

Evaluierung des kombinierten Modells PHENIPS-TDEF im Wildnisgebiet Dürrenstein, Österreich

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

eingereicht von

Maria von Rochow

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr. Sigrid Netherer

Priv.-Doz. Dr.phil. Christa Schafellner

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Helmut Schume

Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie
und Forstschutz (IFFF) und Institut für Waldökologie (IFE)

Studium der Forstwissenschaften, Wien 2020

Evaluation of the combined model PHENIPS-TDEF in the wilderness area Dürrenstein, Austria

Abstract

In the wilderness area Dürrenstein in Lower Austria, the models PHENIPS and TDEF were evaluated in two spruce stands from end of May to beginning of September 2018.

PHENIPS is a temperature-based phenology model to predict the onset of spring swarming, brood development, and the potential number of generations of the spruce bark beetle *Ips typographus*. Bark beetle phenology predicted by PHENIPS was compared with the observed swarming activities and beetle development in the field. The hydrological model TDEF allows the simulation of seasonal variations in volumetric soil water content (SWC) and the calculation of deficits in the water supply (transpiration deficit, TDEF) of the stand. Based on field survey data (stand and soil parameters) and the forest inventory dataset (Operat) of the Austrian Federal Forests, soil water content and transpiration deficit were modelled based on different parameter constellations (soil depth, stone content). The simulated and observed data were used to evaluate the bark beetle infestation risk for the selected spruce stands.

In order to monitor bark beetle flight activities, five automatic pheromone traps were set up at different elevation levels. The progress of offspring development was monitored with trap trees at both sites. The modelled and observed times of increased swarming activities of *I. typographus* corresponded very well. The development of the broods from egg to adult beetle of the first and second generation and sister brood simulated by PHENIPS correlated well with brood development in the trap trees. The number of antagonist beetles was remarkably high, in particular the ant beetle *Thanasimus formicarius*.

Every two weeks, soil water content was measured with Time Domain Reflectometry (TDR) at both sites. Soil depth was determined at several points per stand with hammer drills and interpretations from uprooted trees. The stone content was evaluated from soil pits. Soil texture was determined with finger test in the field and particle size analysis in the laboratory. Input parameters for TDEF depending on soil texture (e.g. saturation and residual water content) were calculated with pedo-transfer functions. Stand parameters (e.g. canopy height) were determined by angle count sampling, leaf area index was assessed by hemispheric photography. The forest stands showed high heterogeneity with respect to soil characteristics.

Modelled seasonal variations in soil water content based on particle size analysis corresponded well with soil water contents recorded in the field or were a bit lower. Because of the TDR method, measurements were done at points with high soil depths and low stone content. While soil texture class 'clay' was classified correctly in the forest inventory dataset (site I), the assumption of a sandy texture (site II) resulted in very low soil water contents predicted by TDEF. As a result, transpiration deficits were predicted to occur from May to August 2018 for stand II but not for stand I.

An increased risk of bark beetle infestations in the study area due to temporal coincidence of bark beetle swarming and spruce drought stress could be excluded despite of the high summer temperatures in 2018. Nonetheless, the variability of the simulation results demonstrated that microsites of good water supply and drought stress may occur in close proximity.

Linking a phenology model and a water balance model can improve the evaluation of bark beetle infestation risks also in alpine areas, where soil conditions may be extreme. PHENIPS-TDEF is a useful tool for monitoring bark beetle development and drought stress of spruce forests and can help foresters to plan prophylactic measures against mass outbreaks of *I. typographus*.

Evaluierung des kombinierten Modells PHENIPS-TDEF im Wildnisgebiet Dürrenstein, Österreich

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Modelle PHENIPS und TDEF in zwei Fichtenbeständen im Wildnisgebiet Dürrenstein in Niederösterreich über den Untersuchungszeitraum Ende Mai bis Anfang September 2018 evaluiert.

PHENIPS ist ein temperaturbasiertes Phänologiemodell zur Vorhersage des jährlichen Schwärmbeginns, der Entwicklungsstadien und der möglichen Anzahl an Generationen des Buchdruckers, *Ips typographus*. Die prognostizierten Ereignisse wurden mit den tatsächlichen Schwärmaktivitäten und der Borkenkäferentwicklung im Untersuchungsgebiet verglichen. Das Wasserbilanzmodell TDEF ermöglicht die Simulation von saisonalen Veränderungen im volumetrischen Bodenwassergehalt (SWC) und von Defiziten in der Wasserversorgung des Bestandes (Transpirationsdefizit, TDEF). Basierend auf Erhebungsdaten auf den Versuchsflächen (Bestandes- und Bodenparameter) und Angaben aus dem Operat der Österreichischen Bundesforste wurden Bodenwassergehalte und Transpirationsdefizite modelliert und Simulationen mit unterschiedlichen Parameterkonstellationen (Durchwurzelungstiefe, Skelettanteil) verglichen. Anhand der modellierten und beobachteten Ergebnisse erfolgte eine Einschätzung der Buchdrucker-Befallsgefährdung der untersuchten Fichtenbestände.

Zur Überwachung der Schwärmzeiten des Buchdruckers wurden fünf automatisierte Pheromonfallen auf unterschiedlichen Höhenstufen installiert. Der Entwicklungsfortschritt der Brut wurde in beiden Beständen anhand von Fangbäumen dokumentiert. Aktuelle und prognostizierte Phasen erhöhter Schwärmaktivität stimmten sehr gut überein. Der modellierte Entwicklungsfortschritt vom Eistadium bis zum fertig entwickelten Käfer der ersten und zweiten Generation bzw. Geschwisterbrut entsprach der tatsächlichen Brutentwicklung in den Fangbäumen. Die Anzahl an Antagonisten des Buchdruckers in den Fallen war auffallend hoch, insbesondere die des Ameisenbuntkäfers *Thanasimus formicarius*.

Die Bodenwassergehalte wurden mittels Time Domain Reflectometry (TDR-Messfühlern) in beiden Beständen zweiwöchentlich gemessen. Die Gründigkeit des Bodens wurde an mehreren Punkten pro Bestand anhand von Schlagbohrerproben und an Wurzeltellern ermittelt. Der Skelettanteil des Bodens wurde anhand von Profilgrabungen bestimmt. Die Bodenart wurde mittels Fingerprobe im Gelände und mittels Korngrößenanalyse im Labor ermittelt. Die für TDEF notwendigen, von der Bodenart abhängigen Eingangsparameter (etwa Sättigungs- oder Restwassergehalte) wurden über Pedotransferfunktionen berechnet. Bestandesparameter (wie die Bestandeshöhe) wurden mittels Winkelzählprobe, der Blattflächenindex mit Hilfe von hemisphärischer Fotografie ermittelt. Die Standorte waren in Bezug auf Bodencharakteristika sehr heterogen.

Modellierte saisonale Veränderungen im Bodenwassergehalt auf Basis der Korngrößenanalyse entsprachen in etwa den im Bestand gemessenen oder lagen etwas darunter. Die Messungen wurden aufgrund der Messmethode auf eher tiefgründigen und skelettarmen Kleinstandorten durchgeführt. Während die für Bestand I modellierten Werte für die Bodenart Ton aus den Operatsdaten den tatsächlich gemessenen entsprachen, führte die TDEF Modellierung bei Annahme der Bodenart Sand für Bestand II zu sehr geringen Bodenwassergehalten. Infolgedessen wurden Transpirationsdefizite von Mai bis August 2018 für Bestand II simuliert, für Bestand I hingegen nicht.

Eine erhöhte Befallsgefährdung der Bestände aufgrund von zeitlicher Koinzidenz von Schwärmperioden mit dem Auftreten von Trockenstress der Fichten konnte im Untersuchungsgebiet trotz hoher Temperaturen im Sommer 2018 ausgeschlossen werden. Die Variabilität der Simulationsergebnisse zeigte aber, dass sowohl gute Wasserversorgung als auch Trockenstress der Bäume in direkter Nachbarschaft möglich sind. Die Verknüpfung eines Phänologie-Modells mit einem

Wasserbilanzmodell kann die Einschätzung des Befallsrisikos auch im alpinen Raum verbessern, wo extreme Bodenverhältnisse vorherrschen. PHENIPS-TDEF stellt ein hilfreiches Instrument für das Monitoring von Borkenkäferentwicklung und Trockenstress von Fichten dar und erlaubt es Forstleuten, vorbeugend Maßnahmen gegen Massenvermehrungen des Buchdruckers zu ergreifen.

Inhalt

1. Einleitung und Zielsetzung.....	7
1.1 Grundlagen	7
1.2 Biologie des Buchdruckers, <i>Ips typographus</i>	11
1.2 Die Prognose-Modelle PHENIPS und TDEF.....	12
1.2.1 Das Phänologie-Modell PHENIPS.....	12
1.2.2 Simulation von Transpirationsdefiziten mittels TDEF	15
1.2.3 Das duale Borkenkäfer-Phänologie/Wasserbilanzmodell PHENIPS-TDEF.....	16
1.3 Fragestellung der Arbeit	18
2. Material und Methoden	19
2.1 Untersuchungszeitraum und Überblick.....	19
2.2 Untersuchungsgebiet	19
2.2.1 Wildnisgebiet Dürrenstein	19
2.2.2 Untersuchungsstandorte.....	21
2.3 Modellberechnungen (PHENIPS und TDEF)	26
2.4 Bestandesparameter	28
2.4.1 Bestandeshöhe	28
2.4.2 Blattflächenindex (LAI)	29
2.4.3 Bestandesparameter aus dem Operat	31
2.5 Klimadaten.....	32
2.6 Bodenparameter	33
2.6.1 Bodencharakteristika vor Ort	33
2.6.2 Bodenphysikalische Parameter aus Bodenproben und Korngrößenanalyse	34
2.6.3 Bodenphysikalische Parameter aus dem Operat	34
2.6.4 Periodisch gemessene volumetrische Bodenwassergehalte	37
2.7 Monitoring des Schwärmflugs und der Entwicklung von <i>Ips typographus</i>	37
2.7.1 Automatische Pheromonfallen	37
2.7.2 Fangbaumkontrollen	38
3. Ergebnisse.....	39
3.1 Bestandesparameter	39
3.1.1 Winkelzählproben im Vergleich mit Operatsdaten	39
3.1.2 Blattflächenindex (LAI)	40
3.2 Bodenparameter	41
3.2.1 Standortsaufnahmen mit Profilansprache und Operatsdaten.....	41

3.2.2 Bodenphysikalische Parameter entsprechend der Korngrößenanalyse und abgeleitet von den Beschreibungen im Operat.....	44
3.3 Modellierung von SWC und TDEF.....	47
3.3.1 Klimadaten	50
3.3.2 Volumetrische Bodenwassergehalte.....	51
3.3.3 Vergleich gemessener und simulierter Bodenwassergehalte (SWC)	52
3.3.4 Vergleich gemessener und simulierter Bodenwassergehalte (SWC) unter Berücksichtigung verschiedener Eingangswerte	53
3.3.5 Unterschiede zwischen simulierten Transpirationsdefiziten (TDEF).....	55
3.4 Monitoring der Schwärmperioden von <i>Ips typographus</i>	57
3.4.1 Fallenfänge und Temperaturverlauf	57
3.4.2 Fallenfänge und Simulation der Buchdrucker-Phänologie mittels PHENIPS.....	59
3.4.3 Borkenkäferentwicklung in den Fangbäumen im Vergleich zum prognostizierten Entwicklungsverlauf durch PHENIPS	61
3.4.4 Beifänge.....	63
4. Diskussion.....	64
4.1 Situation im Untersuchungsgebiet.....	64
4.2 Modellierung von SWC und TDEF.....	65
4.2.1 Vergleich gemessener und simulierter Bodenwassergehalte (SWC) unter Berücksichtigung verschiedener Eingangswerte	66
4.2.2 Modellierung von Transpirationsdefiziten	67
4.5 Anwendung des Modells TDEF im Untersuchungsgebiet	67
4.6 Fallenfänge und Borkenkäferentwicklung im Vergleich zur Simulation der Buchdrucker-Phänologie mittels PHENIPS.....	68
4.7 Beifänge.....	70
4.8 Einschätzung der Buchdrucker-Befallsgefährdung	71
4.9 Schlussfolgerungen.....	72
Literaturverzeichnis	74
Abbildungsverzeichnis.....	81
Tabellenverzeichnis	84
Danksagung	86
Eidesstattliche Erklärung.....	87

1. Einleitung und Zielsetzung

PHENIPS - eine Kombination der Begriffe „Phänologie“ und „Ips“- ist ein Modell für die Vorhersage des jährlichen Schwärmbeginns, der Entwicklungsrate und der möglichen Anzahl an Generationen des Buchdruckers, *Ips typographus*, Europas wichtigster Borkenkäferart. PHENIPS wird mit einem hydrologischen Modell (TDEF) kombiniert, das entwickelt wurde um Transpirationsdefizite der Wirtsbaumart, der Gemeinen Fichte (*Picea abies*) zu simulieren, da Trockenstress die Disposition für Buchdruckerbefall erhöht.

Diese Masterarbeit soll die Modelle PHENIPS und TDEF evaluieren. TDEF wurde für zwei Bestände im Wildnisgebiet Dürrenstein angewendet, einerseits auf Basis eigener erhobener Boden- und Bestandesdaten, andererseits auf Basis von Daten, die aus dem Operat der Bundesforste (ÖBf AG) für die jeweiligen Standorte abgeleitet wurden. Diese Simulationsergebnisse der Transpirationsdefizite wurden einander gegenübergestellt, ebenso wie die modellierten Bodenfeuchtwerte mit den Ergebnissen eigener Messungen. Die von PHENIPS simulierten Schwärmphasen wurden mit Fallenfängen verglichen, sowie der modellierte Entwicklungsfortschritt der Bruten mit jenen aus Fangbäumen in den Beständen.

1.1 Grundlagen

Borkenkäferbefall gehört zu den natürlichen biotischen Störungsereignissen in Nadelwäldern. Weltweit gibt es ca. 6000 Arten von Borkenkäfern (Scolytinae aus der Familie der Curculionidae) (Kirkendall et al., 2015), in Europa sind es ca. 150 Arten an verschiedenen Baumarten. Wirtschaftliche Relevanz in Fichtenwäldern hat neben dem Buchdrucker, *Ips typographus*, jedoch nur der Kupferstecher, *Pityogenes chalcographus* (Marini, et al., 2017). Der Buchdrucker und dessen Wirtsbaumart, die Gemeine Fichte, *Picea abies*, haben sich im Laufe der Evolution an einander angepasst, diese Störungsregime gehören daher zur natürlichen Dynamik fichtenreicher Waldökosysteme (Chapin et al., 2011; Sousa, 1984). Buchdrucker sind in der Lage, das Abwehrsystem von Fichten zu überwinden, da sie Rindenhaltstoffe zur Synthese von Aggregationspheromonen nutzen und in hoher Dichte angreifen können (Christiansen et al., 1987). Ist die Populationsdichte der Käfer gering, finden sie nur in kränkenden oder absterbenden Bäumen günstige Entwicklungsbedingungen vor. Der Buchdrucker spielt für den Nährstoffkreislauf des Waldes eine wichtige Rolle, da befallene Bäume schneller absterben und die organische Substanz abgebaut werden kann. Die Elimination von abwehrschwachen Baumindividuen wirkt sich insgesamt positiv auf die Bestandesvitalität aus und durch kleinflächige Käfernester werden ideale Verjüngungsmöglichkeiten für die Fichte geschaffen.

Die Veränderung der Lebensraumbedingungen durch Buchdruckerbefall hat häufig einen Anstieg im Artenreichtum zur Folge (Bengtsson et al. 2000). Die Anzahl verschiedener Gefäßpflanzen steigt bei Erhöhung des Lichteinfalls auf den Waldboden umgehend an. Abgestorbene Bäume bieten Habitat für eine Vielzahl von xylobionten Pilzen und Insekten. Auch Vögel wie der Habichtskauz profitieren vom Borkenkäferbefall, da Waldstücke aufgelichtet werden, was die Jagd auf Mäuse erleichtert.

Des Weiteren eignen sich abgestorbene Bäume als Bruthöhlen, nicht nur für Eulen, sondern auch für eine Vielzahl anderer Vogelarten (Hochebner et al., 2015).

Massenvermehrungen von *I. typographus* führen jedoch zu großflächigen Absterbeprozessen in Fichtenwäldern. Im Jahre 2015 verursachte Borkenkäferbefall in österreichischen Fichtenbeständen einen Schadholtzanfall von 1,6 Millionen Festmetern (fm). Betroffene Regionen waren das Alpenvorland, der Osten und Südosten Österreichs, also vor allem jene Gebiete, in denen Fichte nicht natürlich verbreitet ist, sondern bevorzugt in Monokultur gepflanzt wurde (Steyrer & Hoch, 2015). Im Jahr 2017 wurden 3,52 Mio fm Schadholtz in Österreich verzeichnet (Hoch, 2017). Der Rekord des Jahres 2009 mit 2,87 Mio fm in der Folge von Sturmereignissen der Vorjahre (Krehan et al., 2015) wurde dadurch um fast ein Viertel überschritten. Die Hälfte dieser Schäden fiel allein im Wald- und Mühlviertel an. Gegenüber dem Vorjahr 2016 nahm die Schadholtzmenge um 34% zu (Steyrer & Hoch, 2018). Im Jahr 2018 ist die durch Borkenkäferbefall hervorgerufene Menge an Schadholtz auf 4,3 Mio fm angestiegen. Die größten Schadholtzmengen traten in Niederösterreich im Waldviertel auf (Prem, 2019).

Bei warmer und trockener Witterung und ausreichendem Brutmaterial kann es leicht zu Massenvermehrungen kommen. Die letzten Jahre lagen fast ausnahmslos um einige Grad über dem langjährigen Mittel (ZAMG, 2019). Im Falle zunehmender Populationsdichten von *I. typographus* und bei hohem Befallsdruck können auch die Abwehrmechanismen gesunder Fichten überwunden werden (Nierhaus-Wunderwald & Forster, 2004). Der Buchdrucker weist ein besonderes „Aggressionspotential“ bei der Überwindung der Abwehr seiner Wirtsbaumart auf. Ein Grund dafür ist die Assoziation mit Bläuepilzen (*Ophiostoma*- und *Ceratocystis*-Arten), die er in den Wirtsbaum miteinbringt und welche die Leitungsgefäße verstopfen können (Kirisits, 2004). Die innerartliche Kommunikation erfolgt über ein Aggregationspheromon, dessen eine Komponente aus dem oxidierten Monoterpen α -Pinen, einem wichtigen Rindeninhaltsstoff, gebildet wird (Schiebe, 2011; Lehmborg, 2013). Die gezielte Anlockung durch Artgenossen an bruttaugliche Fichten verschafft die Vorteile besserer Nahrungsqualität und geringerer Konkurrenz durch andere Organismen (Wermelinger, 2004). Intraspezifische Konkurrenz wird durch Anti-Aggregationspheromone vermieden, welche von den Weibchen abgegeben werden, wenn ein Wirtsbaum bereits voll besetzt ist (Lehmborg, 2013). Die Reproduktionsraten bei Buchdrucker sind sehr hoch und bei klimatisch günstigen Bedingungen kommt es durch exponentielles Wachstum schnell zu hohen Populationsdichten (Marini et al., 2013). Grob überschlagen kann ein Weibchen innerhalb von drei Generationen bis zu 100.000 Nachkommen produzieren. Zusätzlich legen weibliche Buchdrucker nach kurzer Regeneration erneut Eier ab, die so genannte Geschwisterbrut. Dadurch steigt die Anzahl der Nachkommenschaft noch weiter an.

Wichtige Faktoren für den Verlauf von Massenvermehrungen sind die Höhe der Ausgangspopulation, das Brutraumangebot, die Nahrungsqualität, klimatische Bedingungen für die Generationsentwicklung und Überwinterung, sowie Mortalität durch Räuber, Parasiten und Pathogene (Marini et al., 2017).

Zu den natürlichen Gegenspielern des Buchdruckers gehören parasitische Wespen, v.a. Brack- und Erzwespen (Hymenoptera), räuberische Fliegen (Diptera) und Käfer (Coleoptera). Hier ist im Besonderen der Ameisenbuntkäfer (*Thanasimus formicarius*) aus der Familie der Buntkäfer (Cleridae) zu nennen. Diese vertilgen als adulte Käfer mehrere Buchdrucker pro Tag, und als Larve stellen sie sehr effizient den Buchdrucker-Larven im Gangsystem nach. Prädatoren wie der Ameisenbuntkäfer können Massenvermehrungen nicht verhindern, wenn genügend bruttaugliches Material vorhanden ist, wohl aber lokal zu sehr hohen Mortalitätsraten beim Buchdrucker führen (Wegensteiner et al., 2015).

Als Predatoren spielen auch Spechte (Picidae) eine Rolle, vor allem der Dreizehenspecht (*Picoides tridactylus*). Eine Untersuchung von Kotproben im Nationalpark Berchtesgaden zeigte während einer abklingenden Massenvermehrung, dass 80% der Beutetiere adulter Dreizehenspechte Imagines von Borkenkäfern (Scolytinae) waren (Pechacek et al., 1993).

Schneller als Predatoren können parasitische Milben (Acari) und Fadenwürmer (Nematoda) auf die Dichtezunahme der Buchdrucker reagieren und daher tragen sie zu deren Rückgang bei. Aber auch Bakterien und Microsporidien, sind häufige Pathogene. Bakterielle Erkrankungen treten bei hohen Dichten auf und können zum Zusammenbrechen von Massenvermehrungen beitragen (Wegensteiner et al., 2015). Die Ausbreitung vieler dieser Gegenspieler scheint von den Käfer-Brutsystemen auszugehen, in denen sie sich entwickeln. Auch daher empfiehlt es sich, ältere bereits vom Käfer verlassene Bäume stehen zu lassen.

Die wichtigsten antagonistischen Pilzgattungen sind *Beauveria* und *Paecilomyces* (Schimmelpilze), sie können bei feuchten Bedingungen eine 100%ige Mortalität im Brutsystem hervorrufen (Kenis, 2004; Nierhaus-Wunderwald, 1996).

Ein weiterer Regulationsfaktor ist die innerartliche Konkurrenz. Bei begrenztem Brutsubstrat und hoher Besiedlungsdichte gehen die Überlebensraten stark zurück (Anderbrant et al., 1985). Dies betrifft besonders die Folgegenerationen (Faccoli & Bernadelli, 2011).

Abiotische Schäden, wie Wurf, Bruch, Wurzelverletzungen und Trockenheit oder biotische Schäden, wie z.B. Stammfäule können die Abwehrkraft von Wirtsbäumen reduzieren. Standortunangepasste Individuen sind ebenfalls in ihrer Abwehr beeinträchtigt und somit für einen Befall disponiert (Wermelinger, 2003).

Ebenfalls großen Einfluss auf die Borkenkäfer-Befallssituation hat der Mensch durch die Art und Intensität der Waldbewirtschaftung. Werden die Regeln der sauberen Forstwirtschaft nicht eingehalten, wird die Entwicklung des Buchdruckers gefördert, zum Beispiel durch verspätetes Entfernen befallenen Materials oder durch die Lagerung bruttauglicher Stämme im Wald. Stammverletzungen infolge von Erntemaßnahmen disponieren Fichten für Befall, Bodenverdichtung durch schwere Maschinen kann auf empfindlichen Standorten in weiterer Folge zu ungünstiger Wasserversorgung, Trockenstress und Borkenkäferbefall führen. Waldbauliche Maßnahmen beeinflussen die Befallsgefährdung von Beständen langfristig: Kalamitäten sind vor allem in jenen Waldbeständen wahrscheinlich, die eine sehr homogene Altersstruktur (Altersklassenwald) aufweisen und wo Fichte in Monokultur außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets angepflanzt wurde (Netherer & Nopp-Mayr, 2005). *I. typographus* benötigt zur Anlage der Brutsysteme eine gewisse Rindenstärke, die meist mit einem Baumalter von 40-60 Jahren erreicht ist (Wermelinger, 2003). Mit zunehmendem Fichtenanteil, Bestandesalter und Bestandesdichte steigt auch die Gefährdung von Beständen durch Sturmschäden. Sturmereignisse mit über 130 km/h schaffen in der Folge ideale Bedingungen für Massenvermehrungen, weil eine große Menge an bruttauglichem Material durch Windwürfe zur Verfügung steht (Forster & Meier, 2010).

Die Entwicklungsgeschwindigkeit von Insekten hängt direkt von den Umgebungstemperaturen ab, deshalb wird die potentielle Anzahl an Generationen und Geschwisterbruten von den saisonalen Witterungsbedingungen beeinflusst. Klimaveränderungen können aus verschiedenen Gründen zu einer Zunahme von Borkenkäferkalamitäten führen. Erhöhte Temperaturen begünstigen die Entwicklung und ermöglichen eine Zunahme an Generationen pro Jahr. Auch auf Seehöhen

über 1.000 Metern kann hohe Sonneneinstrahlung zu hohen Basttemperaturen in stehenden oder liegenden Stämmen führen. Borkenkäferbefall lässt sich damit bis an die Baumgrenze beobachten, wie beispielsweise im Nationalpark Hohe Tatra (Mezei et al., 2017). Im Jahr 2003, das bereits im Frühling ausgesprochen warm war, konnten sich beispielsweise auf wärmebegünstigten Standorten drei Generationen in den Hochlagen des Nationalparks Kalkalpen entwickeln (Schopf et al., 2004). Der Schwärmbeginn im Frühjahr ist ein kritischer Faktor für die weitere Generationsentwicklung. Die notwendige Lufttemperaturschwelle von 16,5°C für den Käferflug (Lobinger, 1994) kann in warmen Jahren schon vor Anfang April überschritten werden.

Hohe Temperaturen in Kombination mit geringen Niederschlägen erhöhen nicht nur die Entwicklungsgeschwindigkeit der Insekten (Dolezal & Sehnal, 2007), sondern auch die Wahrscheinlichkeit von Trockenstress der Wirtsbäume. Dieser erhöht die Gefährdung für Borkenkäferbefall, wie beispielsweise für *Pinus edulis* in New Mexico gezeigt wurde (Gaylord et al., 2013). Auch Untersuchungen an Fichte weisen darauf hin, dass Trockenstress Bäume für einen Befall durch Buchdrucker prädisponieren kann (Netherer et al., 2015; Ryan et al., 2015; Matthews et al., 2018). Beim Vergleich europaweiter Schadholz- und Klimadaten zeigte sich ein klarer Zusammenhang zwischen Niederschlagsdefiziten und Borkenkäfer-Massenvermehrungen (Marini et al., 2017). Ganz besonders sind jene Bestände gefährdet, in denen bereits im Vorjahr außerplanmäßige Nutzungen durchgeführt werden mussten und die eine Kombination aus hohem Alter, hoher Bestandesdichte und hohem Fichtenanteil aufweisen, wie eine Analyse von Schadholzdaten der Österreichischen Bundesforste (ÖBf AG) ergab (Netherer et al., 2019). Die Fichte als typischer Flachwurzler kann auf seichtgründigen oder verdichteten Böden tiefere Wasserreserven nicht erschließen (Puhe, 2003). Sie lässt auch aufgrund ihrer hohen Kronen- und Humusinterzeption weniger Niederschlag einsickern. Die dichte Benadelung der Fichte reduziert den Kronendurchlass beachtlich und die typische Rohhumus-Auflage bei Bestockung mit Fichte lässt auch aufgrund des Strohdach-Effekts, den die Nadelstreu am Boden hervorruft, weniger Wasser einsickern, als das im Laub(misch)-Wald der Fall wäre. Dadurch ist das Trockenstressrisiko bei der Fichte vor allem in den Tieflagen hoch.

Ein bislang einzigartiges Trockenstress-Experiment, bei der Fichten durch bodennahe Dächer verschiedenen Trockenstress-Intensitäten ausgesetzt wurden (Rosalia-Roof-Projekt) lieferte folgende Ergebnisse: Bäume, deren Wurzelraum vollständig abgedeckt war und die deshalb mit hohen Transpirationsdefiziten konfrontiert waren, konnten im Frühjahr weniger als 10% der Buchdrucker-Attacken erfolgreich abwehren (Netherer et al., 2013 und 2015). Das Transpirationsdefizit ist die Differenz zwischen potentieller und aktueller Evapotranspiration und ein Indikator für den Trockenstress eines Fichtenbestandes (Matthews et al., 2018). Kontrollbäume ohne Trockenstress wehrten hingegen über 70% der Frühjahrs-Käferattacken erfolgreich ab. Akute und chronische Transpirationsdefizite führen also direkt zu reduzierter Abwehrfähigkeit der Wirtsbäume (Matthews et al., 2018). Da die Pflanze bei Wassermangel die Mehrzahl der Stomata schließen muss, ist die Photosynthese-Leistung eingeschränkt, und es steht weniger Kohlenstoff für Abwehrmechanismen zur Verfügung. Trockengestresste Bäume haben geringere Harzflussraten und stärker negative Zweigwasserpotentiale, dies erhöht die Chance der Käfer, sich erfolgreich einzubohren (Netherer et al., 2015; Matthews et al., 2018).

