschied sich daher nur geringfügig von der Umgebungstemperatur des gesamten PPS-Hauses.



Abb. 2: Vorder- (links) und Hinteransicht (rechts) des PPS-Hauses.



Abb. 3: Pufferzone zwischen internem Experimentier- und externem Schutzhaus (links) sowie windgeschützter Wiegebereich (rechts).

2.1.1.1 SICHERHEITSVORKEHRUNGEN IM DETAIL

Um eine unbeabsichtigte Aussiedlung des Pinienprozeptionsspinners zu verhindern, wurden verschiedene Sicherheitsvorkehrungen getroffen. Bereits vor Baubeginn des PPS-Hauses wurden während der Planierung der Grundfläche zunächst sämtliche Pflanzenteile und sonstige Hindernisse (v. a. Wurzeln und Steine) entfernt oder eingebnet.

In den Versuchskammern bildeten die mit Wasser gefüllten Topfuntersetzer der Pflanzen (Abb. 4) die erste Barriere gegen eine Abwanderung. Für den Fall, dass das Wasser in den Untersetzen trotz täglicher Kontrollen bei hohen Temperaturen vollständig aufgebraucht oder verdunstet bzw. bei Frost gefrieren konnte, ist ein weiteres Hindernis aus Insektenleim geschaffen worden. Dafür wurde im Randbereich jeder einzelnen Kammer sowie in der Pufferzone auf der Bodenfolie ein zusammenhängendes, für Raupen unüberwindbar breites Leimband aufgetragen, das fortlaufend auf Funktionalität geprüft und gegebenenfalls ausgebessert wurde. Sollte sich auf dem Leim niederschlagsbedingt Wasser ansammeln, wodurch den Raupen eine Überquerung eventuell ermöglicht würde, konnte ein zusätzliches Leimband an der senkrechten Holzkonstruktion des Kammer-Rahmens die Barriere-Funktion übernehmen (Abb. 4). Die Haftwirkung des Leims war entsprechend den Angaben des Herstellers unabhängig von Umwelteinflüssen (z. B. Nässe oder Kälte). Sämtliche konstruktionsbedingte Lücken, sowohl in den Kammern als auch außen, wurden mit Bauschaum ausgefüllt (Abb. 4) und unterlagen ebenfalls regelmäßigen Kontrollen.



Abb. 4: Sicherheitsvorkehrungen (links) durch wassergefüllte Untertöpfe (1), Insekten-Leimbänder (2) und Bauschaum-Verfugungen (3) sowie verwendeter Insektenleim (rechts).

Das Gerüst des Schutzhauses wurde mit einem ummantelten Schweißgitter (Maschendraht) sowie einer für Raupen undurchlässigen Gaze überzogen. Im Anschluss wurde das Holzgerüst des Experimentierhauses errichtet und ebenfalls mit einer Gaze ummantelt. Einerseits stellt das Schutzhaus eine weitere Barriere gegen eine Raupen-Abwanderung dar, andererseits verhindert es (v. a. durch den Maschendraht) destruktive Witterungseinflüsse, wie z. B. Hagel oder Schneedruck, von außen auf die internen Versuchskammern.

Die gesamte Bodenfläche wurde mit einer schwarzen Standard-Gewächshausbodenfolie (Abb. 4) lückendicht abgedeckt. Diese wasserdurchlässige Bodenplane verhindert nicht nur eine Begrünung der Innenkammern, sondern vor allem auch eine unkontrollierte Verpuppung des PPS im Oberboden.

Zum Schutz gegen freigesetzte Raupenbrennhaare (humanmedizinische Bedenklichkeit) wurde das PPS-Haus ausschließlich mit Vollschutzarbeitskleidung betreten, nachdem vorangehend sowohl arbeitsmedizinische Untersuchungen als auch Belehrungen und Einweisungen des im Projekt mitwirkenden Personals stattgefunden hatten. Außenstehenden Personen war der Zutritt nicht gestattet und technisch verwehrt.

Um auszuschließen, dass weitere Räumlichkeiten bzw. Ausrüstungen durch Raupenbrennhaare kontaminiert werden konnten, wurden sämtliche Tätigkeiten, wie beispielsweise das Wiegen, im Inneren des PPS-Hauses durchgeführt (vgl. Abb. 3). Alle hierfür notwendigen Vorrichtungen, Geräte und Arbeitsmittel wurden explizit angeschafft.

2.1.1.2 WEITERES GEWÄCHSHAUS-INVENTAR

Im PPS-Haus wurden zwei Datenlogger angebracht, um die Wetterdaten (Temperatur, Luftfeuchte und Niederschlag) zu messen (Abb. 5). Zwei weitere Datenlogger sind außerhalb des Gewächshauses zur Erhebung der Abweichungen in der Umgebung installiert worden.



Abb. 5: Niederschlagswippe (links) und HOBO-Datenlogger zur Erfassung der Temperatur und Luftfeuchte (rechts).

2.1.2 EIGELEGE-BESCHAFFUNG UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Wie einleitend beschrieben (vgl. 2), sollten im experimentellen Teil des Forschungsprojektes autökologische Daten über den Pinienprozessionsspinner unter den regionalklimatischen Gegebenheiten Südwestdeutschlands gesammelt werden. Der Zielsetzung entsprechend war

vorgesehen, die Entwicklung des Schmetterlings vom Eistadium bis zur Verpuppung in dem dafür errichteten Sicherheits-Gewächshaus (PPS-Haus) mit wissenschaftlichen Methoden zu verfolgen. Das für die Versuchsreihen benötigte Ausgangsmaterial für den Besatz der variabel arrangierten Schwarzkiefer- bzw. Douglasien-Topfpflanzen stellten somit Eigelege dar, die gemeinsam mit dem Kooperationspartner (Università di Padova, DAFNAE; Forstinspektorat Schlanders, Vintschgau) Ende Juli 2015 in südexponierten *Pinus nigra*-Beständen der Öztaler Alpen gesammelt wurden (Abb. 6). Das Material ist in Kühlboxen unverzüglich nach Deutschland überführt worden, wo es bis zum Raupenschlupf bei einer Temperatur von 15 °C konserviert wurde.



Abb. 6: Eigelege an einem Kurztrieb (links) sowie Raupengespinne an vitalitätsgeschwächten Schwarzkiefern (rechts) im Vintschgau (Provinz Bozen, Italien).

Die geplanten Experimente starteten mit dem Besatz von jeweils drei zufällig ausgewählten Pflanzen pro Kammer mit je 25 Raupen des ersten Entwicklungsstadiums (L1) am 14.08.2015 bzw. am 17.08.2015 (Versuchsreihe I bzw. II). Das Design der beiden Versuchsreihen unterschied sich ausschließlich in der räumlichen Anordnung der Pflanztöpfe (konträre Ausrichtung). Insgesamt wurden je 36 Douglasien bzw. Schwarzkiefern, davon jeweils 12 in Mischkonstellation, in die Untersuchungen integriert (vgl. Abb. 1). Während in den Reinbestand-Varianten (Douglasie bzw. Schwarzkiefer) die Entwicklung des Parasiten am jeweiligen Wirt unter den vorherrschenden Bedingungen grundsätzlich beobachtet wurde, kam bei den Mischkonstellationen der Aspekt der Wirtswahl bzw. Wirtspräferenz hinzu. Von Anfang September 2015 bis zur letzten Raupenbeobachtung am 06.06.2016 fanden kontinuierliche Erhebungen zur Aktivität (zeitliche bzw. räumliche Bewegung, Fraß- und

Sozialverhalten, Mortalität) und exemplarische Gewichtsmessungen statt. Die Beobachtungen der wöchentlichen Kontrolltermine wurden protokolliert und in regelmäßigen Abständen fotografisch dokumentiert. Zur präzisen Erfassung der fotoperiodisch abhängigen Fraß- und Bewegungsaktivität der überwiegend nachtaktiven Raupen ist eine digitale 24-Stunden-Spezialkamera (Bushnell NatureView Cam HD Max) beschafft worden. Während die im 14-Tage-Rhythmus durchgeführten Gewichtsmessungen in der Anfangsphase des Monitorings noch mit je fünf repräsentativen Individuen pro Versuchspflanze stattfanden, musste die Methodik aufgrund zunehmender Mortalität im weiteren Verlauf angepasst werden, so dass zum Ende der Raupenentwicklung der verbliebene Gesamtbestand einbezogen wurde.

2.2 ANALYSE UND MODELLIERUNG

Im analytisch-modellierenden Teil wurde ein für Südeuropa entwickeltes Modell der Populationsentwicklung auf seine Verwendbarkeit für Baden-Württemberg geprüft und regionaltypisch angepasst.

Auf der Grundlage einer Literaturlauswertung ergaben sich folgende mathematische Instrumente für die Modellberechnungen (vgl. Robinet et al. 2014):

a) Überlebensrate (S) der Larven (Funktion des mittleren Temperaturminimums [T])

$$S(T) = \frac{1}{1 + \exp. [s(T_c - T)]}$$

- S: Überlebensrate
- T: durchschnittliche Minimumtemperatur (Oktober bis März)
- T_c: kritische Temperatur → S(T_c) = 0,5*
- s: Sensitivitätsparameter*

* Robinet (2006) ermittelte für das Pariser Becken: T_c = 3,3; s = 1. Diese Werte wurden für die Modellierung übernommen.

b) Ausbreitungsrate und Überlebenswahrscheinlichkeit einer Population

Um die Ausbreitungsrate einer fiktiven Initialpopulation in Baden-Württemberg szenarisch abzubilden, wurden die faktischen Monitoringdaten (Pheromonfallen-Falterüberwachung, okulare Gespinnst-Zählung) der zurückliegenden Jahre (2013-2016) aus dem nur 30 km westlich von der deutschen Staatsgrenze entfernten Obernai (Frankreich) herangezogen (Larousse 2016, vgl. Abb. 7).

Eingang in die Analyse fanden die Klimadaten (Tagestemperaturminima, Raster: 1 x 1 km) der Monate Oktober bis März (vgl. Robinet et al. 2014) der Jahre 1981 bis 2013. Alternativ sind auch die Monate September und/oder April (Hypothese einer verlängerten Larvalentwicklung in Mitteleuropa) in die Berechnungen einbezogen worden. Für die Auswertung wurden dabei periodische Kategorien gebildet (1981-1990; 1991-2000; 2001-2006; 2001-2010; 2007-2012).

Das potentielle Gebiet, in welchem das Überleben einer entstehenden Population garantiert wäre, ist aber auch für den Gesamtzeitraum abgebildet. Hinausgehend über die errechneten Durchschnittstemperaturminima der ausgewiesenen Perioden (Überlebensrate der Larven $\geq 0,5$), sind zudem die Ereignisse der absoluten Temperaturminima ($T_{\min} \leq -15 \text{ °C}$) aus den Datensätzen herausgefiltert worden. Diese Temperaturtiefpunkte werden als zusätzlich limitierende Faktoren der winterhalbjährlichen Überlebenswahrscheinlichkeit angesehen. Kategorien wurden ebenso in Bezug auf das wirtsbezogene Habitat anhand der Waldflächenpolygone gebildet. Die vier qualitativen Abstufungen reichen von „sehr gut“ (hoher Anteil der Schwarz-Kiefer) bis „schlecht“ (geringer Anteil an Wirtsbaumarten). Im Wirtsspektrum wurden neben der Schwarz-Kiefer (*Pinus nigra*) auch die Gemeine Kiefer (*P. sylvestris*) und die Douglasie (*Pseudotsuga mensiesii*) berücksichtigt. Die für die retrospektive Modellierung der hypothetischen Ausbreitung ausgewählten Populationsinitialen orientierten sich an den zuvor eruierten Gebieten höchster Überlebenswahrscheinlichkeit. Insgesamt wurden drei modellhafte Verläufe für die Standorte Hockenheim, Offenburg und Weil am Rhein initiiert.

Folgende Software-Programme fanden für die Analyse der Klimadaten sowie anschließenden Berechnungen und räumlichen Darstellungen Anwendung:

- SQLite-Manager (Firefox-Plugin) – Datenmanagement und -administration
- Tinn-R (Version 5.01.02.00) – Entwicklungsumgebung für R
- R version 3.4.0 (2017-04-21) / Platform: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit)
- MS-Access (Version Office 2010)
- QGIS 2.14 (Longterm), 2.16 und 2.18.

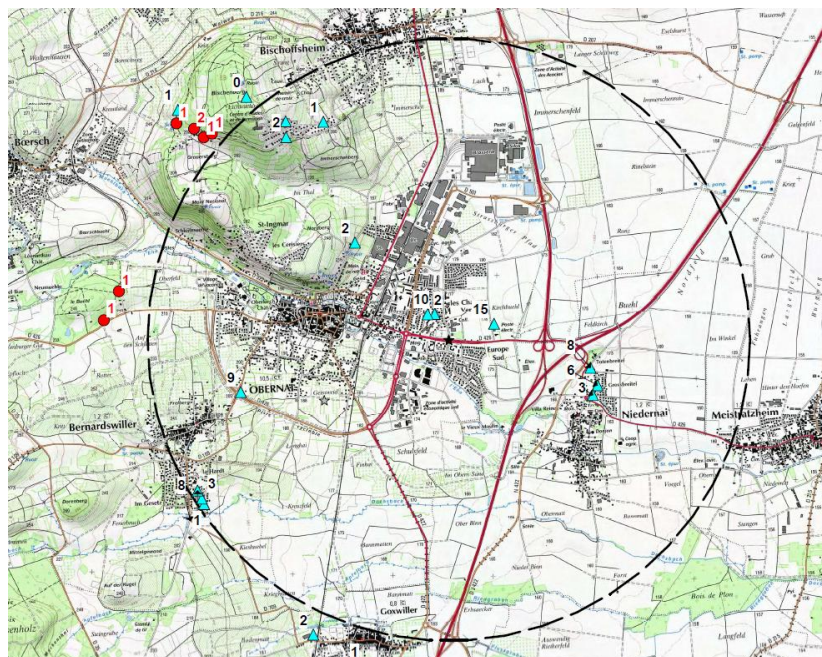


Abb. 7: Beispiel der kartographischen Ergebnisdarstellung aus den Monitoringdaten des Befallsgebietes Obernai (Elsaß-Lothringen). Blaue Markierungen lokalisieren Gespinnstfunde (einschließlich deren Anzahl) für das Jahr 2015, rote Markierungen respektive für das Jahr 2016 inner- bzw. außerhalb eines 3-km-Kreises um den Ursprungsherd; Quelle: Larousse (2016).

3. ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

3.1 EXPERIMENTELLER TEIL

Von Anfang September (Beginn der Erhebungen) bis ca. Mitte Oktober wurde bei nahezu allen Larven eine mehr oder weniger starke Gewichtszunahme, unabhängig von der Baumart (Schwarz-Kiefer bzw. Douglasie), verzeichnet. Dabei förderte die trockene und milde Herbstwitterung des Jahres 2016 (vgl. Abb 8) zunächst die Aktivität. Die Raupen legten reguläre Gespinnste an, wanderten aber auch zum Teil auf benachbarte Bäume ab, wobei es vereinzelt zu spontanen Zusammenschlüssen mit anderen Kolonien kam. Ab etwa Mitte/Ende Oktober stieg jedoch die Raupenmortalität erheblich an. Im Zeitraum der Monate Dezember bis März stellte sich die Aktivität deutlich reduziert dar, weshalb während der wöchentlichen Kontrolltermine kaum noch Raupen vermessen werden konnten. Dennoch kam die für Mitteleuropa außergewöhnlich milde Winterwitterung dem thermophilen Schadorganismus entgegen. Die durch den DWD in Freiburg i. Br. gemessenen Durchschnittstemperaturen lagen von November bis Februar kontinuierlich oberhalb der langjährigen Mittelwerte (vgl. Abb. 8, Tab. 1).

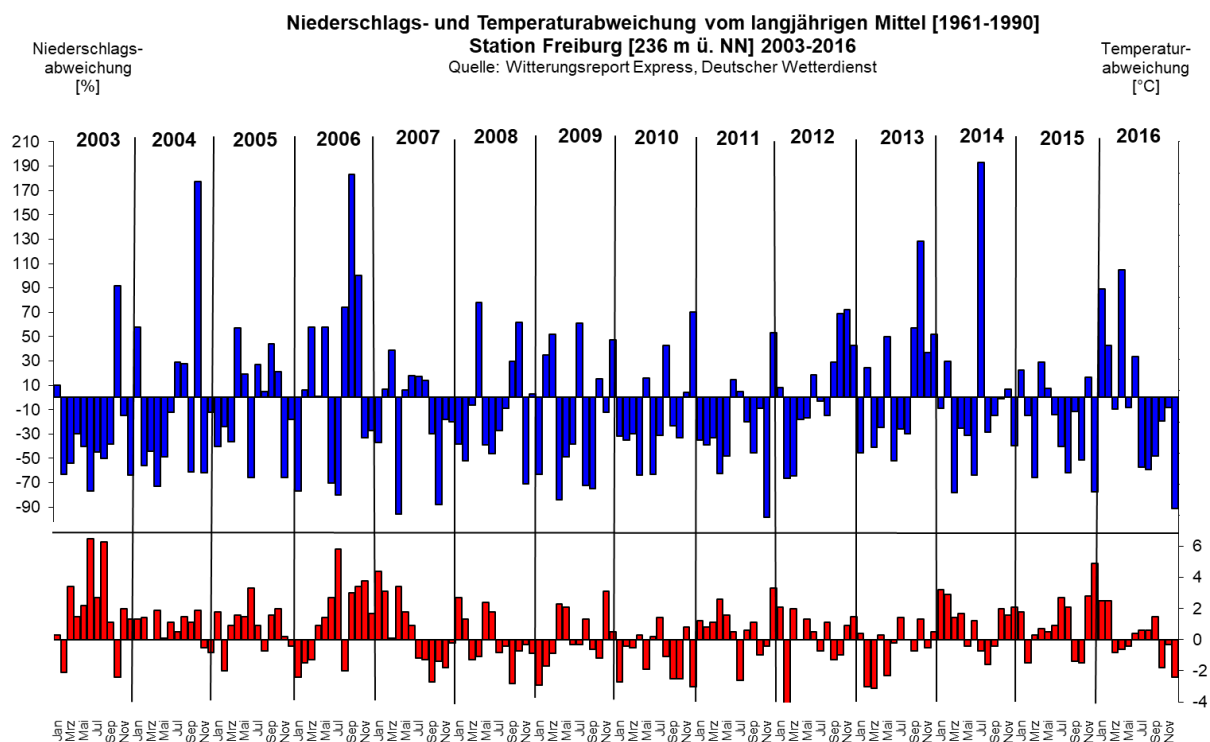


Abb. 8: Niederschlags- und Temperaturabweichungen von 2003 bis 2016 für die DWD-Station Freiburg i. Br.

Tab. 1: Abweichungen der durchschnittlichen Monatstemperaturen vom langjährigen Mittel in Freiburg i. Breisgau [Referenzperiode 1961-1990]

Monat	Temperaturabweichung [°C] vom langjährigen Monatsmittel
November 2015	2,8
Dezember 2015	4,9
Januar 2016	2,5
Februar 2016	2,5

Die mithilfe von Datenloggern sowohl außer- und innerhalb des Sicherheits-Gewächshauses erhobenen Temperatur- und Luftfeuchtwerte zeigten sich insgesamt nur marginal abweichend (vgl. Abb. 9). Lediglich in Phasen rascher Veränderung (z.B. bei deutlichen Tages- und Nachtschwankungen oder Wetterumschwüngen) reagierte das Gewächshausinnere mit einer gewissen Verzögerung. Außerdem wurden Wetterextreme geringfügig gemildert. In den wärmeren Perioden (Herbst 2015 und Frühjahr 2016) sind im Inneren des PPS-Hauses allgemein etwas höhere Temperaturen und geringere Luftfeuchtwerte gemessen worden.