1.2 Biologie des Buchdruckers, *Ips typographus*

Buchdrucker sind wechselwarm, damit hängt ihre Aktivität und die Geschwindigkeit ihrer Entwicklung von der Temperatur ab (Dolezal & Sehnal, 2007). Auf diesen Zusammenhang bauen Prognosemodelle zur Einschätzung der Borkenkäfer-Phänologie auf (z.B. Baier et al., 2007; Jönsson et al., 2007). Überwinternde Käfer bohren sich im Frühjahr aus dem Brutsystem aus oder kommen unter der Streu hervor und beginnen mit der Anlage einer neuen Generation, sobald eine bestimmte Tageslänge erreicht ist und die Temperaturen den Schwellenwert von 16,5°C überschreiten und so ein Schwärmen möglich ist (Lobinger, 1994). Weitere Voraussetzungen für das Schwärmen sind Geschlechtsreife und ausreichende Energiereserven (Nierhaus-Wunderwald & Foster, 2004). Dabei werden männliche „Pionierkäfer“ durch baumbürtige Duftstoffe (Kairomone), dies sind die im Harz vorkommenden leichtflüchtigen Bestandteile des Terpentins (Monoterpene), zu Wirtsbäumen geleitet. Gelingen die ersten Einbohrversuche, werden Artgenossen durch arteigene Lockstoffe (Aggregationspheromone) angelockt. Die Männchen beginnen mit der Anlage der Eingangsröhre und der Rammelkammer. Dann erst kommen die Weibchen hinzu und die stärksten werden zur Begattung dorthin eingelassen. Buchdrucker sind polygam. Die Weibchen legen jeweils einen Muttergang (bis zu 15 cm) an, wobei rechts und links 30-60 Einischen genagt werden, in welche die Eier abgelegt und mit einem Bohrmehlpfropfen verschlossen werden.

Die Embryonalentwicklung dauert, je nach Temperaturbedingungen, 1-2 Wochen. Die weißen Larven mit brauner Kopfkapsel schlüpfen beinlos und fressen sich rechtwinklig zum Muttergang durch den Bast. Der Larvenfraß verletzt somit das Kambium und stoppt den Saftfluss im Phloem. Bei sehr dichter Besiedelung vertrocknet der Baum binnen weniger Wochen und stirbt ab. Mit dem Wachstum der Larve verbreitert sich der Fraßgang und am Ende der Larvenentwicklung wird eine Puppenwiege angelegt. Nach etwa einer Woche ist der hellbraune Junkkäfer fertig entwickelt und beginnt den Reifungsfraß. Innerhalb von 1-2 Wochen nimmt der Käfer Reservestoffe auf, wird geschlechtsreif, seine Kutikula härtet aus und er erlangt damit eine dunkelbraune bis schwarze Färbung. Bei Nahrungsknappheit durch Überbesiedelung verlassen Käfer häufig den Stamm, um sich an anderen geeigneteren Stellen wieder einzubohren und den Reifungsfraß abzuschließen (Nierhaus-Wunderwald & Forster, 2004).

Etwa 6-12 Wochen dauert die Entwicklung einer Generation vom Ei bis zum geschlechtsreifen Käfer. Bei günstigen Temperaturbedingungen erfolgt eine weitere Brutanlage für eine zweite oder gar dritte Generation im selben Jahr (Jönsson et al., 2009). Typisch für den Buchdrucker ist auch das Anlegen von Geschwisterbruten. Das Weibchen kann, wenn es nach der Eiablage einen Regenerationsfraß durchführt, eine weitere Brutsysteme begründen, was in der Regel etwa zwei Wochen nach Anlegen der ersten Brut geschieht. Folgegenerationen entwickeln sich oft schneller, da im Sommer höhere Temperatursummen als im Frühjahr akkumuliert werden. Der Entwicklungsnullpunkt liegt bei 8,3°C (Baier et al., 2007). Er ist ein rechnerisch-theoretischer Wert, also nicht experimentell erfassbar. Das Temperaturoptimum für die Entwicklung der Bruten liegt bei 30,4°C, der obere Schwellenwert bei 38,9°C. Höhere Temperaturen wirken auf den Buchdrucker letal, wobei die Mortalität stark von der Luftfeuchtigkeit abhängt. Liegt diese zwischen 75-90% überleben Käfer die Temperatur von 45°C bis zu 25 Stunden lang (Wild, 1950). Südexponierte Fichten können bei voller Sonneneinstrahlung schnell sehr viel höhere Rindentemperaturen erreichen, eine erfolgreiche Brutentwicklung ist dann aufgrund der Temperaturbedingungen nicht möglich (Wermelinger & Seifert, 1998).

Mitte August reduziert sich die Tageslänge auf unter 15 Stunden, ein Auslöser für die reproduktive Diapause von *I. typographus* (Baier et al., 2007). Populationen im Norden Europas bzw. im alpinen Raum entwickeln sich häufiger univoltin, d.h. bereits die erste Filialgeneration tritt in das Ruhestadium ein. Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Wahrscheinlichkeit von zwei Generationen aufgrund steigender Frühjahrs- und Sommertemperaturen im südsandinavischen Raum höher wird (Jönsson et al., 2007). Mit dem Eintritt in die Diapause erfolgt auch eine physiologische Anpassung an die tieferen Temperaturen der Wintersaison. Mittelbraune bis schwarze Käfer überstehen auf diese Weise Temperaturen bis -30°C (Schopf & Kritsch, 2010). Die Frostresistenz der Insekten wird durch die Akkumulation des Zuckers Trehalose erhöht (Košťál et al., 2011). Die Mortalitätsrate liegt bei der Überwinterung jedoch bei 50%. Todesursachen sind Kontaktgefrieren in ungünstigen, zu feuchten Rindenbereichen oder während zwischenzeitlicher Wärmephase, in denen die Fraßaktivität wieder aufgenommen wird und es in der Folge zur Eisbildung im Darm kommen kann. Auch Infektionen durch Pathogene tragen zur Mortalitätsrate bei. Adultkäfer sind weniger frostempfindlich als Jungkäfer und Jugendstadien. Den Winter überleben nur Käferstadien. Larven und Puppen, die durch eine späte Brutanlage mit tiefen Temperaturen konfrontiert werden, sterben bereits bei geringen Minusgraden weit oberhalb ihrer physiologisch bedingten Kältehärtigkeit an Unterkühlungsverletzungen und Kontaktgefrieren ab. Die Überwinterung der Adultkäfer erfolgt im Brutsystem, wenn aber der Reifungsfraß abgeschlossen werden konnte und sich der Käfer bereits ausgebohrt hat, auch in der Bodenstreu (Annala, 1969; Biermann, 1977; Dolezal & Sehnal, 2003; Schopf & Kritsch, 2010).

1.2 Die Prognose-Modelle PHENIPS und TDEF

1.2.1 Das Phänologie-Modell PHENIPS

Die Kosten für Bekämpfungsmaßnahmen gegen den Buchdrucker belaufen sich in großen Forstbetrieben, wie der ÖBf AG, auf mehrere Millionen Euro pro Jahr. Viel Geld ließe sich sparen, wenn Forstpersonal beim Monitoring von Risikobeständen Unterstützung durch Modellierung der Käferentwicklung hätte und somit rechtzeitige Maßnahmen erfolgen könnten. Für eine exakte Prognose der Schwärmpereoden und des Entwicklungsfortschritts der Brut ist das Modell PHENIPS am IFFF, BOKU entwickelt worden (Baier et al., 2007). Dies kann eine Fallenkontrolle ergänzen oder auf ausgewählten Standorten auch ersetzen bzw. an sehr schwer zugänglichen Standorten erstmals ermöglichen.

Viele, auch bereits ältere Studien haben sich mit dem Zusammenhang zwischen Entwicklung und Reproduktion des Buchdruckers und der Temperatur befasst (Wild, 1950; Annala, 1969; Lobinger, 1994; Schopf, 1989; Wermelinger & Seifert, 1998). Dieser ist gut erforscht und für PHENIPS wichtig, denn für ein realitätsnahes Phänologie-Modell ist das Wissen um Entwicklungsraten und Temperaturlimits (z.B. Entwicklungsnullpunkte) nötig. Dieses temperaturbasierte Modell berechnet über Luft- und Rindentemperatur grundlegende, rein temperaturabhängige Ereignisse in der Entwicklungsdynamik des Buchdruckers.

PHENIPS prognostiziert 1.) den Schwärm- und Befallsbeginn der überwinternden Käfer im Frühjahr, 2.) den Entwicklungsfortschritt der angelegten Generation unter der Borke nach Stadium (Eier, Larven, Puppen, Jungkäfer), also deren Entwicklungsdauer, und somit auch den Zeitpunkt des Reifungsfraßes und Ausflug der Jungkäfer und 3.) den Beginn der Anlage von Geschwisterbruten und Filialgenerationen. Da Geschwisterbruten oft schwer zu erkennen sind und im Gelände leicht übersehen werden, am Populationswachstum aber maßgeblich beteiligt sein können (Berec et al., 2013), werden sie zusätzlich zur Anzahl der Filialgenerationen im Modell berücksichtigt. Das Modell stellt also auch die maximale Anzahl an Generationen pro Saison auf dem ausgewählten Standort dar. Zu Saisonende hängt eine weitere Generationsentwicklung von der Tageslänge ab, wobei der Schwellenwert für die Photoperiode bei 14,5 Stunden liegt. PHENIPS simuliert daher 4.) wieweit eine zu Saisonende begonnene Generation entwickelt ist, und damit die wahrscheinliche Rate an überwinternden Käfern, welche die Basis für den Aufbau der Population im Folgejahr bildet (Baier et al., 2007).

So bietet PHENIPS auch generell tiefere Einblicke in die Populationsdynamik von *I. typographus* (prospektive und auch retrospektive Analysen sind möglich) und ermöglicht Szenarien über die Generationsentwicklung bei sich ändernden Umweltbedingungen.

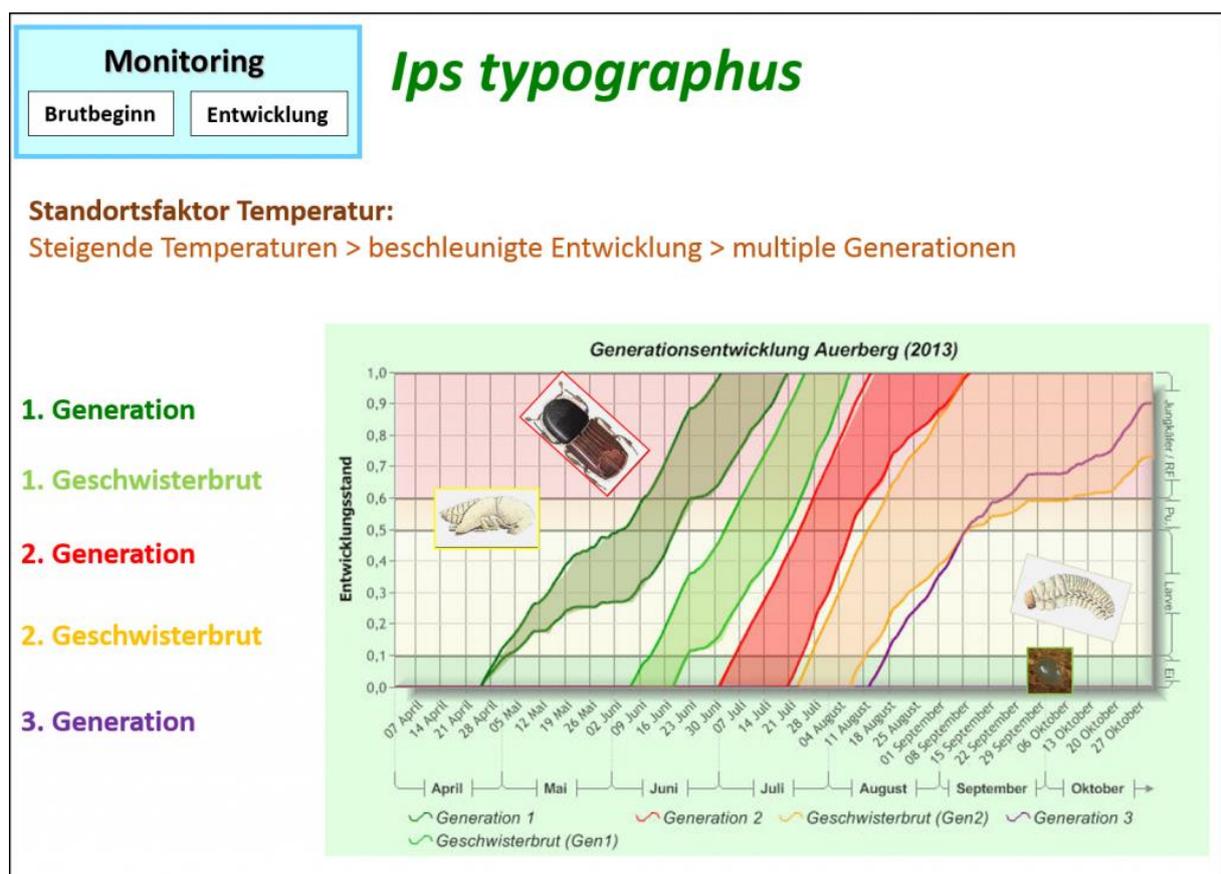


Abb. 1: Graphische Darstellung der Borkenkäferentwicklung mit PHENIPS, am Beispiel Auerberg im Jahr 2013 (Quelle: <http://iff-server.boku.ac.at>).

Die grafische Darstellung (Abb. 1) der mittels PHENIPS simulierten potentiellen Borkenkäferentwicklung lässt sich wie folgt interpretieren: Am 21. April beginnt die Entwicklung der ersten Generation des Jahres 2013 am Auerberg. Die dunkelgrüne Fläche zeigt den potentiellen Entwicklungszeitraum der ersten, und die rote Fläche den der zweiten Generation, begrenzt von den Linien für Minimal- und Maximalentwicklung. Der prognostizierte Beginn der zweiten Generation ist zeitlich schon weiter abgegrenzt, da er vom Ausflug der Jungkäfer der ersten Generation abhängt, der in diesem Beispiel für Anfang bis Mitte Juni modelliert wurde. Die hellgrünen und orangen Flächenverläufe symbolisieren die Entwicklung der Geschwisterbruten der ersten und zweiten Generation, die von den Adultkäfern zu dem Zeitpunkt angelegt werden, an dem die Larvenstadien abgeschlossen wurden. In diesem Beispiel kommt es noch zu einer dritten Generation (violette Linie).

Die graphische Darstellung zeigt den wahrscheinlichen Entwicklungsstand der Bruten zu einem bestimmten Zeitpunkt. Um die Populationsdichte zur Abschätzung der Käferentwicklung für das Folgejahr zu beurteilen ist interessant, welches Stadium vor der Diapause noch erreicht wird, denn nur Käferstadien können erfolgreich überwintern.

PHENIPS basiert auf einer nichtlinearen Funktion für die Berechnung von entwicklungsrelevanten Temperatursummen, und ist genauer als viele bisherigen Studien, die nur den linearen Zusammenhang zwischen Entwicklungsraten und Temperatur darstellen. Im Bereich des oberen Temperaturschwellenwertes folgt die Funktion einer Optimumskurve, d.h. die prognostizierte Entwicklung verlangsamt sich wieder, wenn die Temperatur das Optimum überschritten haben. Beim Erreichen des oberen Temperaturschwellenwertes von 38,9°C kommt die Entwicklung ganz zum Erliegen (Wermelinger & Seifert, 1998). Die Prognose erfolgt über eine Aufsummierung von effektiven Temperaturen, den Wärmesummen oberhalb des Entwicklungsnullpunkts (Gradtage).

Voraussetzung für die Anwendung von PHENIPS sind standortsbezogene Klimadaten, die täglich von einer Klimastation übermittelt werden. Die Basis für eine flächige Anwendung des Modells ist ein digitales Geländemodell, welches für die Interpolation von Temperatur und Sonneneinstrahlung für unterschiedliche Standorte herangezogen werden kann bzw. ein flächenbezogenes Klimamodell. Aus Lufttemperatur und Globalstrahlung werden wiederum die täglichen mittleren und maximalen Rindentemperaturen berechnet. Regressionen, die diesen Zusammenhang je nach Exposition des Stammes beschreiben, ermöglichen eine Abstufung der modellierten Temperaturbedingungen zwischen offener Fläche und geschlossenem Bestand (Netherer & Pennerstorfer, 2001).

Eine Validierung des Modells PHENIPS erfolgte 2007 im Nationalpark Kalkalpen durch den Vergleich von gemessener Rindentemperatur, Flugaktivität und Entwicklungskontrollen in Fangbäumen auf verschiedenen Höhenstufen und Hangneigungen mit der vom Modell prognostizierten Phänologie des Käfers. Dabei konnte PHENIPS verschiedene Entwicklungsschritte relativ genau vorhersagen, wie beispielsweise den Befallsbeginn mit einer Abweichung von nur 1,3 Tagen (Baier et al., 2007). PHENIPS wurde unabhängig davon im Böhmerwald getestet (Berec et al., 2013), wo ebenfalls eine gute Übereinstimmung von modellierter und gemessener Rindentemperatur festgestellt wurde. Obwohl die Vorhersagen der Entwicklung des Buchdruckers von tatsächlichen Beobachtungen abweichen können, wird PHENIPS als sehr brauchbares und in den meisten Fällen sehr genaues Prognosemodell erachtet. Das Modell könnte nicht nur in Mitteleuropa Verwendung finden, da nur wenige Parameter, wie zu Beispiel Schwellenwerte für die Tageslänge, die vom Breitengrad abhängt, verändert werden müssten.

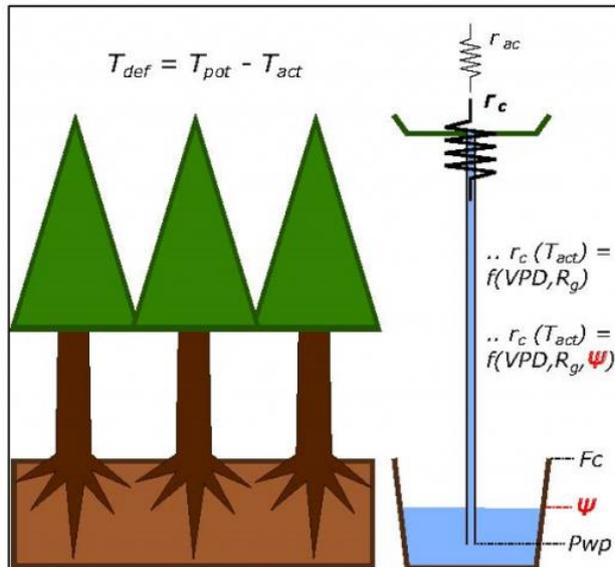
1.2.2 Simulation von Transpirationsdefiziten mittels TDEF

Eine dynamische Gefährdungseinschätzung für den Borkenkäferbefall wird erst möglich, wenn ein weiterer wichtiger Aspekt miteinbezogen wird, der Wirtsbäume für Befall prädisponiert: Trockenstress. TDEF ist ein einfaches Ökosystem-Wasserbilanzmodell, das im Zuge des Rosalia Roof - Projekts im Lehrforst der BOKU auf Basis verschiedener physiologischer, hydrologischer und klimatischer Parameter parametrisiert wurde (Matthews et al., 2018). Es berechnet stündlich die Differenz zwischen potentieller und aktueller Transpiration, und simuliert somit täglich die Wasserbilanz bzw. ein eventuell auftretendes Transpirationsdefizit eines Bestandes in Millimetern. Übersteigt die aktuelle, durch das Bodenwasserpotential limitierte Transpiration die potentielle, von Globalstrahlung und Dampfdruckdefizit abhängige Transpiration, können Bäume ihren Wasserverlust nicht mehr durch Wasseraufnahme aus dem Boden ausgleichen. Es kommt zum Trockenstress. Weil das TDEF Modell bodenphysikalische Zusammenhänge stark vereinfacht, werden beispielweise Wasserflüsse durch mehrere Bodenhorizonte oder Winterniederschläge in Form von Schnee nicht berücksichtigt (Matthews et al., 2018).

Das TDEF Modell ist ein sogenanntes „Two-Bucket-Model“, d.h. die Berechnungen beziehen sich auf zwei Wasserreservoirs, dem im Boden gespeicherten und dem durch Kronen-Interzeption zurückgehaltenen Niederschlagsanteil (Abb. 2). Stündlich berechnet TDEF die Strahlungsbilanz am Waldboden und in der Krone und die Interzeptionsdynamik. So lässt sich der Bestandesniederschlag bestimmen. Neben den Klimadaten sind für die Modellierung auch Bestandes- und Bodendaten nötig, da der Bodenwassergehalt von den texturabhängigen Parametern Sättigungswassergehalt und Restwassergehalt abhängt. Diese und weitere bodenphysikalischen Kennwerte können mittels Pedotransferfunktionen (Rawls & Brakensiek, 1989) bestimmt werden. Voraussetzung dafür ist Information über die Bodenart (Textur).

Klima – Boden - Bestand

Lufttemperatur	Bodentyp	Korngrößenanalyse
Niederschlag	Bodenart	Grobanteil
Relative Luftfeuchte	Bodenfeuchte (TDR)	Gesamt-Kohlenstoffgehalt
Windgeschwindigkeit	Bodenmatrixpotential	pF-Kurven
Globalstrahlung	Saftfluss, Interzeption	



Wasserbilanzmodell:

„Two Bucket“ Modell:

Wasserversorgung der durchwurzelten Bodenschichten
Kronen-Interzeption

Simulation des Wasserpotentials

- ⇒ Potentielle Transpiration
- ⇒ Simulation von **Transpirations-Defiziten**

Abb. 2: Einfaches Modell zur Simulation von Wasserbilanzen, entwickelt am Standort Rosalia (Quelle: <http://iff-server.boku.ac.at>)

1.2.3 Das duale Borkenkäfer-Phänologie/Wasserbilanzmodell PHENIPS-TDEF

Durch die Kopplung der Modelle PHENIPS und TDEF ist die zeitnahe Beurteilung der Befallsgefährdung von Beständen in Bezug auf Trockenstress und Schwärmpereoden möglich (Abb. 3). Die Interpretation der Modellergebnisse soll in Frühwarnsystemen für Buchdruckerbefall Verwendung finden. Das duale Borkenkäfer/Wasserbilanzmodell PHENIPS-TDEF kann somit als dynamisches Monitoring- Instrument verstanden werden, das tägliche Witterungsverhältnisse und Schwankungen in der Wasserversorgung von Fichtenbeständen berücksichtigt.

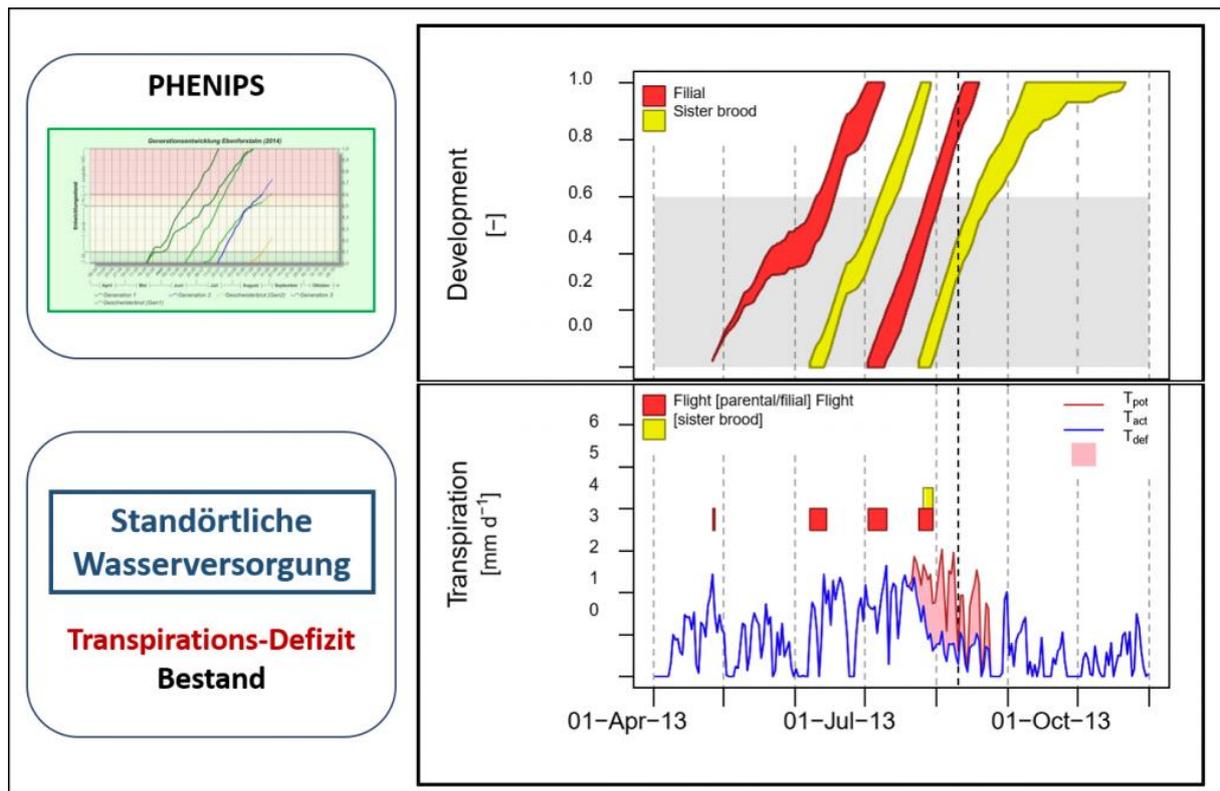


Abb. 3: Mögliche grafische Darstellung von PHENIPS-TDEF: Buchdrucker-Schwärmphasen (Parental-/Filialgenerationen, Geschwisterbruten) im zeitlichen Verhältnis zur standörtlichen Wasserversorgung bzw. Trockenstressphasen des Bestandes (Quelle: <http://iff-server.boku.ac.at>)

Spezifische Voraussetzungen, um PHENIPS-TDEF auf bestimmten Standorten etablieren zu können, sind (Netherer et al., 2019):

1. Die Charakterisierung von Bestandes- und Bodenparametern auf der Monitoringfläche, wie zum Beispiel Fichtenanteil, Bestandeshöhe, Stammzahl, LAI, Bodenart und Durchwurzelungstiefe
2. Die Werbung ungestörter Bodenproben, um relevante bodenphysikalische Eingangsparameter im Labor ermitteln zu können
3. Die Parametrisierung von TDEF auf Basis konkreter Messwerte wie beispielsweise Leaf Area Index (LAI), Bodentiefe oder Durchwurzelungsraum.
4. Eine Klimastation in der Nähe, die laufend Daten wie Temperatur-, Niederschlags-, Feuchtigkeits- und Globalstrahlungswerte für PHENIPS-TDEF liefert

Standortsfaktoren wie Topographie, Bodentyp und Bodenart beeinflussen maßgeblich die Wasserversorgung von Fichtenbeständen. Eine interessante Frage ist die Anwendbarkeit von PHENIPS-TDEF auf extremeren Standorten, die beispielsweise sehr inhomogene Bodenverhältnisse in Bezug auf Gründigkeit oder Grobanteil aufweisen. Gerade in alpinen Bereichen, wo befallsgefährdete Waldflächen oft schwer zugänglich und Kontrollen deshalb nicht im erforderlichen Umfang realisierbar sind, kann PHENIPS-TDEF die zeitliche und räumliche Planung von Forstschutzmaßnahmen unterstützen.

1.3 Fragestellung der Arbeit

Eine Evaluierung von PHENIPS-TDEF abseits des Gebietes, in dem das Wasserbilanzmodell entwickelt wurde (Lehrforst, Rosaliengebirge in Niederösterreich), ist bislang noch nicht durchgeführt worden. In dieser Masterarbeit wurden daher modellierte Ergebnisse mit aktuellen Messdaten der Vegetationsperiode 2018 verglichen. Den Angaben aus den Operatsdaten der Österreichischen Bundesforste (ÖBf AG) für die untersuchten Flächen im Wildnisgebiet Dürrenstein wurden aktuell erhobene Daten des Bestandesaufbaus und Bodens gegenübergestellt.

Folgende Fragestellungen wurden bearbeitet:

1. Evaluierung von PHENIPS im Untersuchungsgebiet: Vergleich der Simulationsergebnisse von PHENIPS in Bezug auf Buchdrucker-Schwärmzeiten und Entwicklungsfortschritt der Brutten im Sommer 2018 mit tatsächlichen Erhebungsdaten (Pheromonfallen, Fangbäume) – Wie weit stimmen simulierte und beobachtete Daten überein?

2. Evaluierung von TDEF im Untersuchungsgebiet:
 - 2.1. Anwendung des Wasserbilanzmodells TDEF zur Simulation der Veränderungen im Bodenwassergehalt auf den Versuchsstandorten und Berechnung der potentiellen und aktuellen Transpiration der Fichtenbestände auf Basis der erhobenen Klima-, Boden- und Bestandesdaten

 - 2.2. Vergleich der Simulationsergebnisse basierend auf Operatsdaten der ÖBf AG und aktuellen Erhebungsdaten zu Bestandesmischung und -struktur bzw. Boden-verhältnissen.
Wie groß sind die Unterschiede?