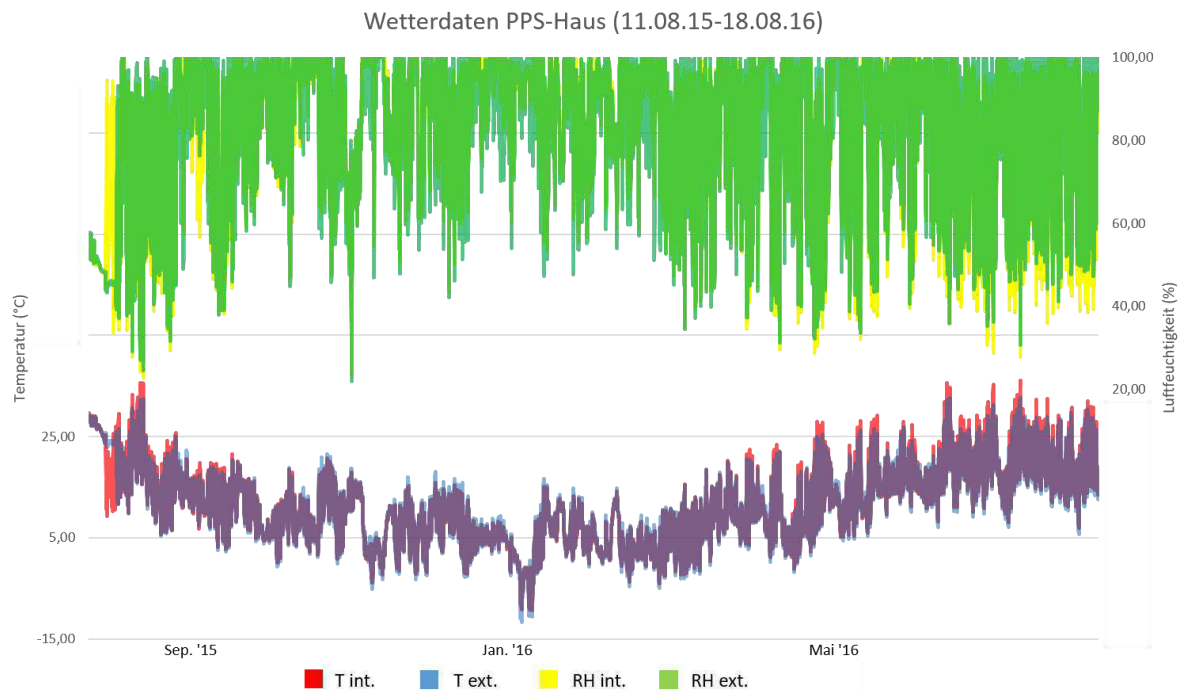


Abb. 9: Gemessene Luftfeuchtigkeit sowie Temperatur (Stundenwerte) inner- und außerhalb des PPS-Hauses über den Untersuchungszeitraum (experimenteller Teil).

Die anfänglich signifikanten Gewichtszunahmen der Raupen (vgl. Tab. 2) verminderten sich mit fortschreitender Abkühlung im Spätherbst/Winter zusehends, bis schließlich eine völlige Stagnation eintrat. Daher sind die während der Winterperiode aufgrund verringerter bzw. fehlender Aktivität gemessenen Stichprobegrößen für repräsentative Auswertungen nicht geeignet. Entgegen den anfänglichen Beobachtungen (vgl. Abb. 10) überlebten keine Raupen die Wintersaison an der Wirtsbauart Douglasie. Bis Mitte Mai wurden noch in zwei von sechs Kammern lebende Raupen festgestellt, danach nur noch in einer einzigen Kammer (vgl. Abb. 11). Am 06.06.2016 sind letztmalig 12 aktive Raupen mit einem durchschnittlichen Gewicht von 459 mg gezählt worden (vgl. Tab. 2), anschließend wurde keine Aktivität mehr registriert. Es wird davon ausgegangen, dass diese bis zum Ende verbliebenen Raupen zu einer Verpuppung in das dafür vorbereitete Bodensubstrat abgewandert sind. Ein Schlupf bzw. Falterflug ließ sich in der Folge jedoch nicht beobachten. Insgesamt betrug die anhand von Kadaverfunden nachgewiesene Mortalität über den gesamten Versuchszeitraum 43,6 % (196 von ursprünglich 450 Besatzlarven). Die sich davon ableitende Differenz (N = 254) setzt sich aus den 12 am Versuchsende noch lebenden und weiteren 242 verschollenen Individuen

zusammen. Die tatsächliche Überlebensrate (S) beläuft sich somit auf lediglich 0,27 (2,7 %). Der Grenzwert (minimale Überlebensrate) für eine gesicherte Population beträgt hingegen nach Robinet et al. (2014) 0,5 (50 %).



Abb. 10: Photographische Dokumentation der experimentellen Studien (Auswahl) zu verschiedenen Kontrollterminen an Versuchspflanzen der Baumart Schwarz-Kiefer (oben) sowie Douglasie (unten).

Tab. 2: Gemessene Raupengewichte zu ausgewählten Kontrollterminen in den Experimentierkammern des PPS-Gewächshauses.

Messtermin [Datum]	Anzahl gewogener Raupen	Mittleres Gewicht [mg]	Zunahme-Faktor
02.09.2015	85	2,6	
15.09.2015	80	6,4	2,5
26.10.2015	36	18,7	7,2
10.11.2015	54	23	8,8
08.12.2015	6	30,4	11,7
05.01.2016	3	22,8	8,8
16.02.2016	3	31,7	12,2
07.03.2016	6	42,7	16,4
14.04.2016	2	84,5	32,5
12.05.2016	5	331,4	127,5
06.06.2016	12	459,4	176,7



22.02.16

27.04.16

11.03.16

09.06.16

Abb. 11: Fotografische Dokumentation (Fortsetzung zu Abb. 10) der experimentellen Studien (Auswahl) zu verschiedenen Kontrollterminen an Versuchspflanzen der Baumart Schwarz-Kiefer bis zum Ende der Versuchslaufzeit.

3.2 ANALYSE UND MODELLIERUNG

Wird die unter 2.2 (a) aufgeführte Funktion zur Berechnung der Überwahrscheinlichkeit der Larven auf der Grundlage der von Robinet et al. (2014) verwendeten Parameter ($\bar{T}_{\min [\text{Winter}]}$; Monate Okt. - März) anhand der regionalklimatischen Daten für Baden-Württemberg im Zeitraum von 1981 bis 2010 angewandt, so ergeben sich keine Werte für die Überlebensrate, die den Anspruch $S \geq 0,5$ erfüllen. Demnach erscheint bis in die jüngste Vergangenheit hinein unwahrscheinlich, dass eine natürliche Zuwanderung oder erfolgreiche Etablierung sowie Ausbreitung von *T. pityocampa* unter den bislang vorherrschenden Klimabedingungen in Südwestdeutschland hätte stattfinden können (vgl. Abb. 12). Lediglich in der bisher wärmsten Dekade 1991 bis 2000 näherten sich die klimatischen Verhältnisse dem das Überleben der Larven garantierenden Mittelwert in einem Gebiet um Offenburg (mittlere Oberrheinebene der geographischen Breite wie Obernai) an. Die nachfolgende Periode (2001-2010) stellte sich, insbesondere in der zweiten Hälfte, jedoch wieder deutlich unwirtlicher für den PPS dar (vgl. Abb. 13).