 - 2.3 Vergleich der simulierten Bodenwassergehalte mit aktuellen Messwerten der periodischen Bodenfeuchtemessung

3. Einschätzung der Befallsgefährdung der untersuchten Fichtenbestände im Untersuchungsjahr 2018: Zeitliche Koinzidenz von Schwärmperioden des Buchdruckers mit Perioden erhöhter Disposition für Befall infolge Trockenstress (Transpirationsdefizit) der Bestände. Hier stellt sich insbesondere die Frage, ob es in einem Fichtenbestand eines so regenreichen Gebietes überhaupt zu Trockenstress kommen kann.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungszeitraum und Überblick

Am 23. Mai 2018 wurde die erste Fahrt ins Wildnisgebiet Dürrenstein unternommen, um automatisierte Pheromonfallen für *Ips typographus* auf den Untersuchungsstandorten aufzustellen. Eine zweite Fahrt erfolgte am 29. Mai 2018, um geeignete Fichtenbestände für die Anwendung des Wasserbilanzmodells TDEF auszuwählen und die Bodenfeuchtemesssonden zu installieren, sowie Punkte für die Winkelzählproben auf den Waldflächen zu verpflocken. Von Ende Mai bis Anfang September wurden die Käferfallen regelmäßig kontrolliert und ein Fangbaum pro Waldfläche auf den Entwicklungsfortschritt der Buchdruckerbruten hin untersucht. Auf beiden Versuchsflächen wurden im 2 Wochentakt Bodenfeuchtemessungen vorgenommen und einmalig Bodenparameter für die Simulation mit TDEF erhoben. Mit Winkelzählproben und hemisphärischer Fotografie wurden für beide Bestände die erforderlichen Bestandesparameter ermittelt. Am 5. September 2018 wurden die Pheromonfallen abgebaut und die Freilandarbeit beendet.

2.2 Untersuchungsgebiet

2.2.1 Wildnisgebiet Dürrenstein

Das Wildnisgebiet Dürrenstein liegt in der niederösterreichischen Eisenwurzen an der Grenze zur Steiermark in der Gemeinde Göstling, südwestlich von Lunz am See. Es ist Österreichs erstes und bislang einziges Wildnisgebiet. Herzstück davon ist der 400 ha große Urwaldrest Rothwald. Von diesem ausgehend wurde das Schutzgebiet sukzessive vergrößert (Pekny, R., 2018, mündliche Mitteilung, Exkursion Rothwald).

Seit 2003 ist das Gebiet mit 35 km² als Wildnisgebiet der Kategorie 1 von der IUCN (International Union for Conservation of Nature) anerkannt. Der Ostteil des Schutzgebiets ist als Kategorie 1a eingestuft, diese Kategorie definiert sich wie folgt: *„Ein Areal von Land und/oder Meer, das einige herausragende und/oder repräsentative Ökosysteme, geologische oder physiologische Merkmale und/oder Arten besitzt, und vorrangig der wissenschaftlichen Forschung und/oder dem Umwelt-Monitoring zugänglich ist.“* Das Untersuchungsgebiet liegt im Westteil des Wildnisgebietes und fällt in die Kategorie 1b: *„Großes Areal von nicht oder nur geringfügig verändertem Land und/oder Meer, das seine natürlichen Charakteristika und Einflüsse beibehalten hat, ohne permanente oder erhebliche Besiedelung ist und das geschützt und bewirtschaftet wird, um seine natürlichen Gegebenheiten zu erhalten.“* (IUCN, 2018).

Damit fällt das Wildnisgebiet Dürrenstein in die höchste internationale Schutzkategorie, die ein Naturschutzgebiet haben kann (Leditznig & Pekny, 2014). Weiters zählt es auch zur Natura 2000 Fläche „Ötscher-Dürrenstein“ (Amt der NÖ Landesregierung, 2009). Diese ist als Waldschutzgebiet der Fichten-Tannen-Buchenwaldgesellschaft (Abieti Fagetum) auf karbonatischem Gestein (Hauptdolomit, Dachsteinkalk) ausgewiesen. Es erfolgen keine forstlichen Nutzungen und auch sonst kaum menschliche Eingriffe, abgesehen von Schalenwildregulation auf maximal 25% der Gesamtfläche nach wald- und wildökologischen Gesichtspunkten. Für Großprädatoren ist das Gebiet derzeit flächenmäßig

zu klein. Neophyten, bei denen eine Chance auf Ausrottung besteht, werden (ausschließlich mechanisch) bekämpft. Die Natur soll sich ungestört entwickeln dürfen. Nur wenige Bereiche sind der Öffentlichkeit zugänglich. In dem für die Öffentlichkeit gesperrten Gebiet wird eine begrenzte Anzahl an Exkursionen pro Jahr durchgeführt. Sonst dürfen diese Bereiche nur für Forschungszwecke betreten werden (Leditznig et al., 2013).

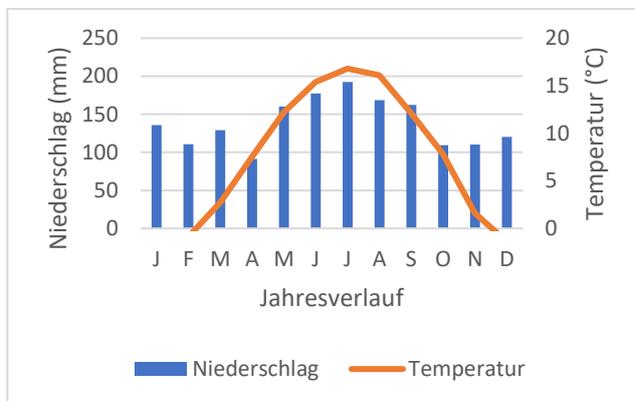


Abb. 4: Klimadiagramm Lunz am See. Jahresmittelwerte für Temperatur und Niederschlag, gemittelt über die letzten 20 Jahre (Quelle: Hager, 2019).

Das Wildnisgebiet Dürrenstein befindet sich im Wuchsgebiet 4.2 Nördliche Randalpen-Ostteil (Kilian et al., 1994). Charakteristisch ist der hohe Niederschlag mit bis zu 2300 mm im Jahr (Schopf et al., 2012). Im nahe gelegenen Ort Lunz am See liegt der Durchschnittsniederschlag der letzten 30 Jahre bei 1676 mm. Im Jahr 2018 betrug er 1500 mm. An 191 Tagen des Jahres 2018 gab es messbaren Niederschlag (Mittel: 208 Tage) mit durchschnittlich 7,9 mm pro Niederschlagstag. Das Mittel der letzten 30 Jahre beträgt 8,0 mm (Hager, 2019). Neben den großen Regemengen im Sommer fällt auf, dass auch im Hochwinter viel Niederschlag fällt (Abb.4).

Typisch für das Wildnisgebiet sind die sehr niedrigen Jahresdurchschnittstemperaturen von 3,9°C (Schopf et al., 2012). Das langjährige Mittel von Lunz am See liegt bei 7,4°C. Die Jahre 2014 und 2018 brachten jedoch auch in diesem Teil Österreichs jeweils neue Rekorde in der Jahresdurchschnittstemperatur. Mit 8,96°C mittlerer Jahrestemperatur in Lunz am See ging 2018 als wärmstes Jahr in die 110-jährige Messgeschichte des Ortes ein. Das 10-jährige Temperaturmittel liegt deutlich höher als das 20-jährige (Abb. 5). Auch österreichweit war das Jahr 2018 in der 252-jährigen Messreihe das bislang wärmste mit einem Plus von 1,8 °C über dem langjährigen Mittel (ZAMG, 2019).

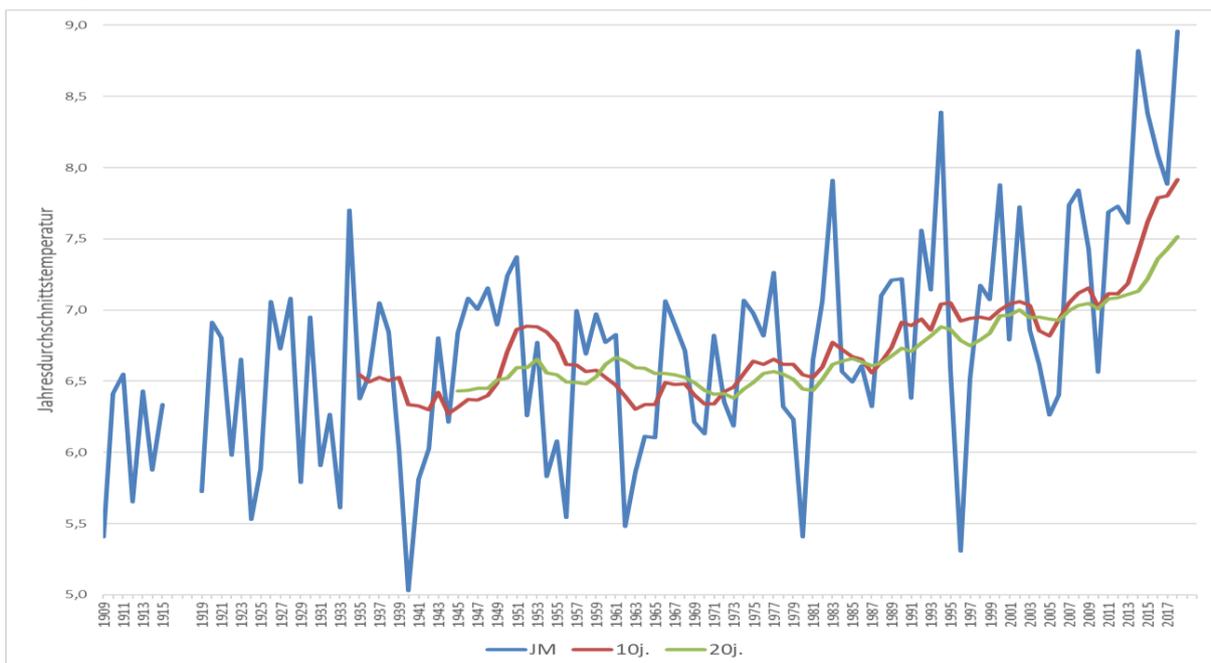


Abb. 5: Durchschnittstemperaturen (JM) von Lunz am See für die Jahre 1909 bis 2018, sowie 10-jährige (10j.) und 20-jährige gleitende Temperaturmittel (20j.) (Quelle: Hager, 2019).

2.2.2 Untersuchungsstandorte

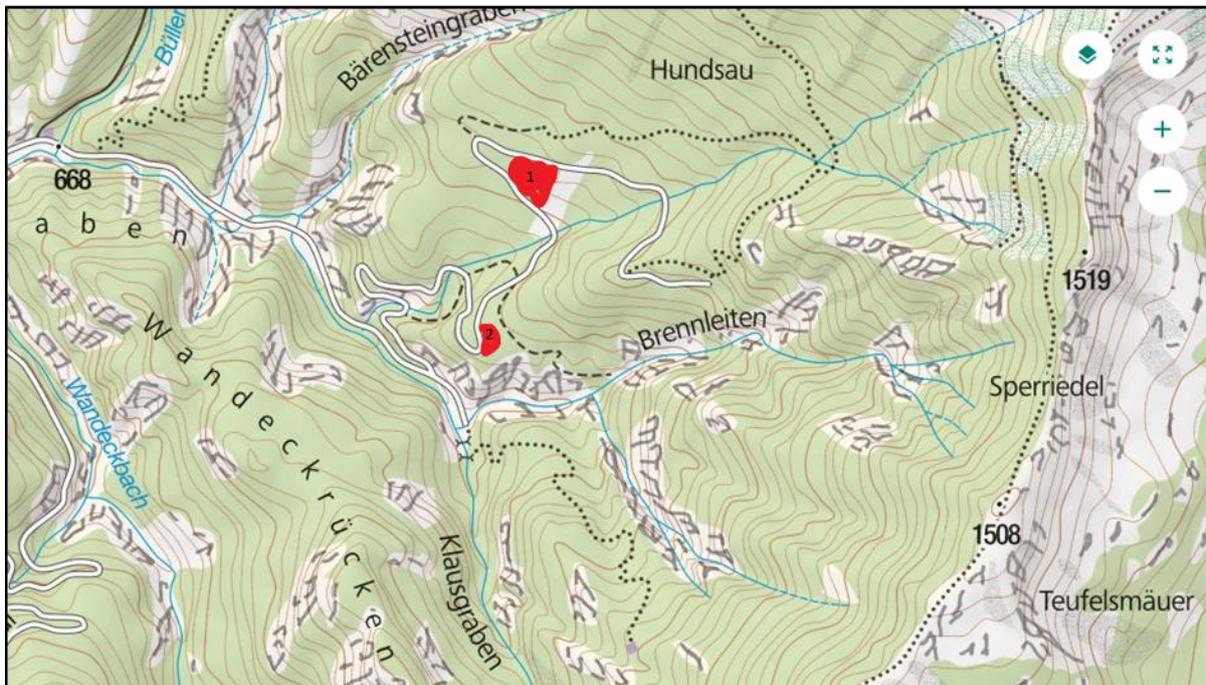


Abb. 6: Ausschnitt aus der topographischen Karte mit dem Untersuchungsgebiet Hundschau. Die roten Flächen sind die Untersuchungsstandorte I und II (Quelle: <http://atlas.noe.gv.at>).

Die Untersuchungsstandorte liegen in der Hundschau (Abb. 6). Diese ist im Südwestabfall des 1878 m hohen Dürrensteins gelegen und als Schutzgebiet mit Kategorie 1b ausgewiesen.

Die Geologie ist bestimmt von Lunzer Dolomit und Dachsteinkalk. Dolomit ist grundwasserpermeabel und prägt das Karstgebiet des Hochschwab mit, das durch die Wiener Hochquellenleitungen erschlossen ist. Die Hundschau wird von einem schmalen Band Sandstein, den sogenannten Lunzer Schichten durchzogen, die einen Teil der Raibler Schichten vertreten (Abb. 7). Sie sind tonreicher und mergeliger (Gattinger, 1980; Plöchinger, 1980). Darauf befinden sich besonders wüchsige Standorte, die in der Vergangenheit intensiv forstlich genutzt wurden (Abb. 8). Auch der Untersuchungsstandort II scheint auf diesen Schichten zu liegen (Lang, H.P., 2018, mündliche Mitteilung in Exkursion „Erbe der Forstwirtschaft“).

Hauptbaumart der Hundschau ist die Rotbuche (*Fagus sylvatica*), die nur teilweise mit Fichte den Übergang zum Latschengürtel bildet. Auf den ehemals forstlich genutzten Flächen ist der Fichtenanteil sehr hoch, da die Baumart teilweise in Reinbeständen aufgeforstet wurde. Diese nicht der natürlichen Waldgesellschaft (*Abieti Fagetum*) entsprechenden Bestände befinden sich jetzt in verschiedenen Stadien des Zusammenbruchs. Die Baumartenzusammensetzung nähert sich wieder dem des Naturwaldes an. Diese „Bestandesumwandlung“ wird durch abiotische Schadereignisse, wie Sturm und Lawinenabgänge und Befall durch Buchdrucker und andere Borkenkäferarten, beschleunigt (Blackwell, 2011). Die bis 2032 erlaubten leichten forstlichen Eingriffe auf kleinen Flächen, um eine natürliche Regeneration der Bestände zu fördern, erübrigen sich dadurch teilweise (Lang, H.P., 2018, mündliche Mitteilung).

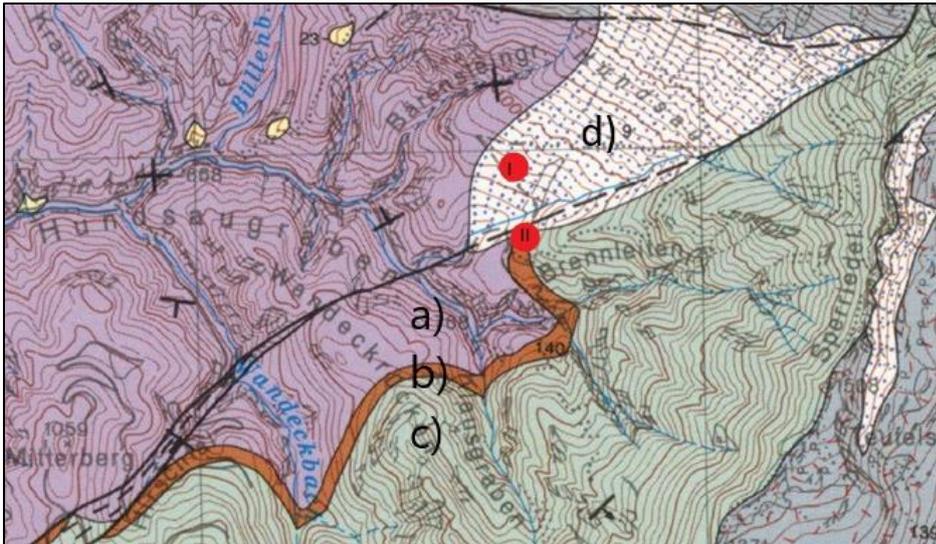


Abb. 7: Ausschnitt aus der geologischen Karte. Die Lunzer Schichten ziehen sich, dargestellt als oranges Band durch die Hundsbau. Die roten Punkte markieren die Untersuchungsflächen Bestand I und II. a) Ramsaudolomit, b) Lunzer Schichten, c) Dachsteindolomit, d) Hangschutt (Quelle: Geologische Karte der Republik Österreich: 71 Ybbssitz, Maßstab 1:50.000. Herausgegeben von der geologischen Bundesanstalt Wien, 1988).

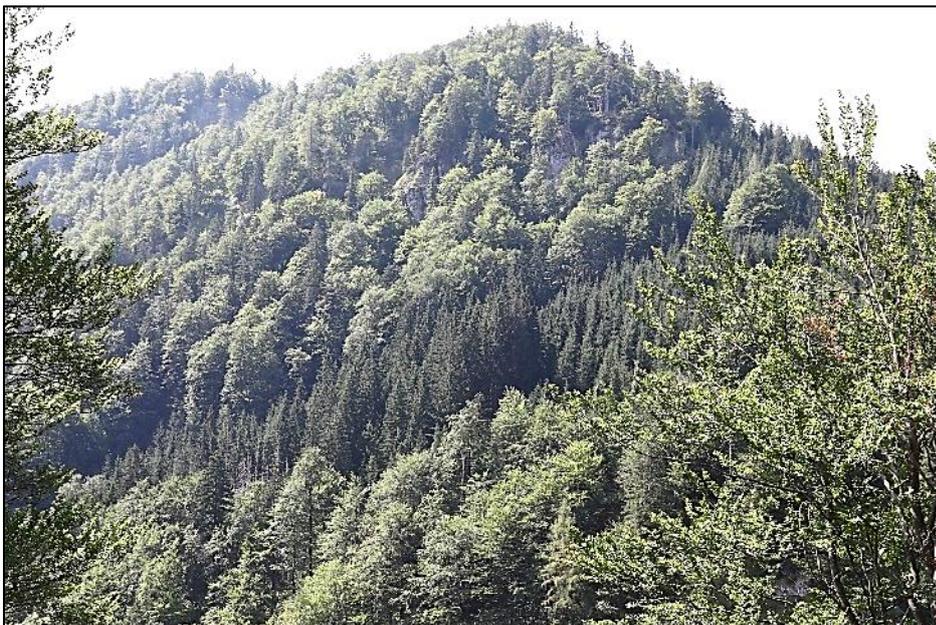


Abb. 8: Das Auftreten der Lunzer Schichten ist, wie in diesem Beispiel vom Gegenhang der Untersuchungsstandorte, oft am Waldbild erkennbar (hier zieht sich ein Band Fichten von links unten nach rechts oben). Denn diese wüchsigen Standorte wurden nach der Nutzung mit Fichte aufgeforstet. Der Bestand oberhalb wurde vermutlich nie flächig genutzt und entspricht der natürlichen Baumartenzusammensetzung.

Die auf den ersten Blick einfachen, erwünschten Auswahlkriterien für die Versuchsstandorte, nämlich Begehbarkeit, Fichtenreichtum, einheitliche Bodenverhältnisse und unterschiedliche Exposition der Bestände, waren vor Ort aufgrund der Steilheit des Geländes nicht leicht zu erfüllen. So konnten letzten Endes nur zwei gut erreichbare, fichtendominierte und für die Untersuchungen geeignete Bestände ausgewählt werden (Bestand I und II). Sie liegen im Mittelhang des Südwestabfalles des Dürrensteins. Diese Waldflächen befinden sich im Besitz der ÖBf AG.

Der Bestand I befindet sich oberhalb des ersten Pheromonfallen-Standorts auf einer Seehöhe von 925 m. Die Exposition ist Süd-Südwest und die Hangneigung 36% (Tab. 1). Das unruhige Mikrorelief deutet auf einen alten Windwurf hin. Neben Frischezeigern wie *Adenostylos glabra*, *Solidago virgaurea* und *Veratrum album* finden sich im Bestand I aber auch *Oreganum vulgare* und *Daphne alpina*, welche trockene Standorte bevorzugen. Diese teils widersprüchlichen Zeigerpflanzen sind Spiegelbild des Kleinmosaiks, das besonders auf Karbonat sehr ausgeprägt sein kann. Arten wie *Atropa belladonna* und *Sanicula europaea* deuten auf einen besser stickstoffversorgten Standort hin, sie zeigen daher wohl die beginnende Auflichtung und somit Nährstoffmobilisierung an (Ellenberg et al., 1992).

Der Bestand II liegt etwas tiefer auf ca. 870 m, weist unterschiedliche Expositionen und Neigungen und daher recht unterschiedliche Mikrostandortsbedingungen auf (Tab. 1). Dies ist auch an der Vielzahl unterschiedlicher Zeigerpflanzen auf kleiner Fläche erkennbar. *Maianthemum bifolium* als Schattenpflanze ist hier genauso zu finden wie der sonnenliebende *Daphne alpina*. Es finden sich überwiegend Frischezeiger, wie zum Beispiel *Gentiana asclepiadea* oder *Adenostyles alpina*. *Melampyrum sylvaticum* und *Vaccinium myrthillus* weisen auf einen sauren Standort hin, während dem in unmittelbarer Nähe *Helleborus niger* und *Mercurialis perrennis* widersprechen (Ellenberg et al., 1992). Auch im Bestand II weist das unruhige Mikrorelief auf einen früheren Windwurf hin. Im Mittel ist die Exposition Südwest bis West, und die Hangneigung mit 20% weniger steil. Da ein großer Teil des Bestandes aufgrund von Buchdruckerbefall bereits abgestorben war, sind die untersuchten Reste dieser Waldfläche wesentlich kleiner als jene in Bestand I.

Tab. 1: Merkmale der Bestände I und II

Merkmale	Bestand I	Bestand II
Alter (Jahre)	ca. 100	ca. 100
Seehöhe (m)	925	870
Geländeneigung (%)	36	ca. 20
Exposition	SSW	SSW-W
Fläche (ha)	0,3	0,07
Koordinaten (°)	15° 02' 32,62" O 47° 46' 34,6" N	15° 02' 24,3" O 47° 46' 22,0" N

Auf beiden Waldflächen stockt ein einschichtiger Fichtenreinbestand, mittleres Baumholz mit Lücken. Das Alter beider Bestände ist laut Forstkarten der Bundesforste ca. 100 Jahre (5. AKL) (Abb. 9). Die Bäume wurden vermutlich gepflanzt. Im Luftbild sind die ausgewählten Bestände, sowie die Position der fünf Fallenstandorte und die Klimastation eingezeichnet (Abb. 10). Für beide Bestände sind in Detailskizzen die Positionen von TDR-Messpunkten, Winkelzählprobepunkten und Fangbäumen dargestellt (Abb. 11 und Abb. 12).

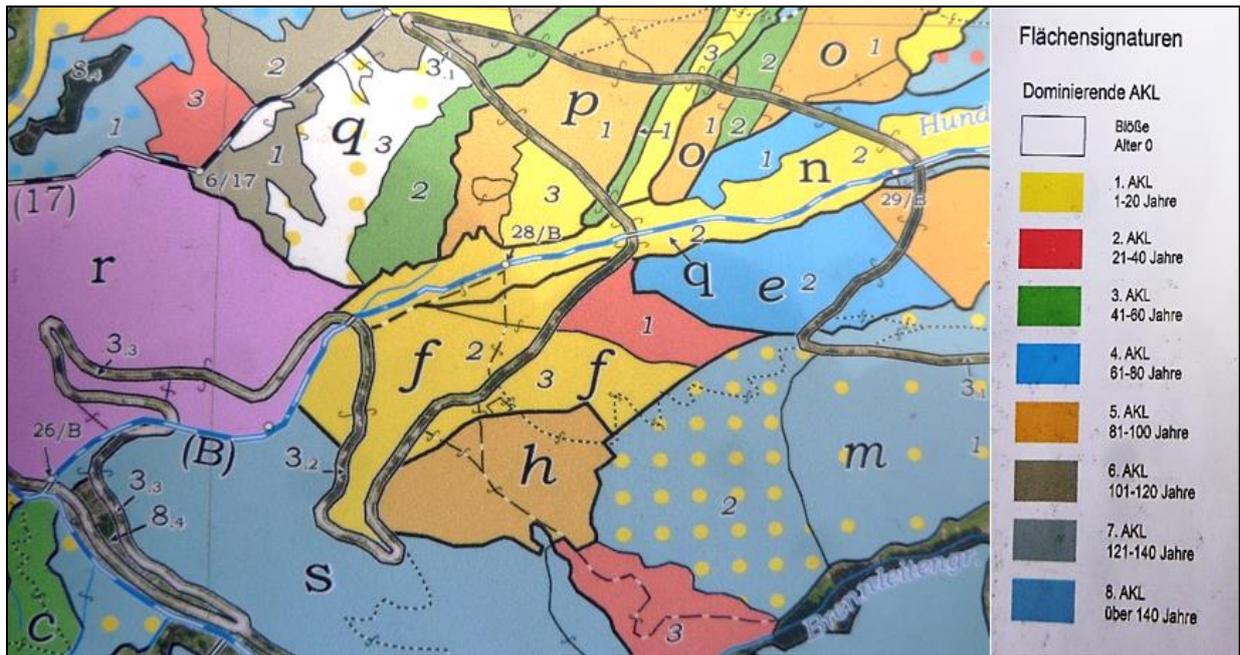


Abb. 9: Forstkarte (Stand 2014) mit Altersklassen. Beide Flächen (p und h) fallen in die 5. AKL und sind somit ca. 100 Jahre alt (Quelle: Forstkarte, ÖBf: FB172 Waldviertel-Voralpen, FR 09 Göstling, Revierteil 1720902 Göstling, Abteilungen 454-477, Blatt2. Maßstab 1:10000. Stand: 16.6.2014).

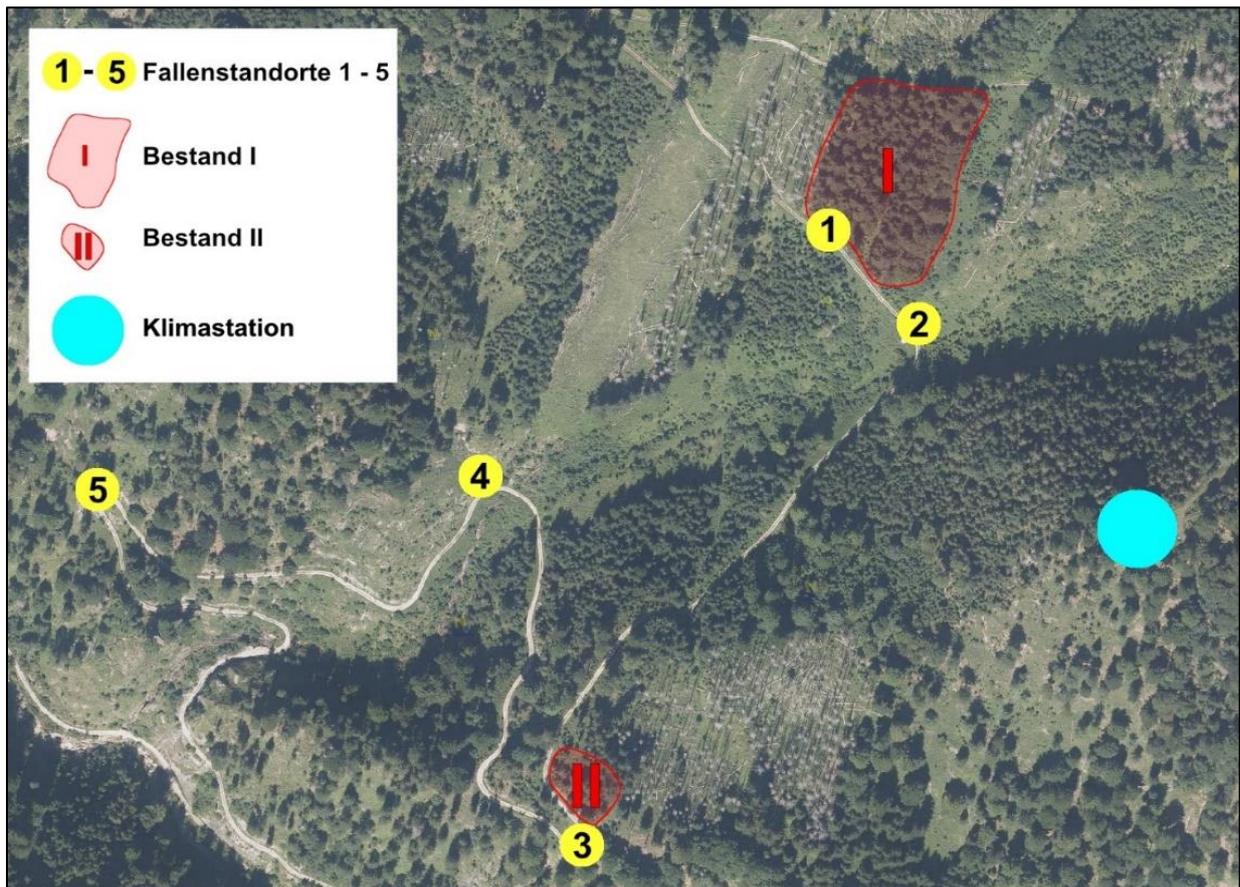


Abb. 10: Lage der Untersuchungsbestände I und II, der Fallenstandorte 1-5 und der Klimastation.

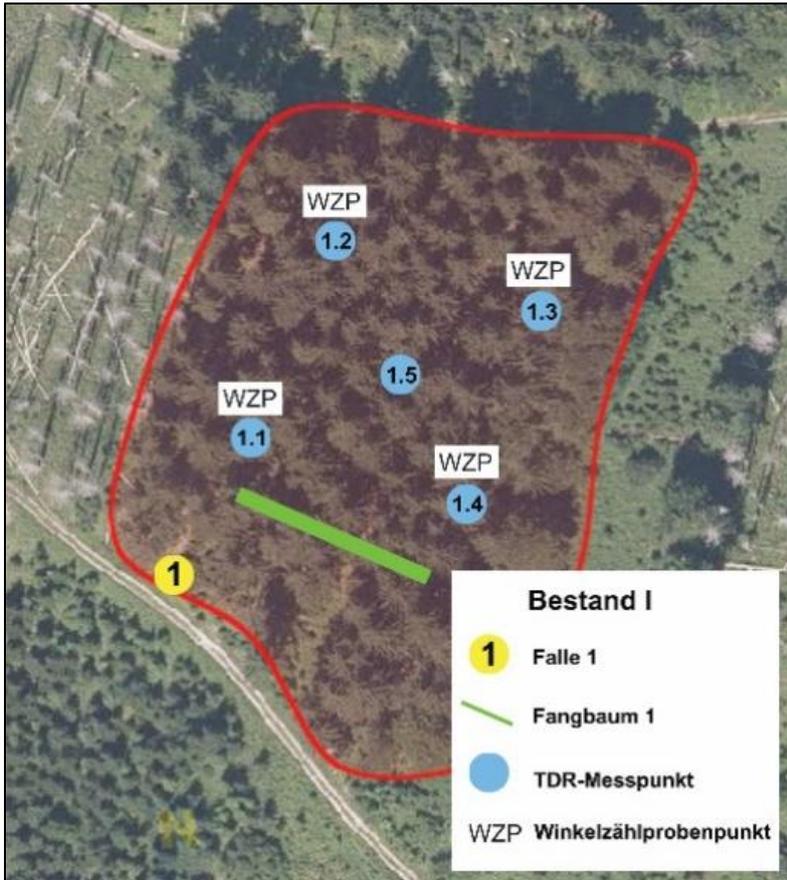


Abb. 11: Detailskizze von Bestand I mit den Positionen der TDR Messpunkte, der Winkelzählproben (WZP), des Fangbaumes und der automatischen Borkenkäferfalle.

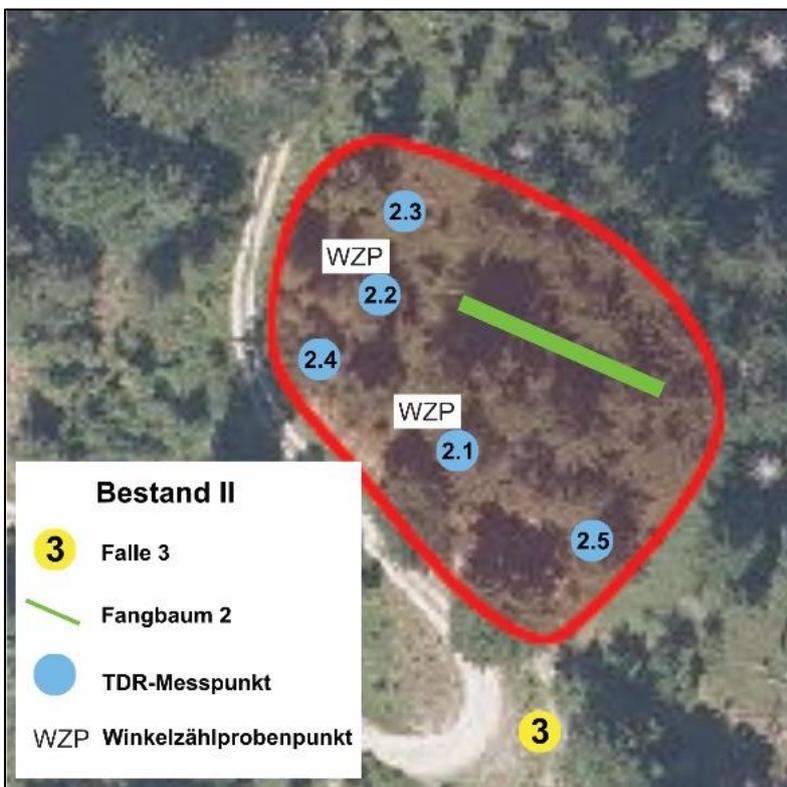


Abb. 12: Detailskizze von Bestand II mit den Positionen der TDR Messpunkte, der Winkelzählproben (WZP), des Fangbaumes und der automatischen Borkenkäferfalle.

2.3 Modellberechnungen (PHENIPS und TDEF)

Die Modellberechnungen von PHENIPS und TDEF basieren sowohl auf fixen als auch auf variablen Parametern, die jeweils für den Standort ermittelt, beziehungsweise dem Operat entnommen wurden. Die Parameter Seehöhe, Neigung, Exposition, Breiten- und Längengrad müssen beispielsweise im Modell an die standörtlichen Gegebenheiten angepasst werden (Tab. 2).

Tab. 2: Variable Parameter, die für den jeweiligen Bestand für PHENIPS-TDEF anzugeben sind

Parameter	Wertebereich	Einheit	Bezeichnung
ELEV_WS	variabel	m a.s.l.	Seehöhe Wetterstation
H_WS	variabel	m	Höhe Windsensor
ELEV	variabel	m a.s.l.	Seehöhe Bestand
SL	variabel	°	Neigung Bestand
SLAA	variabel	°	Exposition Bestand
LAT	variabel	°	Breitengrad
LONG	variabel	°	Längengrad
SM	variabel	°	Standard Meridian Zeitzone

Das Phänologiemodell PHENIPS simuliert auf Basis der täglichen Temperaturmittel und- maxima und der Globalstrahlung die minimale und die maximale Borkenkäferentwicklung für den Zeitraum vom 1. April bis zum 31. Oktober. Die Temperaturen oberhalb fixer Temperaturschwellenwerte für spezifische Entwicklungsschritte werden aufsummiert (Gradtage). Der Entwicklungsnullpunkt für die Gesamtentwicklung beträgt 8,3°C, die maximale Entwicklungsgeschwindigkeit (OPTTEMPDEV) wird bei einer Temperatur von 30,4°C erreicht, und der höchste Temperaturwert, bei dem Entwicklung noch möglich ist (MAXTEMPDEV) liegt bei 38,9°C. Der Schwärmflug beginnt erst bei 16,5°C. Für die Entwicklung von Ei bis Imago sind 557 Tagesgrade (dd) notwendig (Tab. 3). Der proportionale Entwicklungsschwellenwert für das Erreichen des Puppenstadiums kennzeichnet den Beginn der Geschwisterbrutanlage (Baier et al., 2007).

Tab. 3: Fixe Parameter, deren jeweilige Werte und Einheiten, die im Modell PHENIPS verwendet werden

Parameter	Wertebereich	Einheit	Bezeichnung
MINTEMPDEV	8,3	°C	Minimaltemperatur für Entwicklung
OPTTEMPDEV	30,4	°C	Temperatur für maximale Entwicklung
MAXTEMPDEV	38,9	°C	Temperaturobergrenze für Entwicklung
MINTEMPFLIGHT	16,5	°C	Minimaltemperatur für Schwärmflug
Kinf	140	dd	Anzahl an Gradtagen, die für das Schwärmen im Frühjahr notwendig sind
Kdev	557	dd	Anzahl an Gradtagen, die die für die Entwicklung Ei-Imago notwendig sind
sbT	0,5		Proportionaler Entwicklungsschwellenwert für das Verlassen der Brutsysteme
dIT	14	h	Tageslänge - Grenzwert für Reproduktion
PreiDEV	0,6		Proportionaler Entwicklungsschwellenwert für das Erreichen des Puppenstadiums

Für das Wasserhaushaltsmodell TDEF müssen die Höhe und der Leaf Area Index (LAI) des untersuchten Bestandes ermittelt werden, sowie die Bodenparameter Durchwurzelungstiefe, Restwassergehalt, Grobanteil und Sättigungswassergehalt. Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf oder mittleres Rückstrahlungsvermögen sind hingegen fixe Werte im Modell. Die folgende Tabelle beinhaltet alle fixen und variablen Parameter, die für die Simulation von TDEF erforderlich sind (Tab. 4).

Tab. 4: Fixe und variable Parameter für TDEF und deren Wertebereich und Einheit

Parameter	Wertebereich	Einheit	Bezeichnung
CH	variabel	m	Bestandeshöhe
LAI	variabel	m ² /m ²	Leaf Area Index Bestand; gewichteter Mittelwert Fichte/Nadel-/ Laubholz
LAIT	6	m ² /m ²	Schwellenwert LAI
imax	0,4	mm/LAI	Maximale Interzeptionskapazität pro Einheit LAI: Fichte und anderes Nadelholz, 40-60 Jahre
sf	100		LAI Reduktionsfaktor aerodynamischen Strömungsleitwert
gmax	0,002	m/s pro LAI	Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf pro Einheit LAI - alle Baumarten
REDvpd	1		Reduktions-Koeffizient für gmax bei Dampfdruckdefizit
Alb	0,05		mittl. Rückstrahlvermögen (solar albedo) des Bestands (Krone, Boden) - Fichte
k	0,3		Lichtverlustkoeffizient für die Baumkrone pro Einheit LAI
RD	variabel	mm	Durchwurzelungstiefe
ALPHA	variabel	cm	Lufttrittsdruck des Bodens
LAMDA	variabel		Parameter für die Verteilung des unimodalen Boden-Porenvolumens
THETA_R	variabel	m ³ /m ³	Restwassergehalt des Bodens
THETA_S	variabel	m ³ /m ³	Sättigungswassergehalt des Bodens
STONE	variabel	m ³ /m ³	Grobanteil Boden
Ht	100		Wurzelaufnahmeparameter
H50	2000	cm	Bodenwasserpotential, bei dem Wasseraufnahme durch Wurzeln um 50% reduziert ist
EXP	1,15		Wurzelaufnahme-Parameter Exponent

Das Modell TDEF startet, wenn die Temperatur an fünf aufeinanderfolgenden Tagen 5°C überstiegen hat und somit eine Schneelage ausgeschlossen ist, ansonsten am 1. April. Annahmen sind, dass zu diesem Zeitpunkt der Bodenwassergehalt dem volumetrischen Wassergehalt bei Feldkapazität entspricht (d.h. der Boden ist wassergesättigt) und die Interzeption Null ist. Stündlich werden die Strahlungsbilanz am Boden und in der Krone, sowie die Interzeptionsdynamik berechnet. Die potentielle Evaporation des Regenwassers, das in den Kronen zurückgehalten wird, ergibt sich für TDEF aus einer Variante der Penman-Monteith Gleichung (Monteith & Unsworth, 2008). Die Interzeption ist bestimmt durch den Blattflächenindex (LAI) und den Feuchtigkeitszustand der Kronen.

Das Bodenwasserpotential errechnet TDEF mit der umgekehrten Brooks-Corey Funktion aus den bodenphysikalischen Parametern als Eingangsvariablen, die über die Pedotransferfunktionen nach

Rawls & Brakensiek (1989) bestimmt wurden (Brooks & Corey, 1964). Über diese Simulationsschritte ermittelt TDEF den tatsächlichen Bestandesniederschlag und kann somit die stündliche potentielle und aktuelle Transpiration des Bestandes, die Evapotranspiration des Bodens und letztendlich auch dessen Wassergehalt modellieren (Matthews et al., 2018). Die für diese Arbeit relevanten Ausgangsparameter des TDEF Modells sind:

SWC (Volumetrischer Bodenwassergehalt in %) und

TDEF (Transpirationsdefizit in mm = Potentielle – aktuelle Transpiration).

2.4 Bestandesparameter

Die Aufnahme der Bestandesparameter im Bestand I und II erfolgte einmalig. Eine Übersicht über die erhobenen Merkmale und angewandten Erhebungsmethoden liefert Tab. 5. Bestandeshöhe und Blattflächenindex (LAI) fließen direkt in das Wasserbilanzmodell TDEF ein. Auf die Erhebung dieser Werte wird im Folgenden einzeln eingegangen und anschließend auf deren Ableitung aus den Operatsdaten.

Tab. 5: Bestandesparameter und deren Aufnahmemethode

WICHTIGE PARAMETER	
Bestand	Methode
Baumartenanteile, insb. Fichtenanteil (%)	Winkelzählproben
Bestandesalter (Jahre)	Forstkarte, (Jahrringe), Schätzung
Schlussgrad (%)	Winkelzählproben
Anzahl Schichten	Visuell
Bestandeshöhe / Oberhöhe (m)	Winkelzählproben
BHD (cm)	Winkelzählproben
Wasserhaushalt nach Standort/Vegetation	Vegetationszeiger (Ellenberg et al., 1992)
Leaf Area Index (LAI)	Hemisphärische Fotografie

2.4.1 Bestandeshöhe

Im Bestand I wurden 4 Winkelzählproben (WZP) durchgeführt (Abb. 11), im Bestand II waren aufgrund der geringeren Fläche nur zwei möglich (Abb. 12). Die Winkelzählproben wurden nach standardisierter Vorgehensweise (Bitterlich, 1948) mit Zählbreite 4 durchgeführt. Es wurden Brusthöhendurchmesser, Grundfläche und Vorrat, sowie Bonität und Bestockungsgrad des jeweiligen Bestandes ausgewertet. Für das Model TDEF wurde die Bestandeshöhe bestimmt. Dabei wurde die Höhe des Zentralstammes an jedem Probepunkt gemessen. Für die Auswertung wurde die Ertragstafel Fichte Bruck aus Marschall (1988) verwendet.

2.4.2 Blattflächenindex (LAI)

$$\text{LAI} = \frac{\text{BLATTFLÄCHE DES BESTANDES}}{\text{GRUNDFLÄCHE DES BESTANDES}} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} \right)$$

Der Blattflächenindex (Leaf Area Index) beschreibt das Verhältnis der gesamten Blattoberfläche eines Bestandes zur gesamten Bestandesgrundfläche. Er geht als Variable in das Modell TDEF mit ein, denn die Wasserversorgung eines Waldökosystems setzt sich neben dem Bodenreservoir aus dem Reservoir in der Krone zusammen, welches vom LAI und der potentiellen Interzeption pro Einheit LAI bestimmt wird.

Der Blattflächenindex für die Bestände I und II wurde mittels Hemisphärischer Fotografie bestimmt (Rich, 1990; Chianucci & Cutini, 2012). Eine alternative Methode wäre die Auswertung von Fernerkundungsdaten oder die Anwendung von Lichtmessern, um das Verhältnis von gesamter und im Bestand gemessener Strahlung, und aus diesem den LAI ableiten zu können. Eine sehr aufwändige Methode ist die Entnahme von Astproben im Bestand und die Bestimmung der Blattfläche an Teilproben über die spezifische Blattfläche [cm^2/g Trockensubstanz]. Dafür werden von Probeästen Nadel- bzw. Blattproben entnommen, ihre Masse sowie ihre Fläche bestimmt und anschließend über die Astbasisdurchmesser auf den gesamten Baum bzw. den gesamten Bestand hochgerechnet. Schließlich erhält man über die Division durch die Bestandesgrundfläche den LAI (Helmschrot 1999).

Für die Ermittlung des LAI in dieser Arbeit wurden an den WZP-Punkten der Bestände I und II Fotos der Baumkronen gemacht (Abb. 13), insgesamt 7 verschiedene Aufnahmen. Wichtige Voraussetzungen für die hemisphärische Fotografie sind gleichmäßige Lichtbedingungen am Himmel und kein Überstrahlen durch Sonnenlicht, also sollten Fotos idealerweise bei bedecktem Himmel oder vor bzw. nach Sonnenauf- bzw. untergang aufgenommen werden (Rich, 1990). Fotografiert wurde am 20. August 2018 vor Sonnenaufgang mit einem Nikon-Fischaugenobjektiv (ExDG Fisheye 8mm 1:3:5) an einer Canon EOS 5D und entsprechender Stativvorrichtung. Wichtig für diese Aufnahmen ist, dass die Rahmenbedingungen und Abläufe immer gleich sind. Jedes Bild muss eingenordet aufgenommen werden, dafür muss die Kameraoberkante bei der Aufstellung mit dem Kompass nach Norden zeigen. Die Bildebene muss genau horizontal liegen (Jonckheere et al., 2004), dies wird durch die kardanische Aufhängevorrichtung am Stativ gewährleistet. Neben einer gleichmäßigen Bedeckung des Himmels ist darauf zu achten, dass es windstill ist, denn wenn sich Äste und Zweige bewegen, wird das Bild unscharf und kann nicht mehr ausgewertet werden. Harte Kontraste vereinfachen die Schwellenwertfestlegung bei der Bildauswertung (Inoue et al., 2011). Bei immer gleichen Einstellungen (ISO bei 400, Blende bei 3,5 und Weißausgleich automatisch, Blitz aus, Auflösung 4608 x 3072) wurden von jedem Punkt mindestens 3 Fotos unterschiedlicher Belichtungszeit aufgenommen. Dadurch konnten die Auswirkungen dieser Variationen verglichen und das für eine weitere Auswertung beste Foto ausgewählt werden. Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl war, dass die Bilder nicht überstrahlt waren, was zu einer verfälschten Interpretation der tatsächlichen Blattfläche führen würde. Die optimalen Bilder waren immer diejenigen, die tendenziell unterbelichtet waren.



Abb. 13: Beispiel für ein unbearbeitetes Hemi-Foto vom WZP Punkt 4 im Bestand I.

Auswertung mit dem Programm HEMIVIEW 2.0

Bei horizontaler Bildebene und eingenordeten Fotos lässt sich mit dem Programm HEMIVIEW 2.0 (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) der Leaf Area Index berechnen. Nachdem das für die Auswertung am besten geeignete Bild ausgewählt wurde, wurde es im Programm bearbeitet und der Kontrast erhöht. Die Darstellung erfolgt in Schwarz/Weiß. Da sich die Auswertung auf die Unterscheidung schwarzer und weißer Bildpunkte bezieht, ist die richtige SchwellenwertEinstellung entscheidend für das Ergebnis (Fournier et al., 2017). Sie wurden manuell angepasst, im permanenten Vergleich zur Originalaufnahme. Dann musste der Bildwinkel eingegrenzt werden, da sonst der Wert für den LAI verzerrt wäre. Denn aufgrund der starken Geländeneigung war an einer Bildseite das Felsmassiv des Dürrensteins auf den Aufnahmen zu sehen (Abb. 13). Des Weiteren verfälschen auch die Stämme der Bäume den LAI, da sie sich durch das starke Weitwinkelobjektiv zur Bildmitte neigen und vom Programm als dunkle Bereiche in die Berechnung des LAI mit eingerechnet werden. Somit mussten äußere Bereiche des Bildes abgedeckt und nur das Zentrum zur Berechnung (knapp 40° Zenitwinkel) des LAI verwendet werden. Nur ein derartiges Vorgehen garantiert plausible Ergebnisse.

2.4.3 Bestandesparameter aus dem Operat

Die Daten aus dem Operat der Bundesforste (Forstbetrieb 172 Waldviertel-Voralpen, Forstrevier 9 Göstling) sind fast 20 Jahre alt und werden aufgrund der Umwidmung der Flächen zum Wildnisgebiet nicht mehr aktualisiert. Das Operat liefert einerseits Informationen über die Baumartenzusammensetzung (Bestockungsgrad und Ertragsklasse je Baumart) und andererseits über die Schichtung der Bestände (Anzahl und Alter der Schichten sowie Bestockungsgrad nach Schichten).

Die Höhe der Fichten wurde aus der Altersangabe des Operats mit der Ertragstafel (Fichte Bruck) und Ertragsklasse berechnet (im ersten Bestand gibt das Operat eine Ertragsklasse von 10 und im zweiten eine von 4 an). Die Höhe wird als Parameter „Bestandeshöhe“ im Modell TDEF verwendet. TDEF benötigt die Bestandeshöhe zur Berechnung des aerodynamischen Widerstands gegen den Wasserdampf-Austausch in der Krone.

In den Operatsdaten finden sich weder Messungen noch Berechnungen des LAI. Die Möglichkeit mittels allometrischer Funktionen den LAI zu berechnen, ist aufgrund fehlender Information über die aktuelle (IST) Bestandesgrundfläche und die BHD Verteilung nicht möglich. Um den Blattflächenindex aus den Informationen des Operates abzuleiten, wurde hier das gleiche Verfahren angewandt wie in Netherer & Pennerstorfer (2018) beschrieben. Es besteht eine einfache Beziehung zwischen Alter und LAI, die Yu et al. (2015) für ein hydrologisches Modell auf Basis einer mehrjährigen Untersuchung in einem Fichtenbestand hergeleitet haben. Diese polynomische Funktion wurde um zusätzliche Datensätze für Fichte erweitert (LAI_Woody_Plants, <https://earthdata.nasa.com>), um die der Funktion zugrundeliegende Stichprobenanzahl zu erhöhen (Abb. 14). Besonders in Altersklassen bis 40 Jahre ist die Streuung beim LAI hoch, was in dieser Arbeit keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat, da die untersuchten Bestände viel älter sind. Im Alter 100 decken sich die Funktion nach Yu et al., 2015 und der erweiterte NASA Datensatz. In hohen Bestandes-Altersklassen nehmen die Werte für den LAI wieder stark ab, weshalb eine Untergrenze von LAI = 4 für Bestände älter als 165 Jahre angenommen wurde (Netherer & Pennerstorfer, 2018).

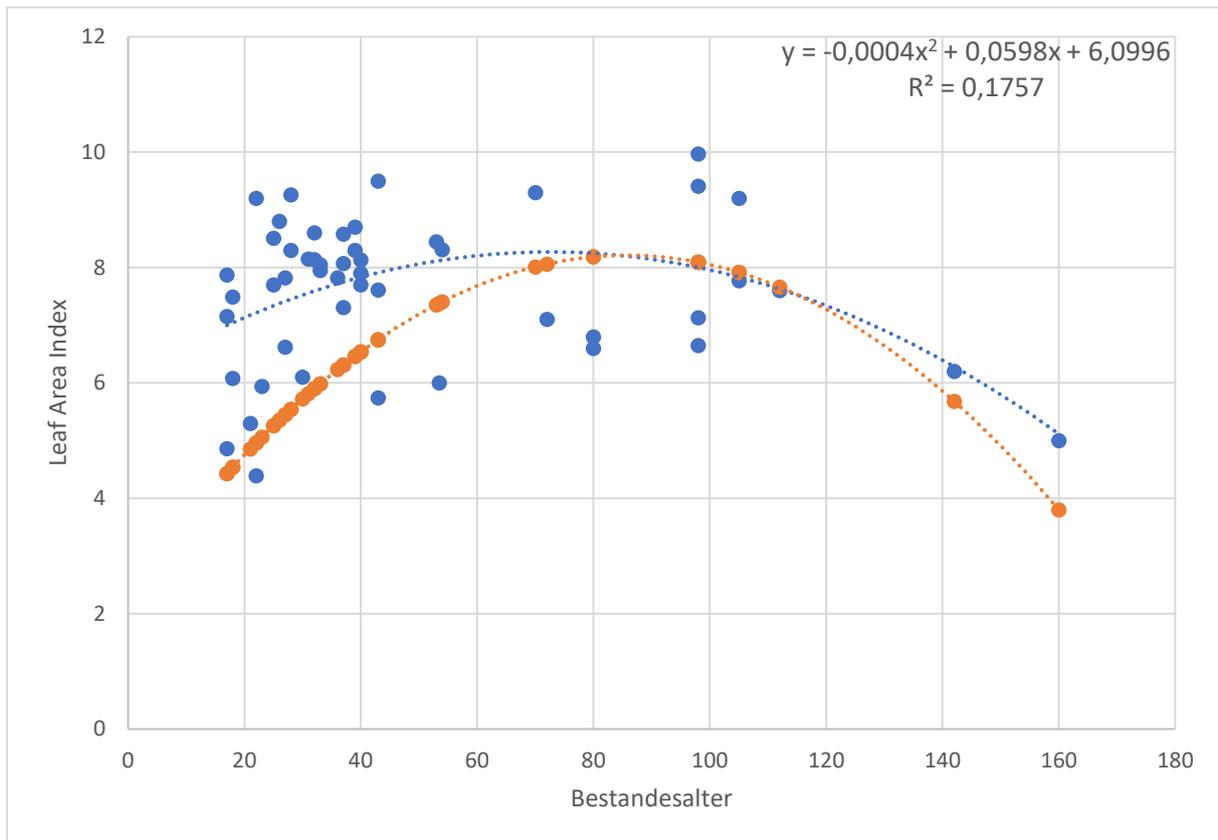


Abb. 14: Zusammenhang zwischen Bestandesalter und LAI. Funktion nach Yu et al., 2015 (rote Punkte), erweiterter NASA Datensatz (earthdata.nasa.com) (blaue Punkte).

2.5 Klimadaten

Aus der mittleren täglichen Lufttemperatur und der Solarstrahlung errechnet das Modell PHENIPS die tägliche mittlere und maximale Rindentemperatur, da zwischen Temperatur der Rinde sowie der Umgebungsluft und der Globalstrahlung ein signifikanter linearer Zusammenhang besteht (Baier et al., 2007). Eine wirklichkeitsnahe Simulation der Borkenkäferphänologie ist nur auf Basis genauer Lageinformation, insbesondere in Bezug auf Seehöhe und Exposition des Bestandes möglich.

Niederschlag sowie Wind und relative Luftfeuchtigkeit, zwei maßgebliche Treiber der Verdunstung, sind wichtige Eingangsgrößen für das Trockenstressmodell TDEF (Tab. 6).

Tab. 6: Erforderliche Klimadaten für die Modelle PHENIPS und TDEF und deren Messmethoden

WICHTIGE PARAMETER		
Klima	Methode	Modell
Temperatur (°C)	Widerstandsthermometer	PHENIPS, TDEF
Niederschlag (mm)	Kippwaage (Ombrometer)	TDEF
Rel. Luftfeuchtigkeit (%)	Absorptions-Hygrometer	TDEF
Solarstrahlung (W/m ²)	Pyranometer	PHENIPS, TDEF
Wind (m/s)	Schalenanemometer	TDEF

Am oberen Ende der Forststraße in der Hundsau, auf ca. 1000 m Seehöhe, befindet sich seit mehreren Jahren eine Klimastation der Firma Bogner&Lehner OG. Deren Position ist auf der Lageskizze (Abb. 10) eingezeichnet. Die Temperatur-, Niederschlags-, Feuchtigkeits- und Globalstrahlungswerte der Vegetationsperiode 2018 wurden täglich per GPRS-Funk von der Station übertragen und für die Modellberechnungen von PHENIPS und TDEF herangezogen. Aufgrund eines Defektes wurden die Niederschlagsdaten letztendlich von einer nahegelegenen anderen Station übernommen (siehe Kapitel 3.3.1).

2.6 Bodenparameter

Das Wasserbilanzmodell TDEF verlangt möglichst genaue Werte für jene Parameter, die die Wasserspeicherkapazität des Bodens charakterisieren. Eine Übersicht über die Variablen und die jeweilige Aufnahmemethode findet sich in Tab. 7. Bodentyp, Gründigkeit und Durchwurzelungstiefe, sowie Grobanteil des Bodens wurden direkt in den Beständen erhoben. Für die Bestimmung der Bodenart wurden Proben an den Standorten genommen und Laboranalysen durchgeführt.

Der Bodenwassergehalt (SWC) beider Bestände wurde periodisch an mehreren Punkten (Abb. 11, Abb. 12) gemessen, und als Vergleichswerte für die simulierten Werte herangezogen.