Da ein Zugriff auf die für eine prospektive Modellerstellung benötigten Daten in Anlehnung an die durch den IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) veröffentlichten RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) bis zum Projektabschluss nicht möglich war, wurde die Annahme eines klimawandelbedingten Temperaturanstiegs durch eine Ausdehnung der winterlichen Referenzperiode simuliert. Hierfür sind zusätzlich die Klimadaten des dem Winterhalbjahr vorangehenden und/oder nachfolgenden Monats (September bzw. April) in die Berechnungen eingeflossen. Daraus ergibt sich ein wärmeres Winterklima, welches anstelle einer RCP-basierten Temperaturerhöhung verwendet wurde. Unter Einbeziehung nur eines weiteren Monats (z. B. Klimadaten von Sept.-März) wird ein mittleres Winterklima erzeugt, das ein Überleben des Pinienprozessionsspinners über den betrachteten Gesamtzeitraum (1981-2010) in Teilbereichen der mittleren bis nördlichen Oberrheinebene ermöglicht. Die sich im Vergleich mit der Periode Oktober bis März bereits abzeichnenden Schwankungen innerhalb des 30-Jahre-Zeitraumes, wonach die 90-er Jahre am wärmsten und die anschließende Dekade wieder markant kühler ausfielen, treten auch hier deutlich hervor (vgl. Abb. 14).

Einschränkungen im Hinblick auf eine mögliche Populationsentfaltung ergeben sich ebenfalls aufgrund des Wirtsangebotes. Von den zunächst aufgestellten vier Qualitätsabstufungen (vgl. 2.2), die von „sehr gut (hoher Anteil der Schwarzkiefer)“ bis „schlecht (geringer Anteil an Wirtsbaumarten)“ reichten, erwiesen sich nach erfolgter Analyse der Forsteinrichtungsdaten (Baumarten-Flächenanteile) in Verbindung mit den eruierten Ausbreitungsparametern des PPS-Referenzvorkommens Obernai lediglich die nachfolgend aufgeführten Varianten 3 und 4 (mäßiges bzw. schlechtes Wirtsangebot) als modellkompatibel.

Variante 3a: Hauptbestand: Schwarzkiefer $\geq 10\%$; Nebenbestände 2+3: Schwarzkiefer und/oder Douglasie $\geq 30\%$

Variante 4b: Hauptbestand: Schwarzkiefer $\geq 10\%$; Nebenbestände 2+3: Gemeine Kiefer und/oder Douglasie $\geq 10\%$

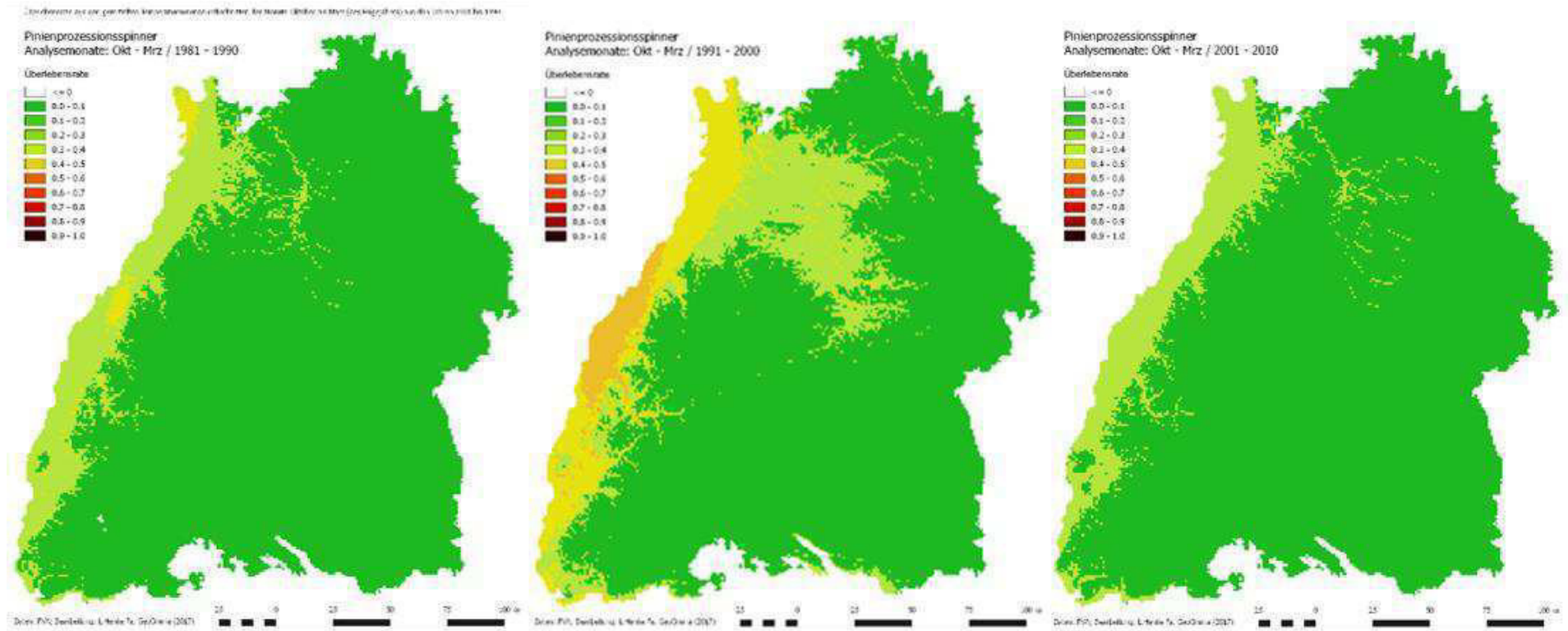


Abb. 12: Für Baden-Württemberg hypothetisch errechnete Überlebensrate (retrospektiv) für die Larven des Pinienprozessionsspinners in der Winterperiode (Okt.-März) nach Robinet et al. (2014). Für $S \geq 0,5$ gilt eine Population als gesichert.