Tab. 7: Übersicht erforderlicher Boden-Parameter und deren Aufnahmemethoden

WICHTIGE PARAMETER		
Boden	Methode	Modell
Bodentyp	Bodenansprache	TDEF
Bodenart	Fingerprobe, Korngrößenanalyse im Labor	TDEF
Gründigkeit (cm)	Ansprache vor Ort (Bohrungen)	TDEF
Durchwurzelungstiefe, RD (cm)	Ansprache vor Ort: Profile und Wurzelteller	TDEF
Grobanteil, STONE (%)	Ansprache vor Ort	TDEF
Bodenwassergehalt, SWC (%)	TDR Messungen, mind. zweiwöchentlich	TDEF

2.6.1 Bodencharakteristika vor Ort

Die Bodenart wurde im Gelände mittels Fingerprobe angesprochen. Bei der Begehung der Bestände am 29.05.2018 wurden mehrere Bodenprofile gegraben und Bodentyp, Horizontmächtigkeiten und Skelettgehalt (Grobanteile > 2mm) angesprochen. Die Masse und der organische Gehalt der Humusaufgabe wurden geschätzt. Angerissene Bodenprofile an den Straßenböschungen gaben zusätzlichen Einblick in den Bodenaufbau. Auch die Wurzelteller windgeworfener Fichten eigneten sich dafür, die Durchwurzelungstiefe zu messen oder den Skelettanteil abzuschätzen. Die Gründigkeit wurde mit dem Schlagbohrer ermittelt. Je Bestand wurde ca. zwanzigmal eingeschlagen und daraus ein Mittelwert berechnet.

2.6.2 Bodenphysikalische Parameter aus Bodenproben und Korngrößenanalyse

In beiden Beständen wurden an der geöffneten Profilwand von jedem genetischen Bodenhorizont Proben für die Korngrößenanalyse gewonnen, die im Labor des Instituts für Geologie (BOKU) durchgeführt wurde. Aus der Bodenart lassen sich relevante bodenphysikalischen Eingangsparameter, die für das Modell TDEF nötig sind, über die Pedotransferfunktionen nach Rawls & Brakensiek (1989) ableiten. Pedotransferfunktionen bieten die Möglichkeit, wichtige Bodeneigenschaften aus einfach bestimmbareren Eigenschaften wie der Bodenart (Sand, Lehm, Schluff und Ton) abschätzen zu können. Mit deren Hilfe wurden sowohl der Sättigungswassergehalt (THETA_S) und Restwassergehalt (THETA_R), als auch die Verteilung des unimodalen Porenvolumens (LAMBDA) und der Lufteintrittsdruck des Bodens (ALPHA) abgeleitet. Diese vier bodenphysikalischen Parameter sind entscheidende Kenngrößen im Wasserbilanzmodell TDEF.

2.6.3 Bodenphysikalische Parameter aus dem Operat

In der Sachdatentabelle „Waldorte“ des Operats finden sich für die Standortseinheiten jeder Unterabteilung neben Informationen zur Geologie, Wasserhaushalt, Bodengründigkeit und Vegetation, auch Hinweise auf die Bodenart (schluffig, sand- oder tonreich), den Bodentyp (beispielsweise Braunerde oder Podsol) und den Skelettanteil.

Die Zuordnung zu einer Texturklasse (Sand, Lehm, Schluff, Ton) erfolgte gutachterlich laut den oben genannten Beschreibungen im Operat (Tab. 8) (Netherer & Pennerstorfer, 2018). Entsprechend den Pedotransferfunktionen von Rawls & Brakensiek (1989) wurden die Parameter Sättigungswassergehalt (THETA_S), Restwassergehalt (THETA_R), Lufteintrittsdruck des Bodens (ALPHA) und Verteilung des unimodalen Porenvolumens (LAMBDA) aus der Texturklasse hergeleitet (Tab. 9).

Die Herleitung von Grobanteil (STONE) und Durchwurzelungstiefe (RD) aus den Operatsdaten erfolgte ebenfalls nach Netherer & Pennerstorfer (2018): Beim Grobanteil wurden den Angaben des Operats zum Skelettreichtum der jeweiligen Standortseinheit Werte zugeordnet, die sich an den bodenkundlichen Grundbegriffen des BFW orientieren. Dadurch wurde ein konkreter prozentueller Grobanteil abgeleitet, wie er für das Modell TDEF erforderlich ist (Tab. 10). Zwecks Herleitung der Durchwurzelungstiefe wurden den Angaben zur Gründigkeit der Standortseinheiten Werte in Millimetern zugeordnet (Tab. 11).

Tab. 8: Die Standortstypen aus dem Operat (Standortseinheiten 1-97) und deren Zuordnung zu den Texturklassen Sand, Schluff, Lehm oder Ton (Netherer & Pennerstorfer, 2018)

Textur	Text	SE_Nr.	Öbf Standort_Beschreibung (Waldorte)
Sand	1	5	Bachauenstandort
		11	Feinerdearmer Rendzinastandort
		12	Blockhaldenstandort
		13	Felssteilhangstandort
		14	Trockener, feinerdearmer Rendzinastandort in ausgesetzter warmer Lage (nur WiWa)
		22	Mittelgründiger, skelettreicher Karbonatstandort
		25	Mäßig trockener, schwach mittelgründiger Rendzinastandort (nur WiWa)
		58	Karrenstandort
		61	Nährstoffarmer, mäßig gründiger Standort
		62	Felssteilhang- und Blockhaldenstandort
		64	Serpentin-Trockenstandort
		65	Mäßig trockener Podsol-Standort über Schotter
		66	Lagebedingter Trockenstandort (nur WiWa)
		73	Mäßig frischer, saurer Standort in warmer Oberhanglage
		74	Mäßig frischer, saurer Standort in warmer, vorwiegend sonnseitiger oder flacher Hanglage
		76	Mäßig frischer saurer Oberhangstandort
		83	Mäßig frischer bis frischer, skelettreicher ST in vorwiegend sonnseitiger oder flacher Lage
		84	Mäßig frischer, skelettreicher Standort in vorwiegend schattseitiger oder flacher Lage
		86	Frischer, sandreicher Hangstandort
98	Sehr frischer, sandreicher Verebnungsstandort (nur WiWa)		
Schluff	2	1	Vernäßter, wasserzügiger Standort
		2	Anmooriger Standort
		3	Grabenwaldstandort mit Rutsch tendenz
		8	Bachrandstandort
		9	Vernäßter Auboden
		21	Schwach mittelgründiger, mäßig frischer Karbonatstandort
		23	Mittelgründiger mäßig feinerdereicher Karbonatstandort
		26	Mäßig frischer, mittelgründiger Rendzinastandort (nur WiWa)
		27	Mäßig frischer bis frischer, mäßig feinerdereicher Karbonatstandort (nur WiWa)
		55	Gebirgsauenstandort im unmittelbaren Grundwassereinflußbereich
		56	Mäßig grundwasserbeeinflußter Talalluviumstandort
		57	Gebirgsauenstandort mit stagnierendem Grundwasser
		71	Mäßig nährstoffreicher, mäßig frischer Hangstandort
		72	Mäßig nährstoffreicher, frischer Hangstandort
		75	Mäßig frischer, saurer Standort in warmer, vorwiegend schattseitiger oder flacher Hanglage
88	Frischer (im Wienerwald schattseitiger) Hangstandort		
91	Verebnungslage mit Wasserstautendenz		
Lehm	3	4	Kalkbeeinflußter Standort
		31	Tiefgründiger, humusreicher Karbonatstandort
		34	Mäßig frischer, feinerdereicher Karbonatstandort
		36	Frischer, feinerdereicher Karbonatstandort
		42	Tiefgründiger Standort mit Kieselskelett
		54	Tiefgründiges, feinerdereiches unreifes Kolluvium
		81	Frischer nährstoffreicher Braunerdestandort
		82	Sehr frischer Unterhangstandort
		85	Frischer bis sehr frischer Unterhangstandort
		87	Frischer, sonnseitiger Hangstandort (nur WiWa)
		89	Sehr frischer schattseitiger Hangstandort
		92	Mäßig frischer Staublehmstandort
93	Frischer Staublehmstandort		
94	Sehr frischer Staublehmstandort		
Ton	4	6	Feuchter, tonreicher Verebnungsstandort
		7	Naßgallenstandort
		28	Mäßig frischer, tonreicher Karbonatstandort in warmer Lage (nur WiWa)
		32	Tiefgründiger, skelett- und tonreicher Karbonatstandort
		33	Tiefgründiger, tonreicher, skelettarmer Karbonatstandort
		35	Mäßig frischer, tonreicher Karbonatstandort (nur WiWa)
		37	Frischer, sehr tonreicher Karbonatstandort
		41	Tiefgründiger, skelettarmer, tonreicher, im Oberboden kalkarmer Standort
		43	Frischer, sehr tonreicher Standort (nur WiWa)
		44	Sehr frischer, sehr tonreicher Standort (nur WiWa)
		51	Vernäßter, tonreicher, wasserzügiger Standort
		52	Vernäßter anmooriger Standort
		53	Tonreiche, zum Teil vernäßte Rutschflächen
		95	Sehr Staunasser Staublehmstandort
		96	Sehr frischer, tonreicher Verebnungsstandort
97	Feuchter, tonreicher Unterhangstandort		

Tab. 9: Herleitung der bodenphysikalischen Parameter für die Gleichung nach Brooks und Corey (1964): Sättigungswassergehalt (THETA_S), Restwassergehalt (THETA_R), Lufteintrittsdruck des Bodens (ALPHA) und Verteilung des unimodalen Porenvolumens (LAMBDA) nach Texturklasse entsprechend den Pedotransferfunktionen von Rawls & Brakensiek (1989) nach Netherer & Pennerstorfer (2018)

Texturklasse (Text)	THETA_S	THETA_R	ALPHA	LAMBDA
Sand	0,437	0,028	0,126	0,533
Schluff	0,431	0,084	0,036	0,204
Lehm	0,472	0,028	0,069	0,251
Ton	0,475	0,062	0,029	0,136

Tab. 10: Herleitung des Grobanteils (STONE, %) durch Interpretation von Operatsangaben (SE= Standortseinheiten, Waldorte) nach Netherer & Pennerstorfer (2018)

SE (Waldorte)	Bodenkundliche Grundbegriffe (BFW)		STONE (%)
skelettarm	gering	0-10 %	0,06
mittel	mäßig bis hoch	10-40 %	0,20
skelettreich	sehr hoch	40-70 %	0,45
sehr skelettreich	vorherrschend	> 70 %	0,70

Tab. 11: Herleitung der Durchwurzelungstiefe (RD, mm) durch Interpretation der Operatsangaben der Bundesforste (SE= Standortseinheiten, Waldorte) zur Bodengründigkeit der Standortseinheiten, nach Netherer & Pennerstorfer (2018)

Grund	RD (mm)
seichtgründig (1)	300
schwachgründig (2)	400
mittelgründig (3)	600
gründig (4)	800
tiefgründig (5)	900

2.6.4 Periodisch gemessene volumetrische Bodenwassergehalte

In beiden Beständen wurden an jeweils 5 Positionen Time Domain Reflektometry (TDR) – Messfühler, so genannte wave guides, in der Länge von 30 cm installiert. An jedem dieser 5 Messpunkte wurde jeweils ein Paar NiCr-Stahl Stäbe in einem genau vorgegebenen Abstand im Boden versenkt.

Der Bodenwassergehalt (SWC, %) wurde zumindest zweiwöchentlich an allen 10 Punkten gemessen (siehe Detailskizzen Abb. 11 und Abb. 12). Dabei wurde darauf geachtet, dass das letzte Niederschlagsereignis zumindest einen Tag zurücklag. So war sichergestellt, dass die schnelle Wasserbewegung im Boden zum Erliegen gekommen war. Die Messungen wurden an insgesamt 10 Terminen zwischen 29. Mai und 5. September 2018 durchgeführt. Die Funktionsweise der TDR-Messung beruht auf dem Prinzip, dass sich die dielektrische Leitfähigkeit eines Mediums stark und annähernd linear mit seinem Wassergehalt ändert. Aus der Geschwindigkeit, mit der sich ein ausgesandter elektromagnetischer Impuls in der Bodenmatrix ausbreitet, lässt sich also deren Wassergehalt berechnen, wenn der Abstand zwischen den Messfühlern konstant ist (Trase, Operating Instructions, 1996). Die fünf Messwerte pro Bestand wurden für jeden Messtermin gemittelt.

2.7 Monitoring des Schwärmflugs und der Entwicklung von *Ips typographus*

2.7.1 Automatische Pheromonfallen

Für den Vergleich der Simulationsergebnisse von PHENIPS in Bezug auf Buchdrucker-Schwärmzeiten und Entwicklungsfortschritt der Bruten über die Saison 2018 mit tatsächlichen Erhebungsdaten wurden automatisierte Pheromonfallen aufgestellt, mit Pheromondispensern bestückt und regelmäßig entleert. Um den tatsächlichen Entwicklungsfortschritt der Bruten zu kontrollieren, wurden regelmäßig Fangbaumkontrollen durchgeführt und die Brutentwicklung vor Ort dokumentiert (Tab. 12). So lassen sich beobachtete und simulierte Daten auf Übereinstimmung hin überprüfen.

Tab. 12: Übersicht der erhobenen Daten beim Monitoring des Buchdruckers

WICHTIGE PARAMETER	
Monitoring von <i>Ips typographus</i>	Methode
Fallenfänge - Automatisierte Pheromonfallen	Wöchentliche Entleerung der Fallen, Auszählung Buchdrucker
Beifänge	Wöchentliche Entleerung der Fallen, Bestimmung der Familie/Art
Entwicklungsstand der Bruten	Kontrolle an windgeworfenen Fangbäumen auf Standort 1+2
Stehendbefall	Visuelle Ansprache (Verbräunung der Krone, Bohrmehl am Stammfuß)

Die Straße durch den Hundsaugraben wird nicht mehr gewartet und ist auf Grund umgestürzter Käferbäume nicht mehr bis zum oberen Ende befahrbar. Pheromonfalle 1 wurde am höchsten noch per PKW erreichbaren Punkt aufgestellt, die weiteren Fallenstandorte 2-5 befanden sich an sukzessive tiefer gelegenen Stellen direkt an der Forststraße (siehe Lageskizze, Abb. 10 und Tab. 13). Ab Aufstellungszeitpunkt wurden die Pheromonfallen regelmäßig in Wochenabständen kontrolliert. Der automatisierte Fallentyp wurde speziell für das IFFF von der Firma Bogner & Lehner entworfen, um Fallenfänge bestimmten Tagen zuordnen zu können. Ein Auffangbehälter dreht sich batteriebetrieben täglich um eine Position weiter. Im Zuge der Kontrollen im Wildnisgebiet wurden die Batterien der Fallen regelmäßig ausgewechselt und diese auf Funktionstüchtigkeit überprüft. Die gefangenen Insekten wurden eingesammelt, ggf. mit Essigäther (Essigsäureethylester) abgetötet, bestimmt und ausgezählt. Der synthetische Lockstoff Pheroprax (BASF) musste je nach Witterungsverhältnissen alle 4-6 Wochen erneuert werden.

Tab. 13: Seehöhen der 5 Fallenstandorte

	Falle1	Falle 2	Falle 3	Falle 4	Falle 5
Seehöhe (m)	900	890	860	820	790

2.7.2 Fangbaumkontrollen

Tab. 14: Merkmale zur Position der Fangbäume 1 und 2. Die Lage der Fangbäume entspricht der Lage von Bestand I und II

	Fangbaum 1	Fangbaum 2
Seehöhe (m)	925	870
Exposition	SSW	SSW-W
Hangneigung (%)	36	20
Überschirmung	Locker-geschlossen	Locker-geschlossen
Vorlagezeitpunkt	Oktober 2017	Oktober 2017
Ort	In Bestand I	In Bestand II

In den Beständen I und II wurden im Oktober 2017 Fichten durch den Orkan „Herwart“ geworfen, die im Untersuchungszeitraum noch fängisch waren und sich deshalb gut als Fangbaum eigneten (Tab. 14). Bei jedem Kontrollgang wurde die Rinde an mehreren Stellen der Fangbäume mit einem Stemmeisen geöffnet und der aktuelle Entwicklungsfortschritt, unter Zuhilfenahme von Maßband und Lupe untersucht. Bei jeder Kontrolle wurde der maximale Entwicklungsfortschritt der Bruten festgestellt, um einen Vergleich mit den Berechnungen von PHENIPS zu ermöglichen. Da sich der Befallsbeginn und die Entwicklungsgeschwindigkeit der Bruten an Fangbäumen je nach Stammposition und Sonnenexposition unterscheidet, wurde die Rinde an mehreren Stellen im unteren, mittleren und oberen Stammbereich geöffnet und Kontrollen hinsichtlich vorhandener Rammelkammern, Muttergänge, Ei-, Larven-, und Puppenstadien durchgeführt. Bei jeder Begehung der Flächen wurde zusätzlich auf etwaigen neuen Stehendbefall geachtet.

3. Ergebnisse

3.1 Bestandesparameter

Das folgende Luftbild (Abb. 15) zeigt die Standortseinheiten, in die Bestand I und II fallen, wie sie von den Österreichischen Bundesforsten für das Operat zusammengefasst wurden. Die Fläche, in die der Bestand II fällt, ist sehr groß und inhomogen. Süd- und südwestlich des Bestands geht diese Fläche in Steilgelände über.

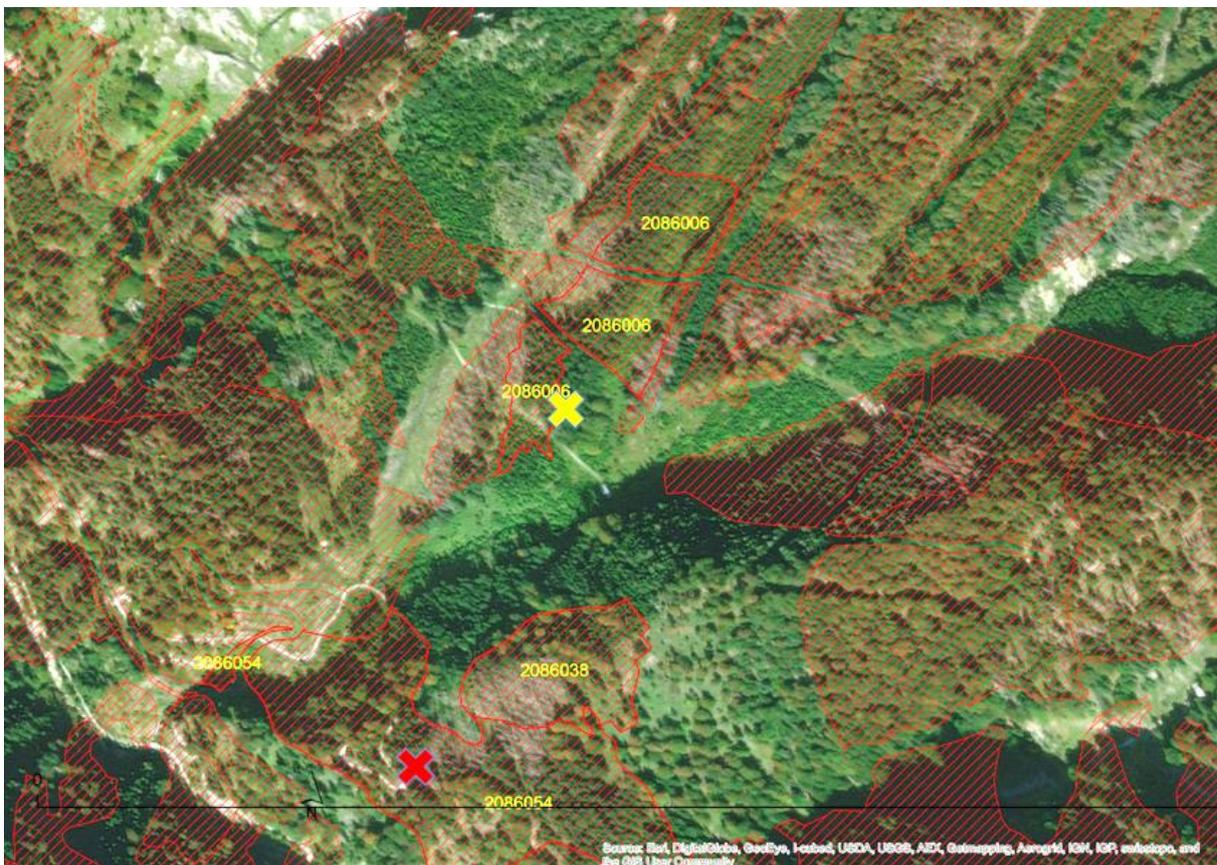


Abb. 15: Luftbild der Flächen, die im Operat unter verschiedenen GIS_IDs zusammengefasst wurden. Das gelbe Kreuz zeigt die Lage des Bestandes I und das rote jene von Bestand II (Quelle: ÖBf AG).

3.1.1 Winkelzählproben im Vergleich mit Operatsdaten

Das aktuelle Alter der Bestände I und II ist laut Forstkarte der Bundesforste (FB 172 Waldviertel-Voralpen, FR 09 Götting, Revierteil: 1720902, Abt.: 454-477, Blatt 2, Stand 2014) ca. 100 Jahre (5. AKL). Das Alter, welches im Operat für den Bestand II festgelegt ist, ist fast doppelt so hoch, da die Bundesforste hier die Fläche des Bestandes II mit den südlichen und südwestlichen Steilhängen zusammen gefasst haben (Abb. 9 und Abb. 15).

Auch in anderen Merkmalen stimmt die Bestandesbeschreibung nicht mit den im Gelände aufgenommenen Daten überein (Tab. 15). Die Auswertung der Winkelzählproben führt zu höheren Bonitäten als im Operat angegeben (Tab. 16).

Tab. 15: Erhobene Bestandes-Parameter im Vergleich zu Operatsdaten der Bundesforste

Bestandes-Parameter	Bestand I Operat	Bestand I WZP	Bestand II Operat	Bestand II WZP
Bestandeshöhe (m)	33,5	36,45	24	29,5
Bestandesschicht	Eine	Eine	Eine	Eine
Baumart	Fichte	Fichte	Fichte	Fichte
Alter	95	100	195	100
Baumartenanteil	100	100	40	100
Baumartenbestockungsgrad	0,9	0,9	0,2	1,0
Schichtbestockungsgrad	0,9	0,9	0,5	1,0
Schichtanteil	100	100	100	100
Ertragsklasse	10 (Fichte Bruck)	15,0	4 (Fichte Bruck)	9,7

Tab. 16: Auswertung der Winkelzählproben in beiden Beständen: Aktuelle Grundfläche (G_{ist}), Grundfläche laut Ertragstafel (G_{ET}) in m^2 pro Hektar. Bestockungsgrad (BG) = G_{ist} / G_{ET}

Untersuchungsstandorte	Höhe [m]	G_{ist} [m^2/ha]	G_{ET} [m^2/ha]	BG	BONITÄT	Masse [vfmD/ha]
Bestand I	36,5	56	64,9	0,9	15,0	902,1
Bestand II	29,5	54	52,4	1,0	9,7	714,5

3.1.2 Blattflächenindex (LAI)

Die Analyse der Hemi-Fotos mit dem Programm Hemiview ergab einen mittleren LAI von 6,32 für Bestand I und von 6,17 für Bestand II (Tab. 17).

Tab. 17: Blattflächenindex an den WZP-Punkten der Bestände I und II

Punkt	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
LAI	6,49	6,66	6,36	5,61	6,49	6,94	5,41

Entsprechend der Relation zwischen Bestandesalter und Blattflächenindex (Abb. 14) liegt der LAI des Bestands I bei 8 und jener des Bestands II bei 4. Der vor Ort ermittelte Wert für Bestand II weicht aufgrund der hohen Altersangabe im Operat stark vom aus der Funktion abgeleiteten Wert ab. Ab einem Alter von 165 Jahren wird ein gleichbleibender LAI von 4 angenommen, da sich aus der polynomischen Funktion bei höheren Altersklassen Werte gegen Null bzw. Negativwerte ergeben.

3.2 Bodenparameter

3.2.1 Standortsufnahmen mit Profilsprache und Operatsdaten

Der Bodentyp im Bestand I wurde als leicht pseudovergleyter Kalklehm mit stark über die Bodentiefe zunehmendem Skelettanteil angesprochen (Tab. 18).

Tab. 18: Bestand I: Pseudovergleyter Kalklehm mit stark zunehmendem Skelettanteil über die Tiefe. Die Humusform war mullartiger Moder. Bodenansprache am Profil vom 29.5. 2018

Horizont	Tiefe (cm)	Textur	Beschreibung	Grobanteil (%)	Anmerkungen
L/F	5-3				
H	3-0				stark ausgetrocknet
A _{hb}	0-5	schluffiger Lehm	feinkrümelig-kleinblockig, grau		stark durchwurzelt
B _{rel, g}	5-20	toniger Lehm	leicht pseudovergleyt, Rostflecken sichtbar, dicht gelagert, plattige Struktur, hellbraun, relativ wenig Grobmaterial	20	stark durchwurzelt
B _{rel, g/C}	20-70	toniger Lehm	kolluvial vermengt, polyedrisch, blockig, kräftig dunkelbraun, starker Anstieg im Skelettanteil	50-80	Bodenaufbau kleinräumig sehr unterschiedlich, teilweise sehr gr. Blöcke; Regenwürmer bis in Tiefe von 60 cm
	mind. 120, tiefgründig				bis 70 cm gegraben, Bodentiefe aber größer (am Wurzelballen sichtbar); Durchwurzelungstiefe sehr hoch; Spaltengründigkeit

Die Humusaufgabe war zum Zeitpunkt der Bodenansprache stark ausgetrocknet (Abb. 16). Abb.17 zeigt das Bodenprofil mit folgenden Charakteristika: Der Mineralbodenhorizont B_{rel} ist leicht pseudovergleyt und zeigt Rostflecken und ist dicht gelagert mit einer plattigen Struktur, die Farbe ist hellbraun. Zwischen 8-23 cm Tiefe weist der Boden weniger Grobmaterial, ca. 20%, auf. In tieferen Bodenschichten ist ein deutlicher Anstieg im Skelettanteil erkennbar. B_{rel,g/C} ist kolluvial vermengt, polyedrisch und von kräftig dunkelbrauner Farbe, mit einem Skelettanteil von 50-80%. Der Bodenaufbau im Bestand I ist kleinräumig sehr unterschiedlich, teilweise mit recht großen Blöcken. Das Profil wurde bis zu einer Tiefe von 70 cm gegraben, die Bodentiefe am Standort ist aber größer, wie am Wurzelballen eines geworfenen Baumes sichtbar war. Entsprechend ist die potentielle Durchwurzelungstiefe hoch, durch Spaltengründigkeit an vielen Stellen bis zu 1,2 Meter.

Laut Operat liegt der Bestand I auf der Fläche mit der GIS_ID 2086006, die in die Abteilung 427, Unterabteilung P1 fällt. Die Beschreibung umfasst: Wirtschaftswald auf einer Seehöhe von ca. 900 m, Exposition SW, Neigung 27%, auf tiefgründigem skelett- und tonreichem Karbonatstandort, Wasserhaushalt frisch, gründig, Sauerklee- Waldschaumkraut-Typ.



Abb. 16: Spatenprobe im Bestand I mit Humusauflage und Ah_b-Horizont



Abb. 17: Bodenprofil des Bestand I: Pseudovergleyter Kalklehm mit nach unten stark zunehmendem Skelettanteil. Aus diesem Profil wurden Bodenproben aus jedem Horizont für die Korngrößenanalyse gewonnen



Im Bestand II wurde sowohl Rendzina als auch pseudovergleyter Kalklehm als Bodentyp vorgefunden. An drei Stellen wurden Bodenprofile ausgehoben, wobei Profil 1 ein einfaches A-C-Profil, also Bodentyp Rendzina mit geringer Gründigkeit ergab (Abb. 18). Dazwischen lagen aber auch tiefgründige Lehmtaschen (Abb. 19). Das zweite Profil ging bis zu einer Tiefe von 45 cm, wurde aber nicht weiter untersucht. Profil 3 wurde auch mit dem Bodenbohrer gewonnen. Dabei konnte bis knapp einen Meter in die Tiefe gebohrt werden und Proben für jeden Horizont gewonnen werden. Der Bodentyp an dieser Stelle ist pseudovergleyter Kalklehm (Tab. 19).

Abb. 18: Bodenprofil 1 des Bestand II: Rendzina mit sehr geringer Gründigkeit und unmittelbar anstehendem Gestein.

Tab. 19: Drei Profilsprachen im Bestand II vom 29.5.2018 mit Anmerkungen. Profil 1 entspricht einer Rendzina, mit sehr geringer Gründigkeit. Die Humusform war Mull. Profil 2 war pseudovergleyter Kalklehm mit stark schwankendem Grobanteil und stark schwankender Gründigkeit. Die Humusform war mullartiger Moder

Bestand II	Horizont	Tiefe (cm)	Textur	Beschreibung	Grobanteil (%)	Anmerkungen
Profil 1: Rendzina	L	3-2,5				sehr geringe Gründigkeit mit anstehendem Gestein, aber auch tiefergründige Lehmtaschen; Gründigkeit daher stark wechselnd. Unruhiges Mikrorelief ("pits and mounds"); Windwürfe!
	H	2,5-0				
	A _{hb}	0-8		krümelig, grau	5	
	C	20+	Kalk		99	
Profil 2: Pseudovergleyter Kalklehm	L/F	6-2			Grobanteil schwer abschätzbar, wo Kalklehm da sehr gering (10)!	Stark wechselnde Gründigkeit. Der Mittelwert aus 30 Einschlägen mit dem Schlagbohrer ist 41cm.
	H	2-0				
	A _{hb}	0-15	schluffiger Ton	feinkrümelig-kleinblockig		
	A/B _{rel,g}	15-27	schluffiger Ton	leicht pseudovergleyt		
	B _{rel 1}	27-43	schluffiger Ton	heller		
	B _{rel 2}	43-73	schluffiger Ton	fleckig, etwas dunkler, rötlich		
	B _{rel 3}	73-97	lehmiger Ton	bindiger, kompakter		



Das sehr unruhige Mikrorelief („pits and mounds“) am Standort weist auf alte Windwürde hin. Die Gründigkeit ist stark wechselnd. 30 Proben mit dem Schlagbohrer ergaben eine mittlere Gründigkeit von 41 cm (mit einem Minimum von 2 cm und einem Maximum von 97 cm). Der Grobanteil von Rendzinen ist generell sehr hoch, innerhalb der Kalklehm-taschen aber wesentlich geringer, daher kann er im Bestand II zwischen 10 und 90% liegen.

Abb. 19: In unmittelbarer Nähe zu sehr seichtgründigen Rendzinen wie in Abb. 18 finden sich tiefgründige Kalklehm-taschen im Bestand II. Diese weisen einen geringen Skelettgehalt auf.

Laut Operat ist der Bestand II mit der GIS_ID 2086054, der in die Abteilung 428, Unterabteilung S0 fällt, ein Schutzwald außer Ertrag auf einem Felssteilhangstandort, auf einer Seehöhe von ca. 800 m, mit Exposition Südwest und einer Neigung von 70%. Der Standort wird als seichtgründig beschrieben, sein Wasserhaushalt als sehr trocken eingestuft und als Erika-Blaugras-Typ klassifiziert.

3.2.2 Bodenphysikalische Parameter entsprechend der Korngrößenanalyse und abgeleitet von den Beschreibungen im Operat

Mit Hilfe der Korngrößenanalyse wurden die Anteile an Ton, Sand und Schluff in % in den verschiedenen Bodenhorizonten der geworbenen Bodenproben bestimmt. Für jede Probe aus jedem Horizont ließen sich der massenmäßige Anteil der Korngrößenklassen und deren Kornsummenkurven darstellen.

Graphiken der Korngrößenklassen sind für beide Bestände beispielhaft an jeweils einem Bodenhorizont angeführt. In Bestand I hat die Korngrößenklasse Schluff den größten Anteil im Horizont B_{rel} , gefolgt von Ton. Die Bodenprobe weist keinen Sandanteil auf (Abb. 20). In Bestand II weisen die Korngrößenklassen mittlerer und feiner Schluff die höchsten Anteile im Horizont B_{rel1} auf. Sand ist so gut wie nicht in der Probe enthalten und Ton in stärkerem Maße als in der Probe von Bestand I.

Die Ergebnisse der Korngrößenanalyse lassen sich im Texturdreieck verorten und somit die Bodenart ableiten. Die Proben liegen alle im äußersten Schluffbereich mit Tongehalten von 30-65% (Abb. 22).

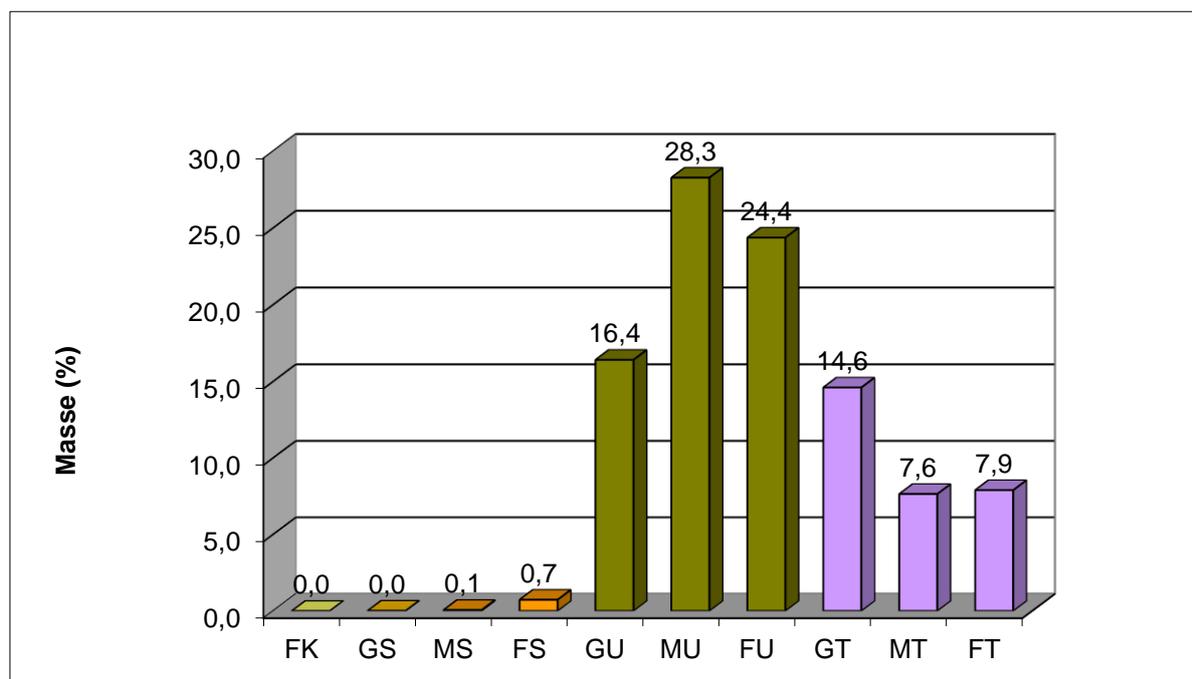


Abb. 20: Korngrößenklassen des Horizontes $B_{rel,g}$ des Bodenprofils in Bestand I (F...fein, G...grob, M...mittel, K...Kies, S...Sand, U...Schluff, T...Ton).

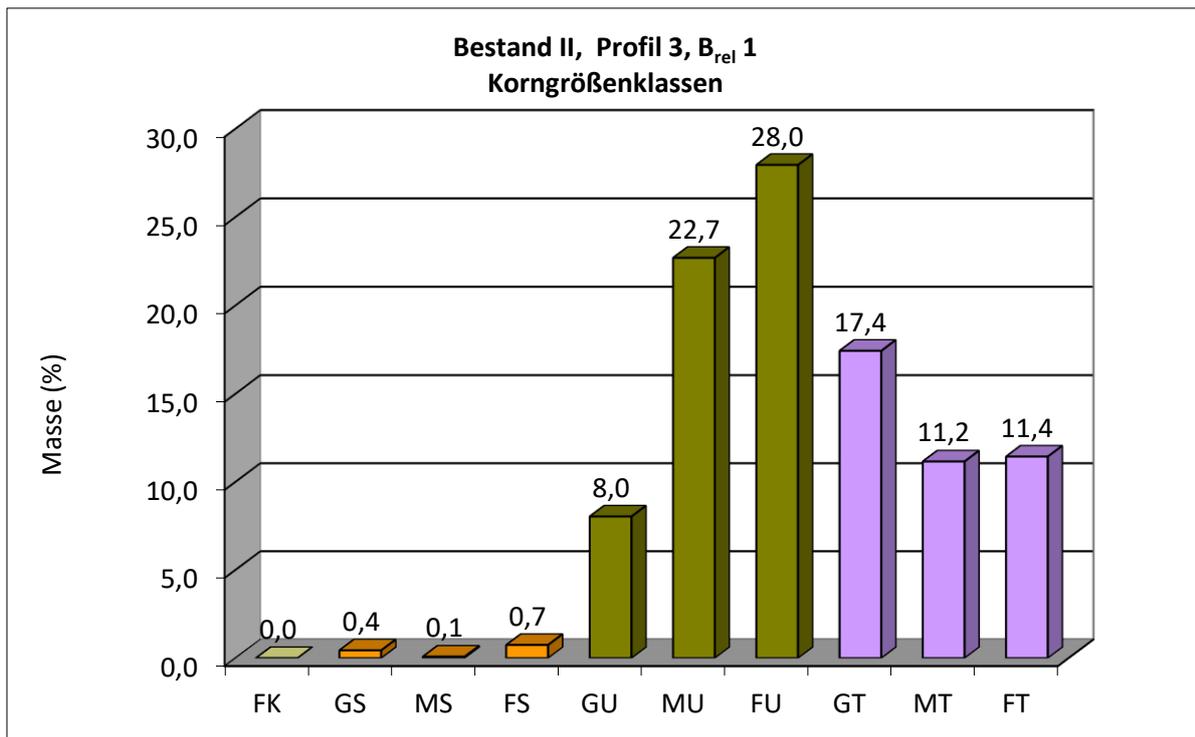


Abb. 21: Korngrößenklassen des Horizontes B_{rel}1 des Bodenprofils (Profil 3) in Bestand II (F...fein, G...grob, M...mittel, K...Kies, S...Sand, U...Schluff, T...Ton).

In Abhängigkeit von der mittels Korngrößenanalyse ermittelten Bodenart wurden die bodenphysikalischen Parameter, Luftporendruck des Bodens (ALPHA), Verteilung des unimodalen Bodenporenvolumens (LAMBDA), Restwassergehalt (THETA_R) und Sättigungswassergehalt (THETA_S) anhand von Pedotransfer-Funktionen (Rawls & Brakensiek, 1989) für Standort I und II abgeleitet. Die jeweiligen bodenphysikalischen Kennwerte, sowie gemessene Durchwurzelungstiefen (RD) und geschätzter Grobanteil (STONE) sind in Tab. 20 und Tab. 21 in der Spalte „Proben basiert“ angeführt.

Laut Operat wird Bestand I dem Waldort Nr.32 (tiefgründiger skelett- und tonreicher Karbonatstandort) zugeordnet, dies führt zur Texturklasse Ton. Der Bestand II wird als Waldort Nr. 13 (Felssteilhangstandort) beschrieben, und somit der Texturklasse Sand (Tab. 8) zugeordnet. Die mittels Pedotransferfunktionen hervorgehenden Parameter ALPHA, LAMBDA, THETA_R und THETA_S sind gemäß Tab. 9 aus der jeweiligen Texturklasse hergeleitet. Der Bestand I wird als skelettreich und Bestand II, als sogenannter Felssteilhangstandort, als sehr skelettreich charakterisiert. Gemäß Tab. 10 leiten sich aus diesen Informationen Grobanteile (STONE) von 0,45 bzw. 0,7 ab. Der Bestand I wird als gründig und der Bestand II als seichtgründig beschrieben, damit kommt man auf Durchwurzelungstiefen (RD) von 800 mm, bzw. 300 mm (Tab. 11). Alle vom Operat abgeleiteten Bodenparameter sind Tab. 20 und Tab. 21 in der Spalte „Operat“ zu entnehmen.

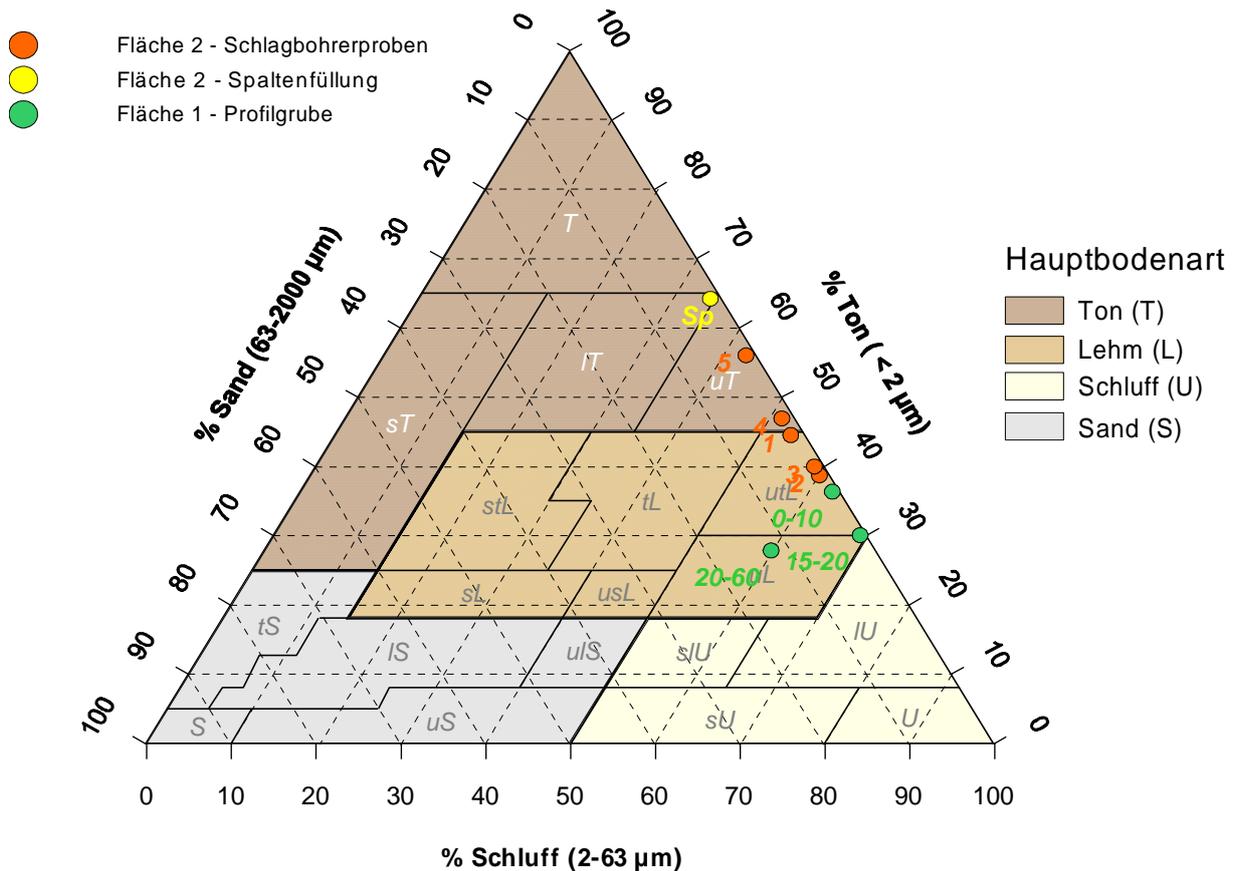


Abb. 22: Verortung der Ergebnisse der Korngrößenanalyse im Texturdreieck (nach USDA Standards). Die grünen Punkte markieren die Textureigenschaften der Proben aus der Profilgrube im Bestand I (Wertebereiche entsprechen der Entnahmetiefe). Sp steht für „Spaltenfüllung“. Diese Probe wurde im Bestand II mittels Schlagbohrer in rund 1 m Tiefe geworben. Die orangenen Punkte im Dreieck markieren die Textureigenschaften der Proben des dritten Profils aus den Horizonten A_{hb} (1), A_{Brel} (2), B_{rel} (3-5) (pseudovergleyter Kalklehm; Schlagbohrerprobe).

Es ergaben sich deutliche Unterschiede zwischen den vor Ort bzw. den im Labor erhobenen Werten und den aus dem Operat abgeleiteten. Da die Standorte sehr inhomogen in Bezug auf Bodencharakteristika waren, wurde bei den gemessenen Durchwurzelungstiefen und geschätzten Grobanteilen bewusst eine Bandbreite an Werten angenommen. Die Simulationen mittels TDEF wurden somit für unterschiedliche Varianten an Eingangswerten durchgeführt. Die Auswirkung der unterschiedlichen Parametrisierung des TDEF Modells auf die modellierten Bodenwassergehalte und Transpirationsdefizite kann damit veranschaulicht werden (Kap. 3.3). Der Vergleich mit den vor Ort gemessenen Bodenwassergehalten erlaubt eine Einschätzung, welche Parameterkonstellation die Realität am besten abbildet.

Tab. 20: Bestand I: Bodenphysikalische Parameter aus der Pedotransferfunktion. Die Eingangsgröße Bodenart wurde einmal mittels Beprobung und Analyse ermittelt und einmal aus Angaben im Operat gutachtlich abgeleitet

Parameter	Proben basiert	Operat basiert	Einheit	Bezeichnung
RD	1200 (max)	800	mm	Durchwurzelungstiefe
ALPHA	0,018	0,029	cm	Luft Eintrittsdruck
LAMDA	0,413	0,136		Verteilung unimodales Porenvolumen
THETA_R	0,023	0,062	m ³ /m ³	Restwassergehalt
THETA_S	0,491	0,475	m ³ /m ³	Sättigungswassergehalt
STONE	0,2-0,8	0,45	m ³ /m ³	Grobanteil

Tab. 21: Bestand II: Bodenphysikalische Parameter aus der Pedotransferfunktion. Die Eingangsgröße Bodenart wurde einmal mittels Beprobung und Analyse ermittelt und einmal aus Angaben im Operat gutachtlich abgeleitet

Parameter	Proben basiert	Operat basiert	Einheit	Bezeichnung
RD	20-970	300	mm	Durchwurzelungstiefe
ALPHA	0,014	0,126	cm	Luft Eintrittsdruck
LAMDA	0,174	0,533		Verteilung unimodales Porenvolumen
THETA_R	0,174	0,028	m ³ /m ³	Restwassergehalt
THETA_S	0,474	0,437	m ³ /m ³	Sättigungswassergehalt
STONE	0,1-0,9	0,7	m ³ /m ³	Grobanteil

3.3 Modellierung von SWC und TDEF

Mit Hilfe des Wasserbilanzmodells TDEF wurden die Bodenwassergehalte (SWC) und in weiterer Folge die potentiell auftretenden Transpirationsdefizite für die Bestände I und II simuliert. Entsprechend der Bandbreite der vor Ort erhobenen Variablen RD und STONE bzw. der Werte, die aus Angaben im Operat abgeleitet wurden, wurde das Modell in beiden Beständen unterschiedlich parametrisiert (Tab. 22 für Bestand I und Tab. 23 für Bestand II).

Tab. 22: Eingangsparameter für TDEF für Bestand I: Grün hinterlegte Werte wurden von der Bodenart abgeleitet (ALPHA, LAMBDA, THETA_R und THETA_S). Durchwurzelungstiefe RD und Skelettanteil (STONE) sind Variablen, die im Gelände eine große Variation aufwiesen (gelb markiert). Auf Basis der unterschiedlichen Parameterkonstellationen (Proben basierte Minimal- bzw. Maximalwerte, Werte in Anlehnung an das Operat) wurden mehrere Durchgänge mittels TDEF gerechnet

TDEF Parameter	Proben basiert min	Proben basiert min_2	Proben basiert max	Operat basiert
Alb	0,11	0,11	0,11	0,11
ALPHA	0,01784	0,01784	0,01784	0,029
CH	36,45	36,45	36,45	33,5
dIT	14	14	14	14
ELEV	925	925	925	900
ELEV_WS	1020	1020	1020	1020
EXP	1,15	1,15	1,15	1,15
GIS_ID	2086006	2086006	2086006	2086006
gmax	0,002	0,002	0,002	0,002
H_WS	2	2	2	2
H50	2000	2000	2000	2000
Ht	100	100	100	100
imax	0,6	0,6	0,6	0,6
k	0,3	0,3	0,3	0,3
Kdev	557	557	557	557
Kinf	140	140	140	140
LAI	6,32	6,32	6,32	8
LAIT	6	6	6	6
LAMDA	0,4127	0,4127	0,4127	0,136
LAT	47,8	47,8	47,8	47,8
LONG	15,1	15,1	15,1	15,1
MAXTEMPDEV	38,9	38,9	38,9	38,9
MINTEMPDEV	8,3	8,3	8,3	8,3
MINTEMPFLIGHT	16,5	16,5	16,5	16,5
OPTTEMPDEV	30,4	30,4	30,4	30,4
PreiDEV	0,6	0,6	0,6	0,6
RD	300	400	1200	800
REDvpd	1	1	1	1
sbT	0,5	0,5	0,5	0,5
sf	100	100	100	100
SL	19	19	19	15,1
SLAA	200	200	200	225
SM	15	15	15	15
STONE	0,8	0,6	0,2	0,45
THETA_R	0,0233	0,0233	0,0233	0,062
THETA_S	0,491	0,491	0,491	0,475

Tab. 23: Eingangsparameter für TDEF für Bestand II: Grün hinterlegte Werte wurden von der Bodenart abgeleitet (ALPHA, LAMBDA, THETA_R und THETA_S). Die Durchwurzelungstiefe RD und der Skelettanteil (STONE) sind Variablen, die im Gelände eine große Variation aufwiesen (gelb markiert). Auf Basis der unterschiedlichen Parameterkonstellationen (Proben basierte Minimal- Maximal- bzw. Mittelwerte, Werte in Anlehnung an das Operat) wurden mehrere Durchgänge mittels TDEF gerechnet

TDEF Parameter	Proben basiert min	Proben basiert min_2	Proben basiert max	Proben basiert mean	Operat basiert 1	Operat basiert 2
Alb	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
ALPHA	0,01423	0,01423	0,01423	0,01423	0,126	0,126
CH	29,5	29,5	29,5	29,5	24	24
dIT	14	14	14	14	14	14
ELEV	870	870	870	870	800	800
ELEV_WS	1020	1020	1020	1020	1020	1020
EXP	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
GIS_ID	2086054	2086054	2086054	2086054	2086054	2086054
gmax	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
H_WS	2	2	2	2	2	2
H50	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Ht	100	100	100	100	100	100
imax	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
k	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Kdev	557	557	557	557	557	557
Kinf	140	140	140	140	140	140
LAI	6,1725	6,1725	6,1725	6,1725	4	4
LAIT	6	6	6	6	6	6
LAMDA	0,17433	0,17433	0,17433	0,17433	0,533	0,533
LAT	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8
LONG	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1	15,1
MAXTEMPDEV	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9
MINTEMPDEV	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
MINTEMPFLIGHT	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
OPTTEMPDEV	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4
PreiDEV	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
RD	20	300	970	600	300	400
REDvpd	1	1	1	1	1	1
sbT	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
sf	100	100	100	100	100	100
SL	11	11	11	11	35	35
SLAA	225	225	225	225	225	225
SM	15	15	15	15	15	15
STONE	0,9	0,7	0,1	0,5	0,7	0,45
THETA_R	0,173833	0,173833	0,173833	0,173833	0,028	0,028
THETA_S	0,47383	0,47383	0,47383	0,47383	0,437	0,437

3.3.1 Klimadaten

Die in der Hundsau gemessenen Regenmengen erwiesen sich als lückenhaft, da der Regenmesser der Schutzgebietsverwaltung zu Beginn der Saison nur unzureichend gereinigt worden war und nicht einwandfrei funktionierte. Von April bis Mitte Mai wurde gar kein Niederschlag registriert. Im Juni zeichnete der Regenmesser Regenereignisse zeitverzögert und stark abgeschwächt auf, was auf eine Verstopfung des Regenmessers hindeutet. Am 1. Juli wurde der Missstand dann behoben, dabei wurde testweise Wasser eingefüllt (sichtbar an der zusätzlichen Stufe im blauen Graphen (Abb. 23)). Aus diesen Gründen wurden die Simulationen mittels TDEF letztendlich auf Basis von Niederschlagsdaten des Amtes der NÖ Landesregierung, Abteilung Hydrologie und Geoinformation, der Station Lunz am See durchgeführt. Die Temperaturen, die in den Klimastationen Hundsau und Lunz am See gemessen wurden, stimmen besser überein. In der Hundsau wurden lediglich größere Temperaturschwankungen registriert (Abb. 24).

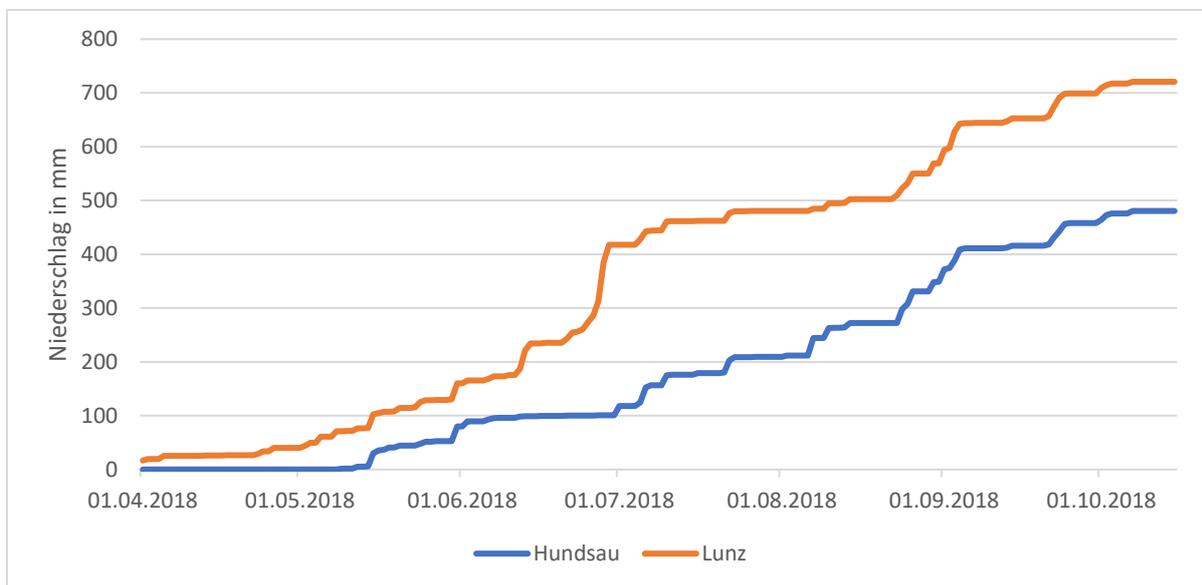


Abb. 23: Kumulierter Niederschlag, gemessen an den Klimastationen Hundsau (blauer Graph) und Lunz am See (roter Graph).

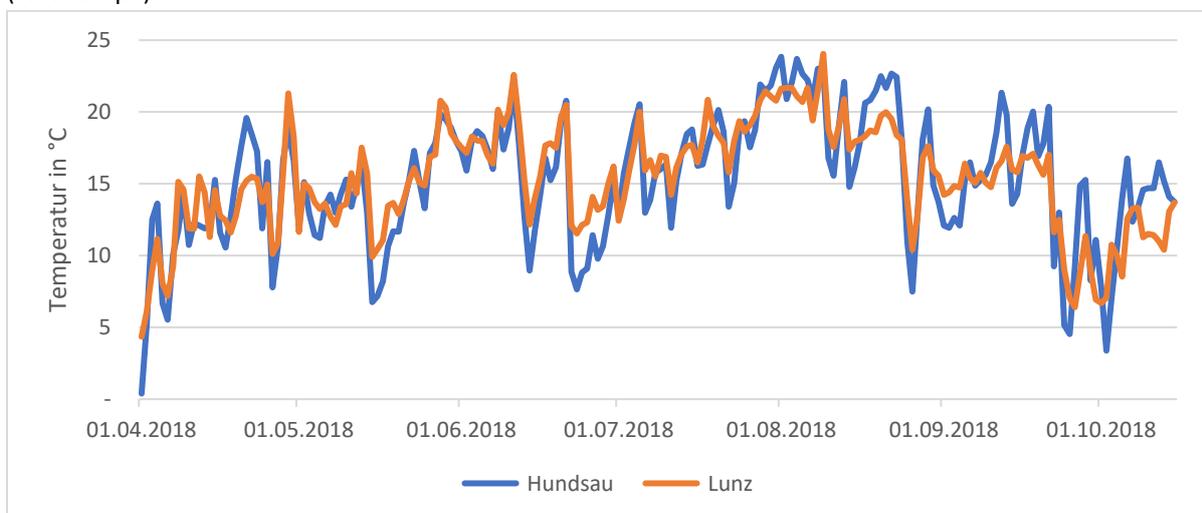


Abb. 24: Tagesmittelwerte der Temperatur an den Klimastationen Hundsau (blauer Graph) und Lunz am See (roter Graph).

3.3.2 Volumetrische Bodenwassergehalte

Die mindestens zweiwöchentlich an jeweils fünf Punkten in den Beständen I und II gemessenen Bodenwassergehalte wurden gemittelt und sind im zeitlichen Verlauf für beide Bestände dargestellt (Abb. 25). Unterschiede in der Wasserversorgung zwischen den Beständen sind gering, der Verlauf der Kurven entspricht dem Niederschlagsgang. Die gemessenen Bodenfeuchtwerte liegen im Bereich zwischen 25 und 35% und steigen zeitverzögert nach Regenereignissen an.