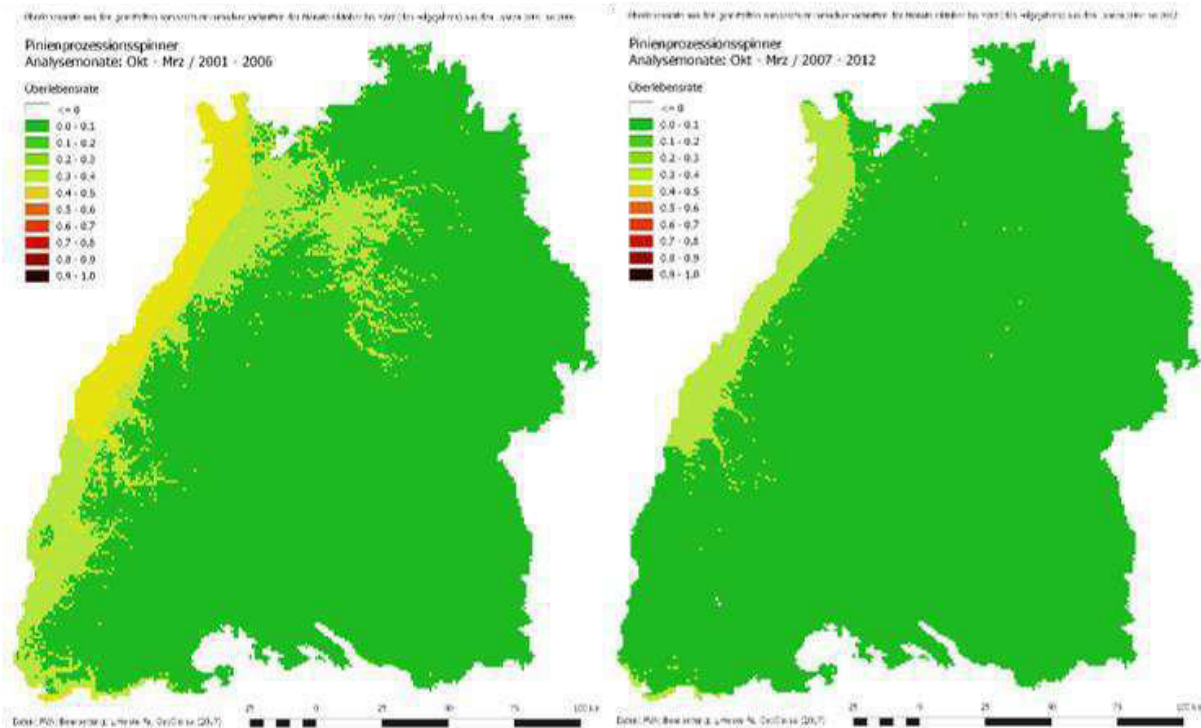


Abb. 13: Für Baden-Württemberg hypothetisch errechnete Überlebensrate (retrospektiv) für die Larven des Pinienprozessionsspinner in der Winterperiode (Okt.-März) der Jahre 2001-2006 (links) bzw. 2007-2012 nach Robinet et al. (2014). Für $S \geq 0,5$ gilt eine Population als gesichert.

Alle anderen Konstellationen (mit generell höherem Schwarzkiefer-Anteil) ergaben eine im Hinblick auf die „Brücken- bzw. Trittstein-Funktion“ zu geringe Flächenabdeckung in Baden-Württemberg. Eine Modellierung der Ausbreitung war somit nicht möglich. Im Vergleich der beiden verwendeten Varianten 3 und 4 („mäßiges“ bzw. „schlechtes“ Wirtsangebot) ergibt sich allerdings ein scheinbar konträres Qualitätsgefälle. Danach wäre die Ausbreitung des PPS bei „schlechtem“ Wirtsangebot am größten. Dieser Modellverlauf begründet sich darin, dass die Bedingungen für ein „schlechtes“ Wirtsangebot (geringerer Anteil möglicher Wirte) häufiger und auf insgesamt größerer Fläche erfüllt sind, wenngleich sich daraus grundsätzlich auch weitere Abstände zwischen den Nahrungsressourcen ergeben. Soweit jedoch potentielle Nahrungsquellen im Rahmen der Flugdistanzen weiblicher Falter verfügbar sind, ist eine durch die Wirtsbaumsuche stimulierte Aufwandsaktivierung und somit forcierte Ausbreitung vorstellbar. Ob jedoch Nebenwirte wie die Douglasie oder Gemeine Kiefer die präferierten Wirtsarten wie die Schwarzkiefer vollständig qualitativ kompensieren können, ist bislang nicht geklärt. Eine uneingeschränkte Kompensation würde neben der vollständigen Entwicklung auch eine vergleichbare Gesundheit und Fertilität (Fitness) einschließen. Die insbesondere mortalitätsbedingt unzureichend repräsentativen Ergebnisse der Gewächshaus-Versuche (experimenteller Teil) lassen eher Gegenteiliges vermuten.

Eine wichtige Eingangsgröße für das Populationsmodell ist auch die Geschwindigkeit (mittlere Ausbreitung/Jahr). Basierend auf den Monitoringdaten des Befallsherdes Obernai (vgl. 2.2) ist die mittlere Ausbreitung < 1 km/Jahr. Eine Schwachstelle dieser Datengrundlage ist wiederum die Repräsentativität. Während die räumliche Nähe und das damit ähnliche Regionalklima für

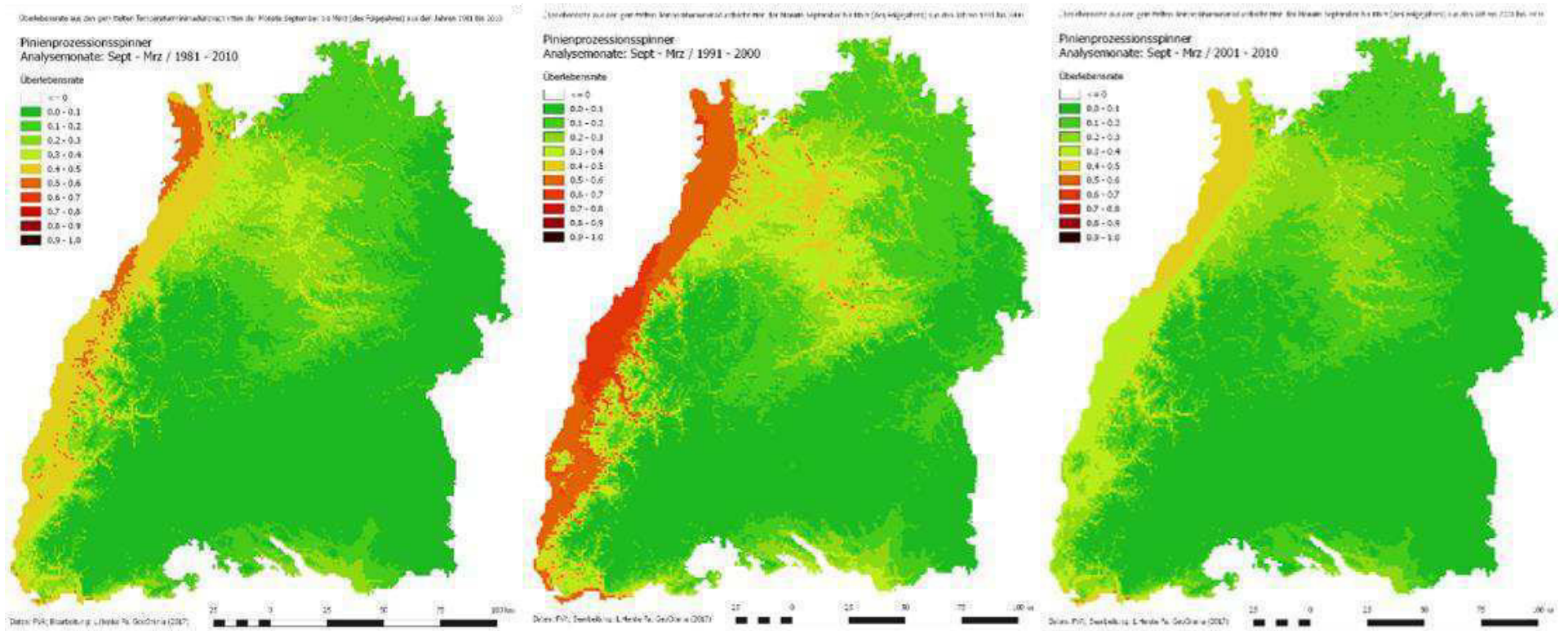


Abb. 14: Für Baden-Württemberg hypothetisch errechnete Überlebensrate (retrospektiv) für die Larven des Pinienprozessionsspinner in der Winterperiode nach Robinet et al. (2014) mit erweiterter Datengrundlage (Sept. + Okt.-März) zur Veranschaulichung einer möglichen Erwärmung. Für $S \geq 0,5$ gilt eine Population als gesichert.

eine gute Vergleichbarkeit sprechen, ergeben sich Einschränkungen hinsichtlich der geringen Datengrundlage (bisheriger Erhebungszeitraum) sowie der Tatsache, dass sich die Population von ihrem Ursprungsort (städtische Verkehrsinsel) bislang überwiegend im Bereich urbaner Infrastruktur ausgebreitet hat. Die Verwendung von 1 km Ausbreitung pro Jahr erbrachte in Baden-Württemberg für die Initiale „Weil am Rhein“ keine Ergebnisse und zeigte auch für die Beispiele „Offenburg“ bzw. „Hockenheim“ nach wenigen (3 bzw. max. 5) Jahren einen asymptotischen Verlauf für alle Wirtsbaumkonstellationen. Lediglich in der Variante 4b (vgl. oben) endete die vom Standort Hockenheim aus simulierte Ausbreitung erst nach 11 Jahren. Für den Fall, dass sich insbesondere klimawandelbedingt (Vergrößerung der Flugdistanzen durch Temperaturanstieg, vgl. Roques et al. 2015) die Ausbreitungsgeschwindigkeit erhöht, wurde das Populationsmodell auch für eine Ausbreitung von durchschnittlich 3 km/Jahr gerechnet (vgl. Abb. 15). Hierbei zeigte sich für den Standort Hockenheim (Variante 4b) eine vor allem südwärts gerichtete, aber streng auf den Naturraum Oberrheinebene begrenzte Ausbreitung über einen Zeitraum von 24 Jahren. Für den Standort Offenburg ergab sich wirtsbedingt (Variante 4b) eine im Vergleich geringe Ausbreitung von insgesamt sieben Jahren (vgl. Abb. 15). Die vorgestellten Szenarien sind exemplarisch, weshalb ähnliche Verläufe ebenso für andere Initialorte unter vergleichbaren Gegebenheiten zu erwarten sind. Erinnert sei daran, dass dieser Modellierung jedoch eine Klimaerwärmung (Erhöhung der winterlichen Temperaturminima) und eine gegenüber den Referenzdaten (Obernai) forcierte Ausbreitung zugrunde gelegt sind. Dagegen ist das einbezogene Wirtsspektrum gegenwärtig in Baden-Württemberg präsent.

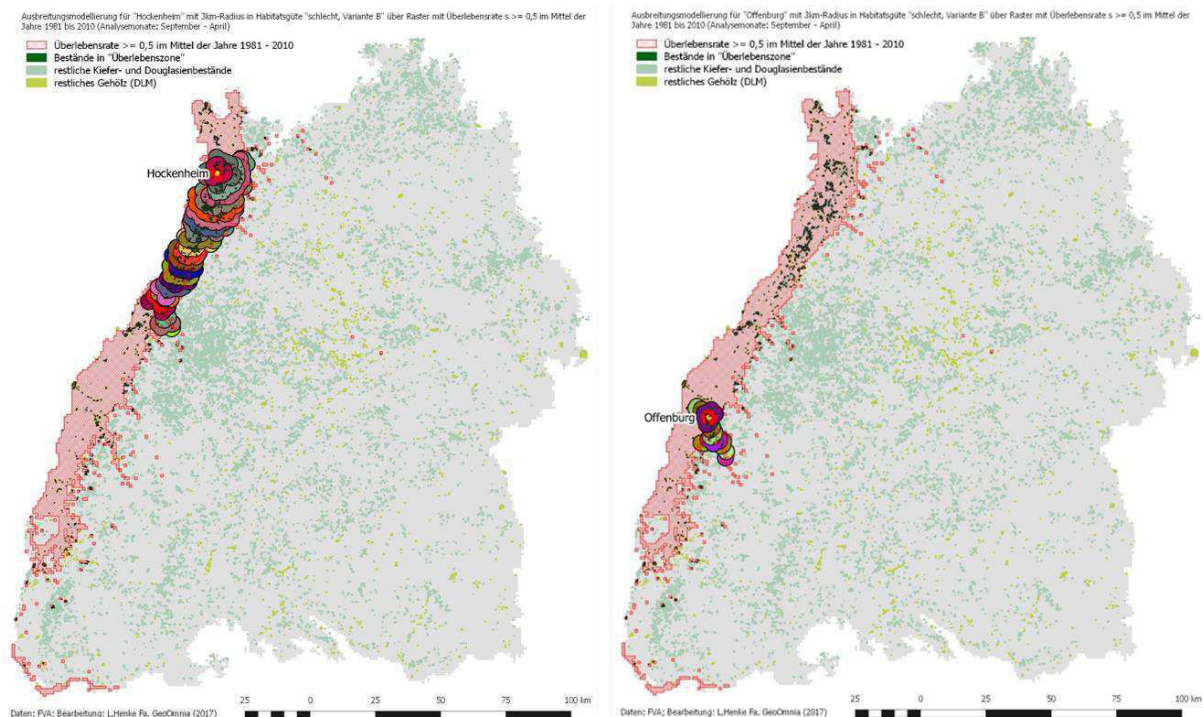


Abb. 15: Exemplarisch simulierte Ausbreitung des Pinienprozessionsspinners in Baden-Württemberg für die Standorte Hockenheim (links) bzw. Offenburg (rechts) unter folgenden Voraussetzungen: a) einer populationssichernden Überlebensrate, b) einer jährlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit von 3 km sowie c) dem für die Variante 4b definierten Wirtsangebot.