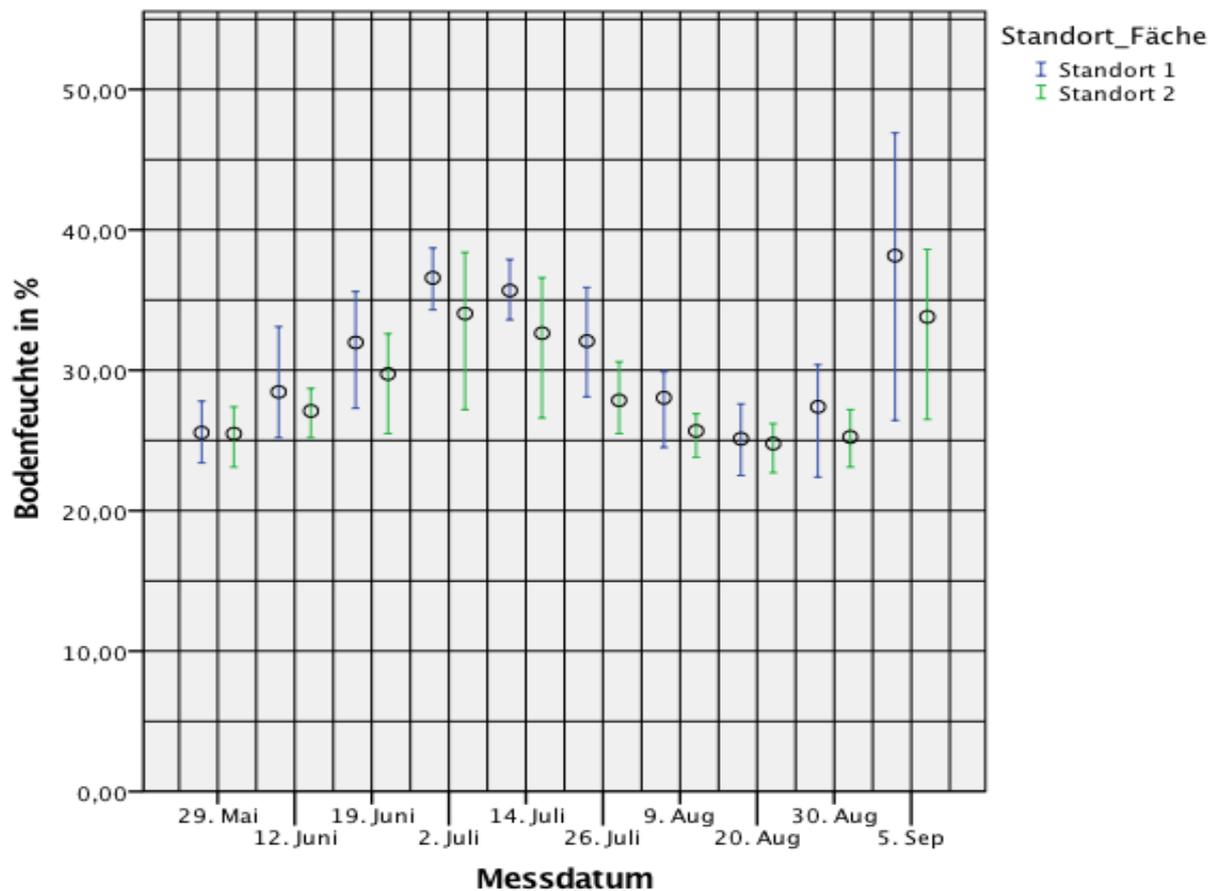


Abb. 25: Volumetrische Bodenwassergehalte (SWC, %; Mittelwerte und Standardabweichung) in Bestand I und II von Mai bis September 2018.

3.3.3 Vergleich gemessener und simulierter Bodenwassergehalte (SWC)

Im Folgenden wurden die vor Ort gemessenen und mittels TDEF berechneten Bodenwassergehalte beider Bestände graphisch dargestellt. Basis der Modellierung waren für Bestand I die erhobenen Maximalwerte (Proben basiert_max) für Durchwurzelungstiefe und Skelettanteil. Würden diese auch für Bestand II verwendet, lägen sie deutlich höher als die Messungen. Für Bestand II wurden an dieser Stelle die Durchschnittswerte zwischen minimaler und maximaler Parameterkonstellation (Proben basiert_mean) verwendet, die am nächsten an die gemessenen Werten heran kommen. Aktuelle und simulierte Werte stimmten für Bestand I besser überein als für Bestand II. In letzterem traten generell stärkere Schwankungen im Bodenwassergehalt auf. Mit diesen Parameterkonstellationen lagen die Messwerte meist über den simulierten Werten (Abb. 26 und Abb. 27).

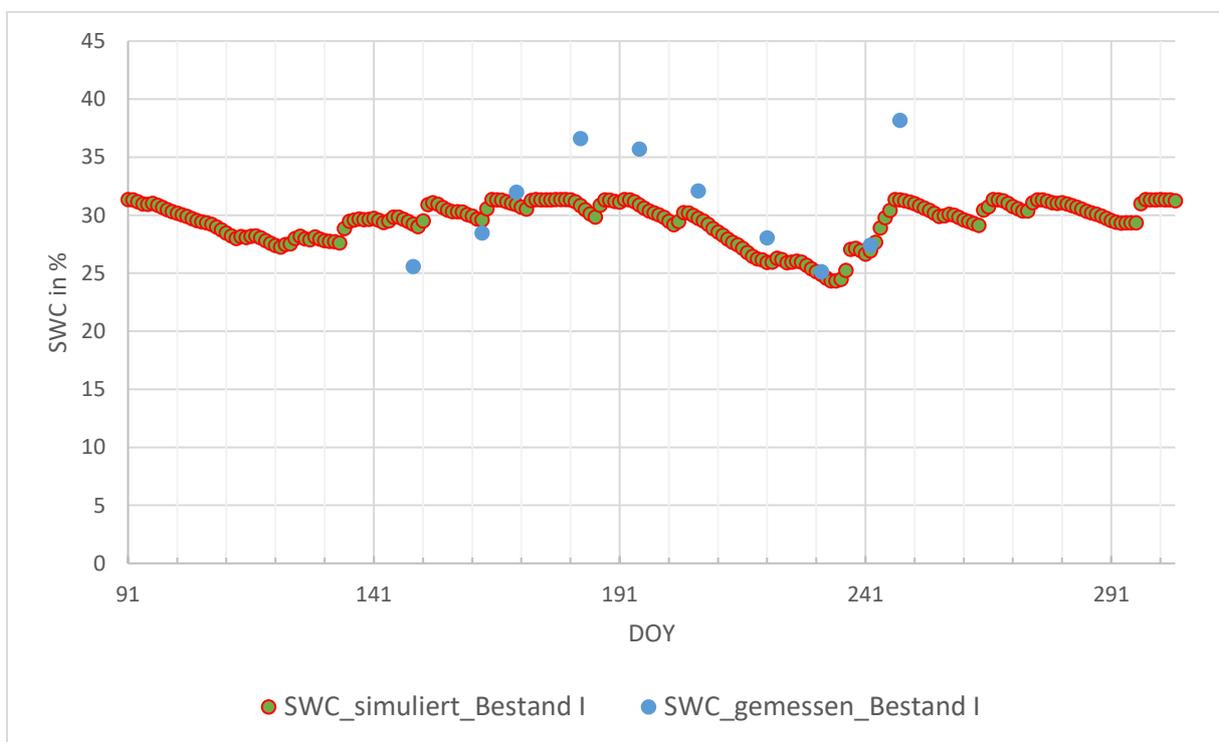


Abb. 26: Volumetrische Bodenwassergehalte (SWC) in Bestand I im Zeitraum 1.4.2018 (DOY 91) bis 31.10.2018 (DOY 304): Tägliche, simulierte Werte (rote Punkte) mit der maximalen probenbasierten Parameterkonstellation und zweiwöchentlich vor Ort mittels TDR gemessene Werte (blaue Punkte).

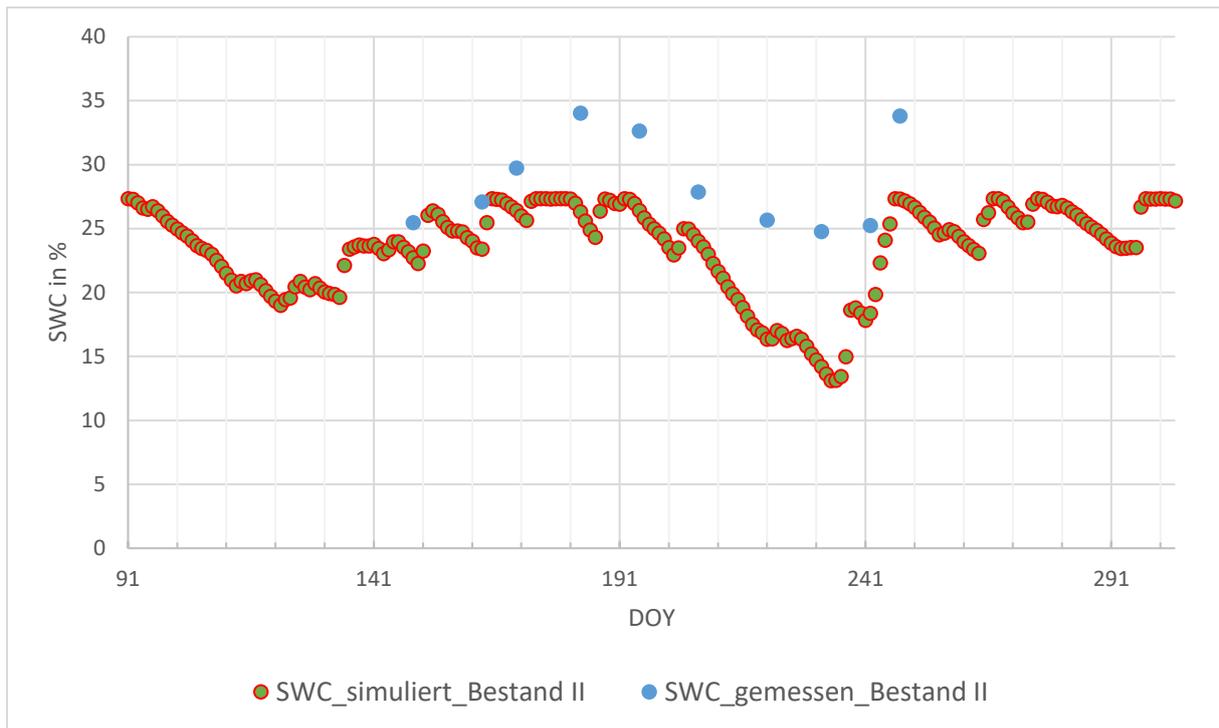


Abb. 27: Volumetrische Bodenwassergehalte (SWC) in Bestand II im Zeitraum 1.4.2018 (DOY 91) bis 31.10.2018 (DOY 304): Tägliche, simulierte Werte (rote Punkte) mit der mittleren probenbasierten Parameterkonstellation und zweiwöchentlich vor Ort mittels TDR gemessene Werte (blaue Punkte).

3.3.4 Vergleich gemessener und simulierter Bodenwassergehalte (SWC) unter Berücksichtigung verschiedener Eingangswerte

Die Bodenwassergehalte in Bestand I und II wurden für den Zeitraum Ende Mai bis Anfang September 2018 simuliert, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Parameterkonstellationen (Tab. 22 und Tab. 23), und mit dem Kurvenverlauf der vor Ort gemessenen Werte verglichen. Die Modellergebnisse für Bestand I beruhen auf den Operatsangaben bzw. auf den vor Ort angesprochenen Maximal- und Minimalwerten für DW und STONE, um der Bandbreite des inhomogenen Terrains gerecht zu werden (Abb. 28). Die simulierten Bodenwassergehalte für „Proben basiert_min“ (hellgelbe Linie) spiegeln die Extremsituation einer Durchwurzelungstiefe von 30 cm und eines Skelettgehalts von 80% wider und liegen weit unter den tatsächlichen Messwerten, ebenso die Simulation mit „Proben basiert_min_2“ Hier zeigt sich die Auswirkung einer Absenkung des Skelettgehaltes um 20 % und einer leichten Zunahme der Durchwurzelungstiefe von 10 cm (gelbe Linie). Eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten zeigt hingegen die Simulation auf Basis der günstigsten Parameterkonstellation „Proben basiert_max“, wobei die simulierte Kurve eine etwas geringere Schwankungsbreite aufweist (rote Linie). Ende August stimmen gemessene und simulierte Bodenwassergehalte annähernd überein. Die Simulation auf Basis der Operatsdaten liegt etwa 10% unter den Maximal- bzw. den vor Ort gemessenen Werten. Auffallend ist, dass nur die im Bestand I gemessenen Bodenfeuchtwerte im Frühjahr ansteigen, die simulierten Werte dagegen nicht.

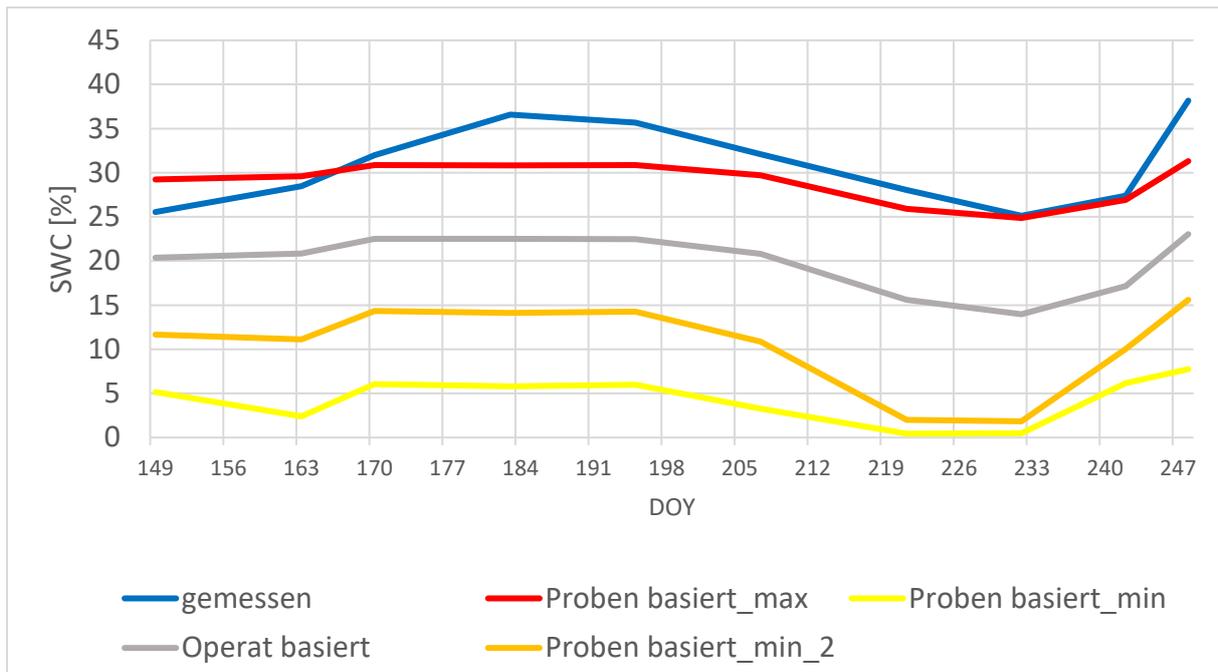


Abb. 28: Verlauf des gemessenen volumetrischen Bodenwassergehalts (blaue Kurve) in Bestand I im Vergleich zu den mit unterschiedlichen Parameterkonstellationen modellierten Werten. Die rote Linie basiert auf den maximalen Parameterwerten, die gelben Linien auf minimalen Angaben für RD und STONE. Die graue Kurve wurde auf Basis der Operatsdaten simuliert. Für die absoluten Werte der jeweiligen Eingangsparameter siehe Tab. 22.

Für Bestand II basieren die Simulationen des Bodenwassergehalts auf minimalen (gelbe Linie), maximalen (rote Linie) und Durchschnittswerten (grüne Linie) für RD und STONE (Abb. 29). Unter Berücksichtigung der Operatsdaten ergeben sich sehr geringe Bodenwassergehalte (schwarze Linie). Auch bei günstigerer Interpretation der Operatsangaben (Operat basiert_2 in Tab. 23) (graue Linie) liegen die simulierten Bodenwassergehalte weit unter 10%. Die vor Ort gemessenen Werte (blaue Linie) ähneln der Kurve für mittlere RD und STONE-Angaben. Basiert die Simulation auf den günstigsten Bodenbedingungen, die im Bestand II vorgefunden wurden, liegen die Bodenwassergehalte über den tatsächlich gemessenen Werten.

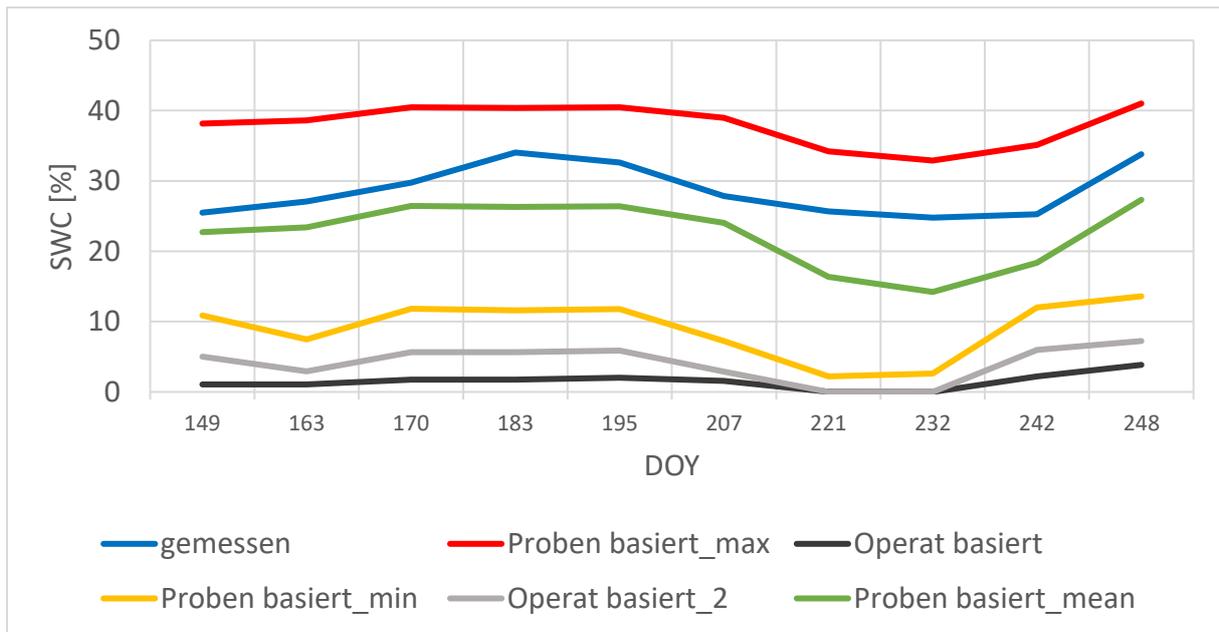


Abb. 29: Verlauf des gemessenen volumetrischen Bodenwassergehalts (blaue Kurve) in Bestand II, im Vergleich zu den mit unterschiedlichen Parameterkonstellationen modellierten Werte. Die rote Linie basiert auf den maximalen Parameterwerten, die grüne Linie auf mittleren und die gelbe Linie auf minimalen Angaben für RD und STONE. Die graue und die schwarze Kurve wurde auf Basis der Operatsdaten simuliert. Für die absoluten Werte der jeweiligen Eingangsparameter siehe Tab. 23.

3.3.5 Unterschiede zwischen simulierten Transpirationsdefiziten (TDEF)

Betrachtet man die Simulationsergebnisse auf Basis der günstigsten Parameterkonstellation (Proben basiert_max) für Bestand I und II, ergab sich im Jahr 2018 kein Transpirationsdefizit, also auch kein Trockenstress für Fichten, die im Untersuchungsgebiet Hundsau auf tiefgründigen skelettarmen Kleinstandorten stocken (Abb. 30, Abb. 31). Unter Annahme geringerer Werte für RD und STONE liegen die simulierten Transpirationsdefizite von Bestand I unter jenen des Bestands II. Auf sehr seichtgründigen und skelettreichen Kleinstandorten sind in den Sommermonaten tägliche Transpirationsdefizite bis zu 1,6 mm (Bestand I) bzw. 3,5 mm (Bestand II) theoretisch möglich. Sommerdefizite (Juni bis August) und über das ganze Jahr aufsummierte Defizite je nach unterschiedlichen Parameterkonstellationen sind in Tab. 24 aufgelistet.

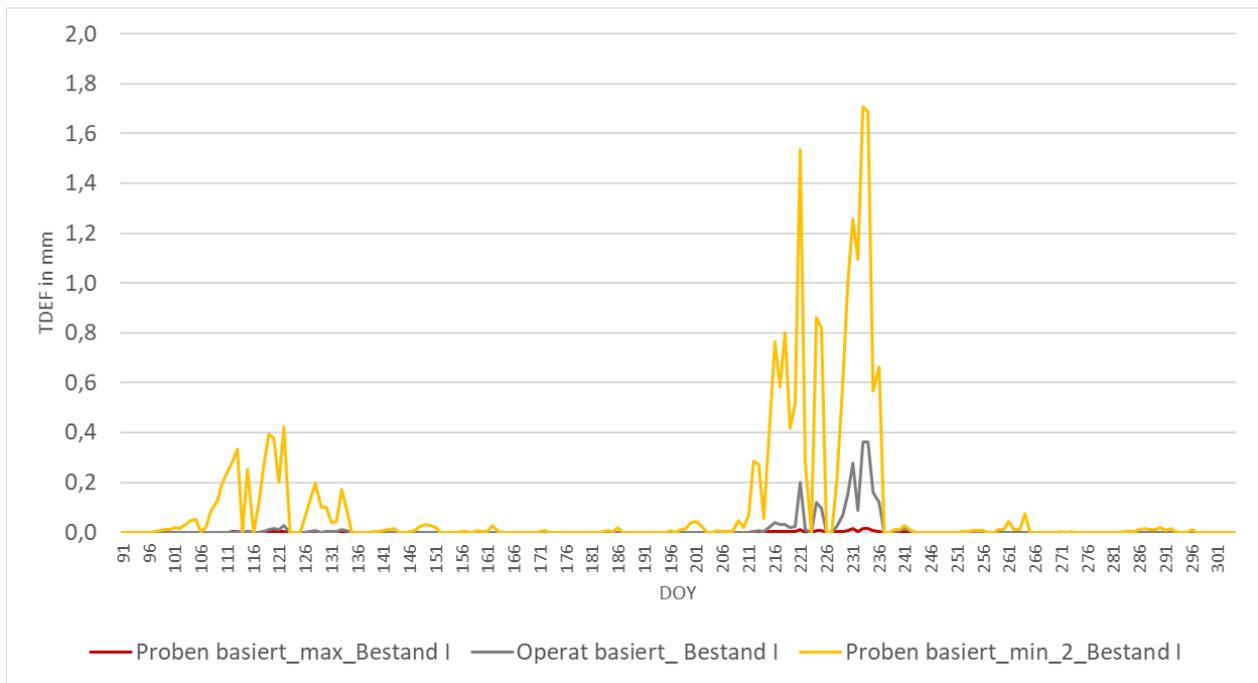


Abb. 30: Simulierte Transpirationsdefizite (TDEF) je nach Parameterkonstellation für Bestand I.

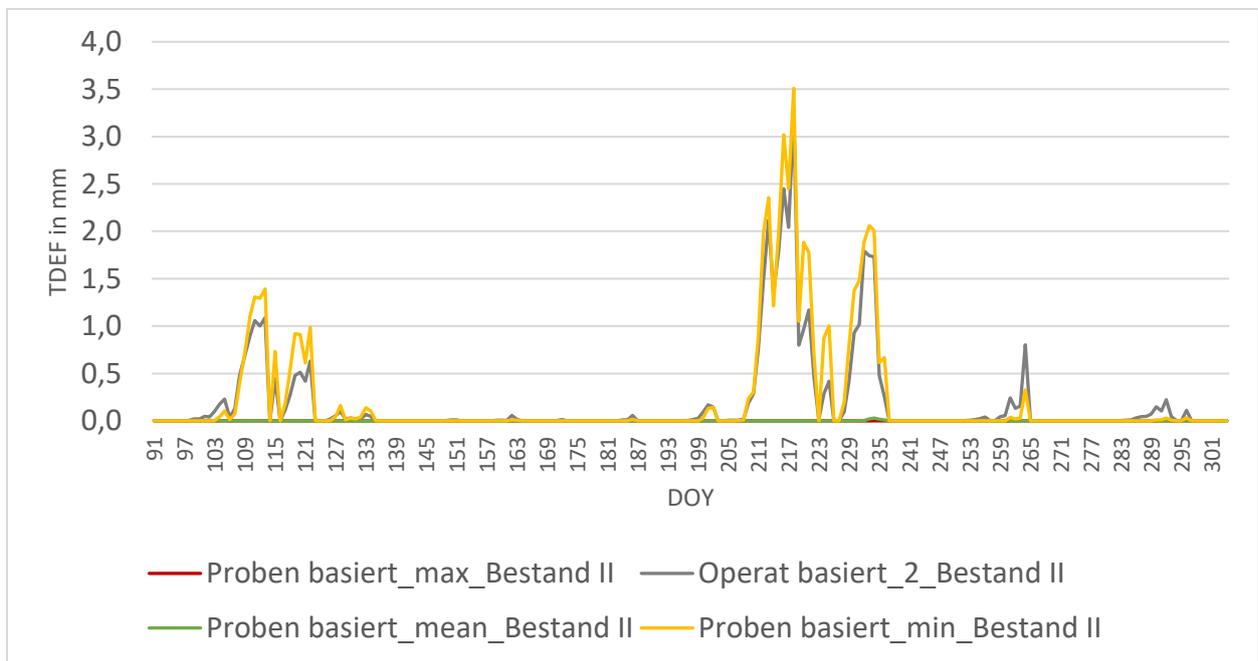


Abb. 31: Simulierte Transpirationsdefizite (TDEF) je nach Parameterkonstellation für Bestand II.

Tab. 24: Summierte Transpirationsdefizite der Monate Juni bis August, sowie für das ganze Jahr aufsummierte Defizite für beide Bestände bei verschiedenen Parameterkonstellationen

	Proben basiert max Bestand I	Operat basiert Bestand I	Proben basiert min_2 Bestand I	Proben basiert max Bestand II	Proben basiert mean Bestand II	Proben basiert min Bestand II	Operat basiert 2 Bestand II
TDEF_6-8 (mm)	0,1	2,3	16,8	0,0	0,1	36,6	28,9
TDEF_Jahr (mm)	0,2	2,4	21,7	0,0	0,1	49,0	40,6

3.4 Monitoring der Schwärmperioden von *Ips typographus*

3.4.1 Fallenfänge und Temperaturverlauf

Die täglichen Fangzahlen der 5 automatisierten Pheromonfallen unterschieden sich zwar deutlich in der Höhe, aber folgten demselben Trend (Abb. 32). Die abweichenden Fangraten, wobei Falle 1 Spitzenwerte aufwies, sind auf die unterschiedlichen Standorte der Fallen zurückzuführen. Stellt man die täglichen Fangzahlen dem Verlauf der täglichen Durchschnittstemperatur gegenüber, wird die direkte Temperaturabhängigkeit des Schwärmverhaltens des Buchdruckers ersichtlich. Eindeutige Spitzen im Käferflug waren an folgenden Tagen erkennbar (Tab. 25 und Abb. 32): Am 26.05. stiegen nach niedriger Temperatur die Fangzahlen aller Fallen sprunghaft an und fielen ebenso schnell wieder ab, die Temperatur hingegen stieg weiterhin an. Ein weiterer Höhepunkt im Flugverhalten trat am 20.06. auf, dieser Anstieg wurde aber abrupt beendet, zeitgleich mit einem Temperatureinbruch. Der 04.07. markierte den Beginn einer längeren Schwärmperiode, mit wiederholten Rückgängen in den Fangzahlen, jeweils nach kurzzeitigen Temperatureinbrüchen. Eindeutig kann die Situation am 22.07. als ein Höhepunkt der Flugperiode interpretiert werden, da die Fangzahlen nach diesem Datum trotz weiter steigender Temperatur deutlich zurückgingen. Ab August wurden in allen Fallen wieder erhöhte Fangzahlen registriert, es herrschte allgemein hohe Flugaktivität, womit eine exakte Zuordnung zu Schwärmphasen (Filialgeneration oder Geschwisterbrut) schwierig wird. Ein letzter deutlicher Anstieg im Schwärmverhalten, bevor die Flugaktivitäten endgültig zum Erliegen kamen, wurde am 16.08. registriert. Hier fällt auf, dass Falle 1 im Vergleich zu den anderen Fallen einen starken Anstieg verzeichnete. In der tiefstgelegenen Falle (Falle 5), die generell die geringsten Fangzahlen aufwies, wurden zu diesem Zeitpunkt kaum mehr Buchdrucker gefangen. Nach diesem Datum schwärmten keine Käfer mehr, trotz weiterhin meist warmer Temperaturen.