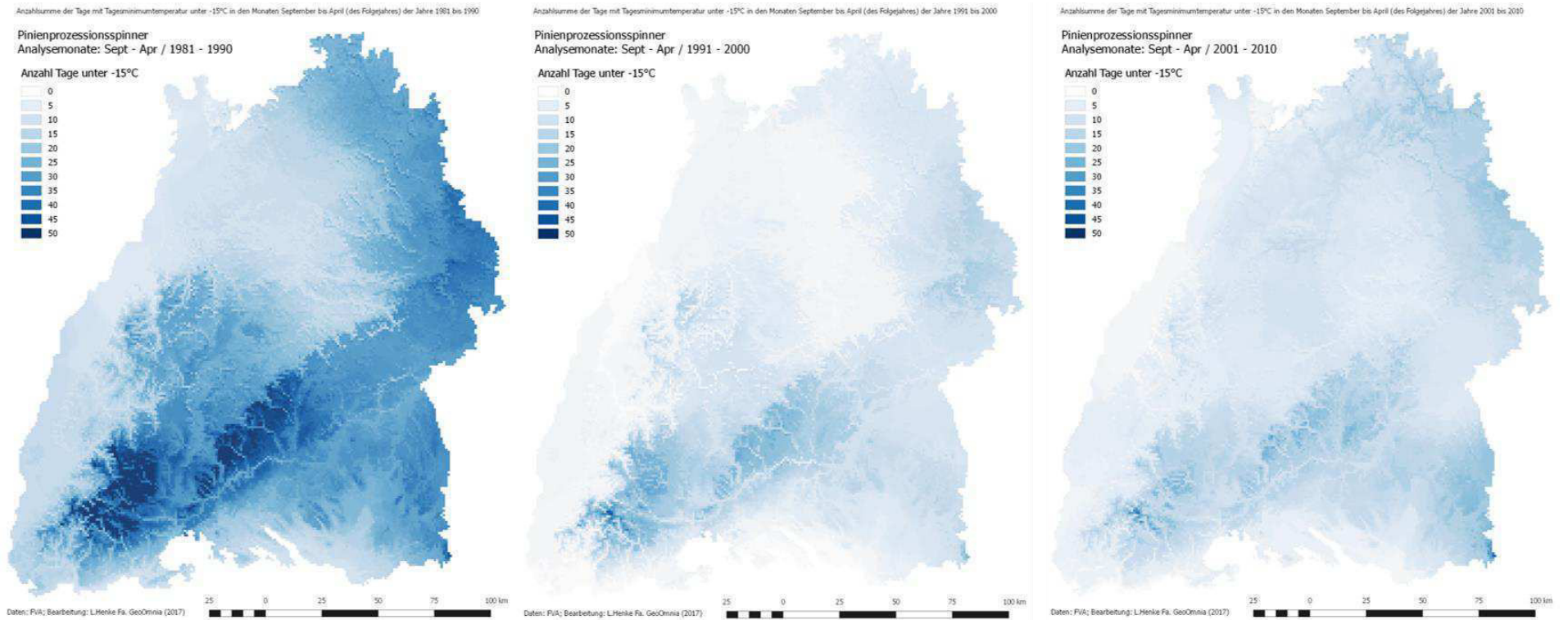


Abb. 16: Absolute Temperaturminima ($\leq -15^{\circ}\text{C}$) Für Baden-Württemberg hypothetisch errechnete Überlebensrate (S) für die Larven des Pinienprozessionsspinners in der Winterperiode (Sept.-März) nach Robinet et al. (2014). Für $S \geq 0,5$ gilt eine Population als gesichert.

Da sich neben den durchschnittlichen Temperaturminima der Winterperiode (Grundlage der Überlebensrate im südeuropäischen Modell, vgl. Robinet et al. 2014) in Mitteleuropa zudem die zwar abnehmend, aber dennoch stetig auftretenden Temperaturextreme (absolute Minima) limitierend auf die Überlebenswahrscheinlichkeit und die Entwicklung einer Population auswirken können, wurde der Datenfundus (1981-2010) nach Ereignissen mit $T_{\min(\text{absolut})} \leq -15 \text{ °C}$ in Baden-Württemberg gefiltert. Aktuell und unter Berücksichtigung der wie vorangehend simulierten Temperaturerhöhung für die zukünftige Winterperiode wirken sich diese Extreme allerdings noch nicht zusätzlich begrenzend auf das hypothetische Potenzial des PinienprozeSSIONSSPINNERS in Südwestdeutschland aus (vgl. Abb. 16). Andererseits zeigen die periodisch abgestuften Darstellungen nochmals die schon in den Abbildungen 8 bis 10 deutlich gewordenen klimatischen Schwankungen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der unter freilandähnlichen Bedingungen durchgeführten Versuche und regionalklimatisch angepassten Modellierungen derzeit dem PinienprozeSSIONSSPINNER in Baden-Württemberg noch kein bedrohliches Potenzial für eine natürliche Migration, Etablierung und Ausbreitung bescheinigen. Eine weitere Temperaturerhöhung, insbesondere in der für das Überleben der Larven wichtigen Winterperiode, kann jedoch bei mindestens gleichbleibend gutem Wirtsangebot dazu führen, dass der Schadorganismus z. B. nach Einschleppung in Teilen der mittleren und nördlichen Oberrheinebene für mehrere Jahre überlebt oder sich sogar dauerhaft etabliert. Unter der Annahme, dass sich mit fortschreitenden Klimaerwärmung längerfristig auch das Repertoire der Baumarten in Mitteleuropa verändert, kann sich eine Risikopotenzierung des Weiteren aufgrund eines verbesserten Nahrungsangebots ergeben.

4. LITERATURVERZEICHNIS

Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., & Larsson, S. (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological applications*, 15 (6), 2084-2096.

Halbig, P.; Delb, H.; Henke, L.; Wagenhoff, E.; Klimetzek, D. (2012): Monitoring und Gefahrenanalyse des Pinienprozessionsspinner, *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff. 1775) (Lep. Notodontidae), für die Oberrheinebene. In: Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent. 18, S. 405–408.

Larousse, T. (2016): Compte-rendu de la tournée du 6 avril 2016. Prospection sur le front de la processionnaire du pin autour du foyer d'Obernai. Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt Service régional de l'alimentation Pôle interrégional de la santé des forêts du Nord-Est.

Robinet, C., Rousselet, J. & Roques, A. (2014). Potential spread of the pine processionary moth in France: preliminary results from a simulation model and future challenges. *Annals of Forest Science* 71: 149-160.

Robinet, C., Imbert, C. E., Rousselet, J., Sauvard, D., Garcia, J., Goussard, F., & Roques, A. (2012). Human-mediated long-distance jumps of the pine processionary moth in Europe. *Biological invasions*, 14(8), 1557-1569.

Robinet, C. (2006). Mathematical modelling of invasion processes in ecology: the pine processionary moth as a case study. PhD thesis, EHESS, Paris (in French with English summary). <http://prodinra.inra.fr/#ConsultNotice:16521>. Accessed 05 October 2012.

Roques, A., Boivin, S. and Auger-Rozenberg, M. A. (2002): Douglas-fir vs. Lodgepole pine in Europe: colonization of exotic conifer species by native phytophagous insects depends on taxonomic isolation. Pacific Temperate Conifers International Symposium, IUFRO Working Parties S2.02.05 and S2.01.06. Orle'ans, France, 27–30 May 2002.

Roques, A. (2010): Review of present and potential insect pests affecting Douglas-fir in Europe in a context of global change. In: Kohnle, U., Makkonen-Spiecker, K., Spiecker, H., Teuffel, K. (eds.) (2010): Opportunities and risks for Douglas fir in a changing climate. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung Heft* 85, 65 p.

Roques, A. (Ed.). (2015). *Processionary Moths and Climate Change: An Update*. Springer Netherlands

Richtlinie 2000/29/EG des Rates vom 8. Mai 2000 über Maßnahmen zum Schutz der Gemeinschaft gegen die Einschleppung und Ausbreitung von Schadorganismen der Pflanzen und Pflanzenerzeugnisse. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 169/1, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:169:0001:0112:DE:PDF>.

Vega, J., Vega, J. M., & Moneo, I. (2011). Skin reactions on exposure to the pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa*). *Actas Dermo-Sifiliográficas (English Edition)*, 102 (9), 658-667.