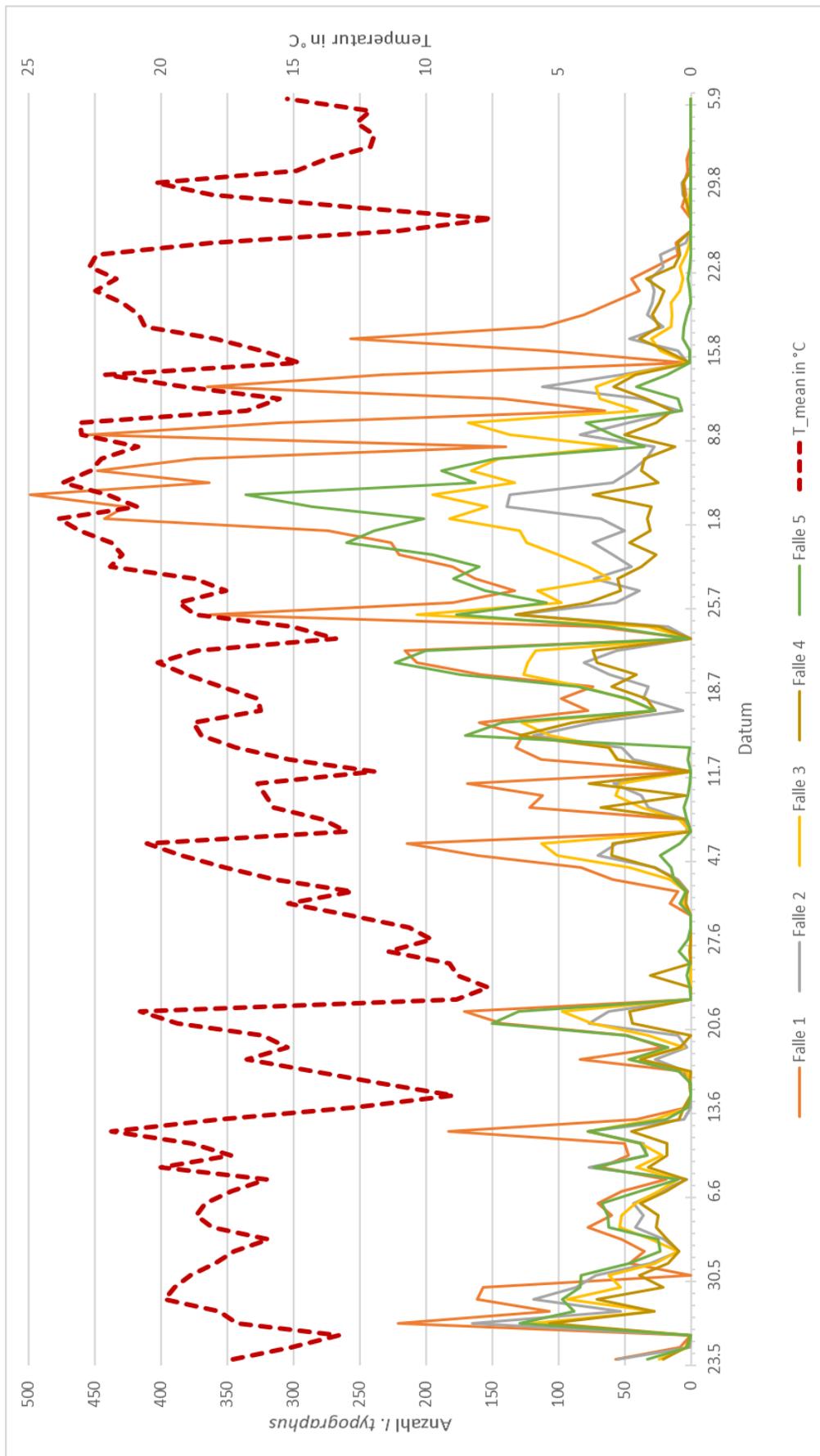


Abb. 32: Fangzahlen der automatisierten Pheromonfallen (Falle1-5) im Beobachtungszeitraum vom 23.05.-05.09.2018 im Vergleich zum Verlauf der Tagestemperaturmittel (Klimastation Hundsau).

Tab. 25: Zeitpunkte der beobachteten Höhepunkte in der Flugaktivität des Buchdruckers im Jahr 2018

Erster Höhepunkt in den Fangzahlen	26.05.2018
Zweiter Höhepunkt in den Fangzahlen	20.06.2018
Dritter Höhepunkt in den Fangzahlen	22.07.2018
Kein eindeutiger Höhepunkt, aber erhöhte Flugaktivität	ab 01.08.2018
Letzter Höhepunkt im Schwärmverhalten vor Ende der Flugperiode	16.08.2018

3.4.2 Fallenfänge und Simulation der Buchdrucker-Phänologie mittels PHENIPS

Die Simulationsergebnisse von PHENIPS für das Jahr 2018 am Untersuchungsstandort sind in Abb. 33 grafisch dargestellt. Tab. 26 fasst die wichtigsten Ereignisse der potentiellen Borkenkäferentwicklung, wie prognostizierten Schwärmbeginn, Anlage der Geschwisterbruten und Filialgenerationen, zusammen.

Diese Höhepunkte im Flugverhalten werden unter Annahme der schnellst möglichen Entwicklung modelliert. In der Realität können daher leichte Verzögerungen beobachtet werden (Tab. 27).

Tab. 26: Zeitpunkte der simulierten Entwicklungsereignisse des Buchdruckers im Jahr 2018
(Quelle: <http://iff-server.boku.ac.at>)

Schwärmbeginn	11.04.2018
Anzahl möglicher Schwärmtage nach Schwärmbeginn	105
Hauptflugphase / Befallsbeginn	19.04.2018
Anlage der Geschwisterbrut	24.05.2018
Anlage der 2. Generation	19.06.2018
Anlage der Geschwisterbrut der 2. Generation	20.07.2018
Anlage der 3. Generation	12.08.2018

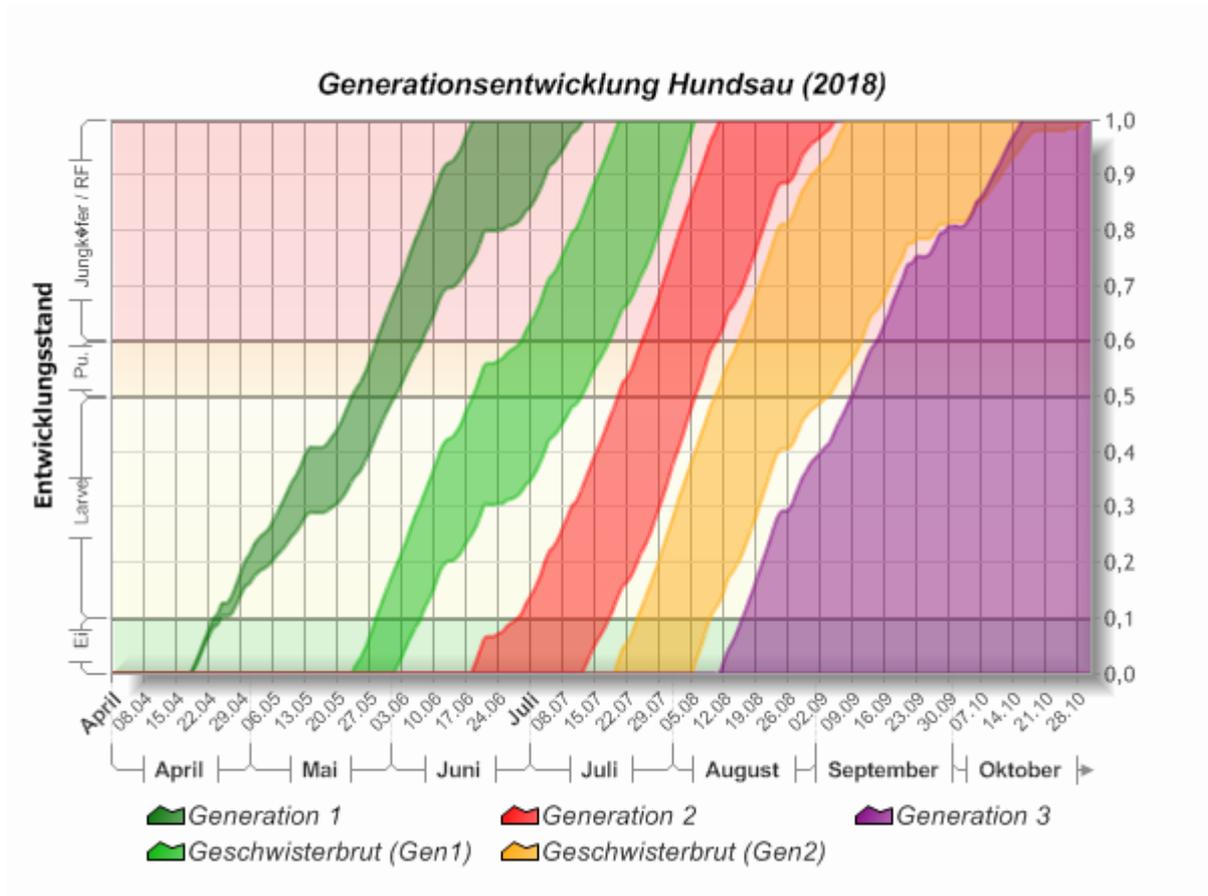


Abb. 33: Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse von PHENIPS für das Gebiet Hundsau im Jahr 2018 (Quelle: <http://iff-server.boku.ac.at>).

Tab. 27: Vergleich der prognostizierten (PHENIPS) und beobachteten (Pheromonfallen) Schwärmzeiten von *I. typographus* in der Hundsau (2018)

Entwicklungsereignisse	Datum nach PHENIPS	Beobachtetes Datum	Abweichung in Tagen
Schwärmbeginn	11.04.	-	-
Hauptflugphase/ Befallsbeginn	19.04.	-	-
Anlage Geschwisterbrut 1	24.05.	26.05.	2
Anlage 2. Generation	19.06.	20.06.	1
Anlage Geschwisterbrut 2	20.07.	22.07.	2
Anlage 3. Generation	12.08.	16.08.	4

3.4.3 Borkenkäferentwicklung in den Fangbäumen im Vergleich zum prognostizierten Entwicklungsverlauf durch PHENIPS

Bei den ca. zweiwöchentlichen Fangbaumkontrollen wurden an den verschiedenen Positionen am Stamm des Fangbaumes das Vorhandensein von Rammelkammern notiert, sowie das vorgefundene Entwicklungsstadium und eventuelle weitere Beobachtungen zur Brutentwicklung. Die Längen vorhandener Muttergänge wurden gemessen (Tab. 28). Aus diesen Aufzeichnungen wurde das maximale Entwicklungsstadium an den Fangbäumen zu den jeweiligen Kontrollterminen abgeleitet.

In Abb. 34 sind die beobachteten maximalen Entwicklungsstadien mit farbigen Kreuzen in die graphische Darstellung der Simulation von PHENIPS eingetragen. Die tatsächliche Brutentwicklung entspricht groß Teils der von PHENIPS für den jeweiligen Kontrollzeitpunkt prognostizierten Entwicklung. Eine Abweichung zwischen aktuellem und modelliertem Entwicklungsfortschritt gab es lediglich an Fangbaum 2, an dem länger als erwartet Eier vorgefunden wurden.

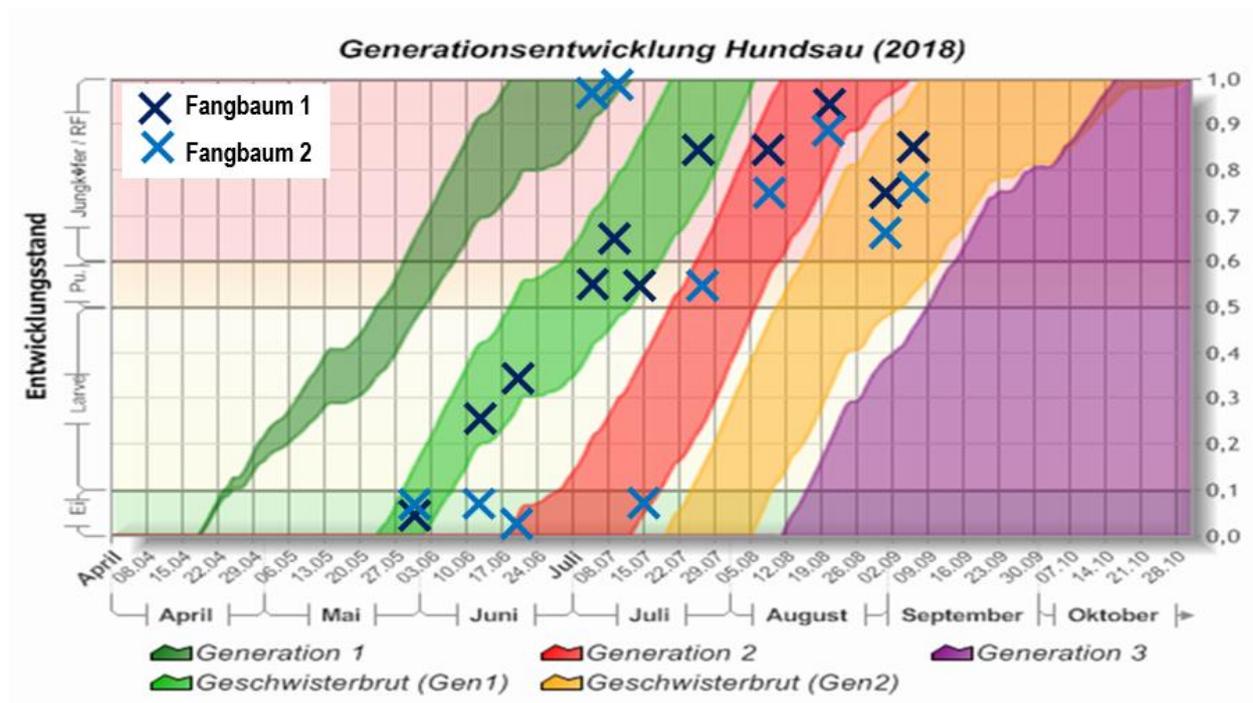


Abb. 34: Simulationsergebnisse von PHENIPS (Quelle: <http://iff-server.boku.ac.at>) im Vergleich mit tatsächlich an den Fangbäumen vorgefundenen Entwicklungsstadien zum jeweiligen Kontrolltermin in beiden Beständen.

Tab. 28: Entwicklungskontrollen von *Ips typographus* im unteren, mittleren und oberen Stammabschnitt der Fangbäume in Bestand I und II. Das Vorhandensein von Rammelkammern (RK) und die Länge von Muttergängen(MG) wurden vermerkt, sowie die vorgefundenen Entwicklungsstadien, Eier, Larven (La), Puppen (Pu), Jungkäfer (JK)

<i>Ips typographus</i> - Entwicklungskontrolle an windgeworfenen Bäumen in den Beständen I und II									
Bestand	Kontrolltermin	Position	RK	MG(cm)	Eier	La	Pu	JK	Anmerkungen
I	29.05.2018	unten	vorh	2,5	ja				frische Einbohrungen auf gesamter Stammlänge
		mitte	vorh	1,0	ja				
		oben	vorh						
II	29.05.2018	unten	vorh	2,0	ja				Einbohrungen hauptsächlich im oberen Stammbereich, am Kronenansatz
		mitte	vorh	5,0	ja				
		oben	vorh	7,0	ja				
I	12.06.2018	unten	vorh	0,0					Männchen allein in Rk, <i>T.f.</i> beim Vertilgen
		mitte	vorh	5,0	ja	ja			
		oben	vorh	6,0	ja				
II	12.06.2018	unten	?						
		mitte	vorh	1,0; 0,8	ja				
		oben	vorh						
I	19.06.2018	unten							Baum harzt noch stark, Käfer tot
		mitte	vorh	12	ja	ja			
		oben	vorh	1,0; 10,5	ja				
II	19.06.2018	unten							
		mitte	vorh	4,5	ja				
		oben	vorh	4,5	ja				
I	02.07.2018	unten	vorh	9,5	ja	ja			Erste GB, Larve ganz frisch in Puppenwiege
		mitte	vorh	8	ja	ja	ja		
		oben	vorh	?	ja	ja	ja		
II	02.07.2018	unten							unten nicht besiedelt Geschwisterbrut?
		mitte	vorh	7,5	ja				
		oben	vorh	9	ja	ja	ja	ja	
I	09.07.2018	unten							Männchen allein in frischer RK
		mitte	vorh	9			ja	ja	
		oben	vorh	13			(ja)	ja	
II	09.07.2018	unten							seltene Einbohrlöcher, keine Besiedelung
		mitte	vorh	4,0; 5,0	ja				
		oben	vorh	6,3				ja	
I	14.07.2018	unten	vorh	7,3	ja	ja			Puppenwiegen
		mitte	vorh	9,5; 12,5	ja	ja	ja		
		oben	vorh	5,5; 5,5	ja				
II	14.07.2018	unten							2 Adulte beim Anlegen von MG im Brutbild daneben weiße Verpilzung in RK
		mitte	vorh	3,5	ja				
		oben	vorh	6,5	ja				
I	26.07.2018	unten							JK gerade fertig (frische Bohrmehlhaufen, aber vom Kupferstecher)
		mitte	vorh	12,8			(ja)	ja	
		oben	vorh	?				ja	
II	26.07.2018	unten							1 <i>T.f.</i> -larve
		mitte	vorh	7		ja	ja		
		oben	vorh	4				ja	
I	09.08.2018	unten							Stamm komplett besiedelt
		mitte	?	?				ja	
		oben	?						
II	09.08.2018	unten	vorh	0,5;2;1;2,5	ja				frisch! wirkt aber viel älter
		mitte	vorh	5,5;4	ja				
		oben	?	?				ja	
I	20.08.2018	unten	vorh	7;4,5;5,5	ja	ja			verpilztes Brutsystem. Puppenwiege verpilzt, Puppe gelblich, tot Frischer Befall, aber Bastkäferart
		mitte	?	?			ja	ja	
		oben	?	?		?			
II	20.08.2018	unten	vorh	8;6	ja				frisch, unterer Stammabschnitt erstmalig besiedelt!
		mitte						ja	
		oben							
I	30.08.2018	unten							Reifungsfraß/ Ausflug? verpilzte Fraßgänge, sek. Bewohner Reifungsfraß, frisch verpuppt
		mitte						ja	
		oben						ja	
II	30.08.2018	unten	vorh	1;5,5	ja				wird gerade angelegt fertiges unübersichtliches Brutbild, noch einige JK, schon sek. Bewohner
		mitte	?					ja	
		oben	vorh	10	ja				
I	05.09.2018	unten						ja	Reifungsfraß, teilw. ausgebohrt, nicht mehr alle JK im System, ungünstige Entwicklung Reifungsfraß, teilw. ausgebohrt, nicht mehr alle JK im System, hohe Mortalität, Pilze viele Ausbohrlöcher, bessere Entwicklung
		mitte						ja	
		oben						ja	
II	05.09.2018	unten							wenig Ausbohrlöcher, viele JK noch im Brutsystem wenig Ausbohrlöcher, viele JK noch im Brutsystem
		mitte						ja	
		oben						ja	

3.4.4 Beifänge

In den fünf Fallen wurden neben *I. typographus* eine Vielzahl anderer Insektenarten und Spinnentiere (Arachnidae) gefangen. Die häufigste Art war der Ameisenbuntkäfer (*Thanasimus formicarius*), der als wichtiger Antagonist der Buchdrucker zusammen mit deren Schwärmzeitpunkten besonders aktiv ist. Das durchschnittliche Verhältnis von Buchdruckern zu Ameisenbuntkäfern war 21:1. Die erste Falle hatte die meisten Buntkäferfänge im Verhältnis zu Buchdruckern, gefolgt von der fünften (Abb. 35). Daneben waren auch verschiedene Bockkäferarten (Cerambycidae) häufig zu finden. Die Anzahl und Vielfalt an Antagonisten im Beifang waren insgesamt bemerkenswert groß.

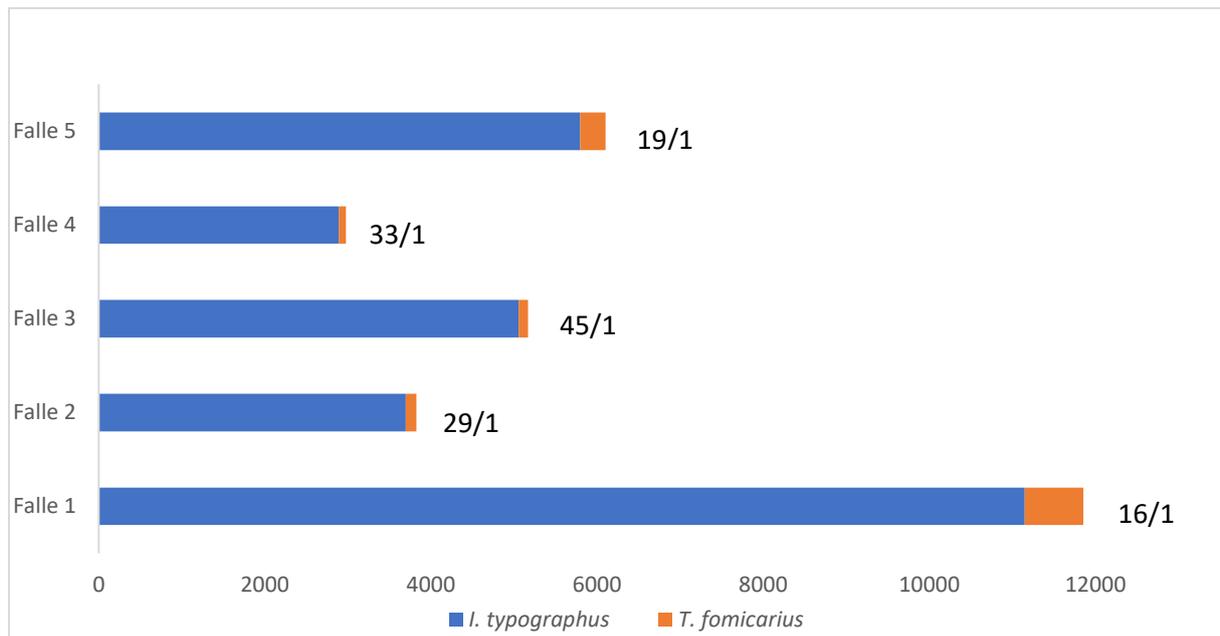


Abb. 35: Fangzahlen von Buchdrucker und Ameisenbuntkäfer in den 5 Fallen und Verhältnis der Fangzahlen.

4. Diskussion

In dieser Arbeit wurden das Borkenkäfer-Phänologie Modell PHENIPS und das hydrologische Modell TDEF auf zwei Standorten der Hundsau im Wildnisgebiet Dürrenstein evaluiert. Abgesehen von der Parametrierung und Verifizierung der Modelle im Untersuchungsgebiet, sollte auch eingeschätzt werden, inwieweit Schwärmzeiten des Buchdruckers, *I. typographus* im Sommer 2018 mit Perioden erhöhter Disposition für Befall infolge von Trockenstress zusammenfielen.

4.1 Situation im Untersuchungsgebiet

Die Borkenkäferbefallssituation wird entscheidend von abiotischen Schadereignissen und Bestandesparametern, insbesondere dem Anteil an Fichte, beeinflusst (Schopf & Köhler, 1995; Netherer & Nopp-Mayr, 2005). Viele Waldbestände der Hundsau entsprechen nicht der potentiell natürlichen Waldgesellschaft aus Fichte, Tanne und Buche. Der hohe Fichtenanteil ist das Erbe der intensiven forstlichen Bewirtschaftung in dieser Region, die erst vor wenigen Jahrzehnten eingestellt wurde. Die anthropogen geprägten Bestände brechen unter Ausbleiben waldbaulicher Maßnahmen sukzessive zusammen, beschleunigt durch Buchdrucker- und Kupferstecherbefall. Borkenkäfer finden in den gleichaltrigen Reinbeständen günstige Entwicklungsbedingungen vor und werden im Wildnisgebiet Dürrenstein grundsätzlich nicht bekämpft. Im Jahr 2003 erfolgte ein erster nennenswerter Befall, der sich in den Folgejahren nestartig ausbreitete. Durch einen Windwurf im Jahr 2007 wurden günstige Bedingungen für weiteren starken Befall im Folgejahr geschaffen. Ein großer Lawinenabgang im März 2009 stellte sehr viel bruttaugliches Material zur Verfügung und zog eine gewaltige Schneise in den Bestand. Dadurch konnte sich eine große Buchdruckerpopulation aufbauen und es kam zu Stehendbefall. Blackwell (2011) zeigte, dass an die Lawinenschneise angrenzende Bäume höhere Rindentemperaturen aufwiesen, was zu einer gesteigerten Emission volatiler Rindenzinhaltsstoffe (Monoterpene) führen kann. Das führt potentiell zu einer erhöhten Lockwirkung der Bäume für Pionierkäfer, bei einer gleichzeitig reduzierten Abwehrfähigkeit, z.B. durch Rindenverletzungen und Trockenstress. Der Lawinenabgang führte zu einer Auswertung der Befallsherde auch im Jahr 2010, jedoch nicht zu flächendeckendem Befall (Blackwell, 2011). Faktoren wie ungünstige Witterung oder die hohe Anzahl an Antagonisten dürften dazu beigetragen haben, die Entwicklung einzubremsen. Im Untersuchungsjahr 2018 trat trotz günstiger Witterung kein Stehendbefall auf. Es ist aber davon auszugehen, dass sich die Käferpopulation aufgrund der hohen Lufttemperaturen weiter aufbauen konnte, da der Sommer 2019 ebenfalls überdurchschnittlich warm war.

Durch die Lage des Wildnisgebietes im Nordstau der Alpen ist der Niederschlag generell sehr hoch und liegt weit über den für eine erhöhte Prädisposition von Fichtenbeständen kritischen Wert von 360 mm während der Vegetationsperiode (Schwertfeger, 1955; Netherer, 2003). Selbst in den vergangenen Jahren, die deutlich heißer und niederschlagsärmer waren als der langjährige Durchschnitt (Hager, 2018), ist deshalb nicht von starkem Trockenstress der Fichtenbestände auszugehen. Zudem liegen die untersuchten Bestände auf kalklehmdominierten Standorten, die günstige Bedingungen für Nährstoff- und Wasserversorgung bieten. Mosaikartig können jedoch sehr seichtgründige Bereiche mit anstehendem Grundgestein und Spalten, die hohe Durchwurzelungstiefen zulassen, nebeneinanderliegen. Besonders am Standort II ist das der Fall. Die Simulation des

Bodenwassergehalts und des Transpirationsdefizites mit Eingangsdaten, die diesen unterschiedlichen Situationen gerecht werden (minimale und maximale Angaben für RD und STONE), erlaubten eine genauere Einschätzung der kleinstandörtlich wechselnden Bodenwasserversorgung.

4.2 Modellierung von SWC und TDEF

Das hydrologische Modell TDEF wurde im Zuge des Rosalia Trockenstress-Experiments am Mittelgebirgsstandort Auerberg im Lehrforst der BOKU entwickelt und validiert (Matthews et al., 2018). Netherer et al. (2019) modellierten Transpirationsdefizite für Fichtenbestände unterschiedlicher Standorte mehrerer ÖBf Forstbetriebe unter der Voraussetzung, dass das Modell für diverse Klima- und Bodenverhältnisse anwendbar ist. Die hier für zwei alpine Untersuchungsstandorte gewonnenen Ergebnisse bestätigen diese Annahme grundsätzlich.

Ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit war die Auswirkung unterschiedlicher Parameterkonstellationen auf die Simulationsergebnisse von TDEF. Es zeigte sich, dass die Informationen aus aktuellen, eigenen Erhebungen zu Bestandesmischung und -struktur bzw. Bodenverhältnissen nicht völlig mit den Werten, die den Operatsangaben der ÖBf AG entnommen oder daraus abgeleitet wurden, übereinstimmten. Aktuelle Bestandesaufnahmen ergaben grundsätzlich höhere Werte für Bestandeshöhen als im Operat angegeben, ebenso bessere Bonitäten. Auch in Bezug auf den Blattflächenindex (LAI), eine wichtige Eingangsgröße im Modell und in Abhängigkeit von Bestandesalter und waldbaulichen Maßnahmen sehr variabel, ergaben sich Unterschiede. Dieser Parameter sollte im Optimalfall direkt im Bestand gemessen werden, was jedoch sehr aufwändig ist. Yu et al. (2015) nutzten den Zusammenhang zwischen Bestandesalter und LAI für ein hydrologisches Modell, mit dem Langzeitveränderungen des Wasserhaushaltes je nach forstlicher Nutzung simuliert werden können, eine Anwendung der altersabhängigen Funktion erschien deshalb für TDEF sinnvoll. Der mittels hemisphärischer Fotografie gemessene LAI lag für beide Bestände ungefähr bei 6, der aus den Operatsangaben in Abhängigkeit vom Bestandesalter abgeleitete Wert für Bestand I lag bei 8, für Bestand II bei 4. Dieser sehr niedrige Wert kam durch die hohe Altersangabe im Operat für Bestand II zustande, die nicht der tatsächlichen Situation entsprach. Im Operat ist die Fläche, in der Bestand II liegt, sehr groß und beinhaltet auch einen Steilhangbereich, der nicht genutzt wurde und deshalb fast doppelt so alt wie der Restbestand ist. Aus demselben Grund wichen die Angaben für den Bestockungsgrad aus dem Operat und den eigenen Erhebungen im Bestand II voneinander ab. Für forstliche Maßnahmenplanung ist eine derart grobe Flächeneinteilung vermutlich ausreichend, nicht aber für Simulationen, die auf genaue Standort- und Bestandesdaten aufbauen.

Die Diversität der Flächen zeigte sich insbesondere bei der Ansprache der Bodencharakteristika wie Bodentyp, Gründigkeit, Durchwurzelungstiefe und Grobanteil. Der Bodentyp im Bestand I wurde als pseudovergleyter Kalklehm mit stark mit der Bodentiefe zunehmendem Skelettanteil angesprochen. Dies entspricht im Wesentlichen den Angaben aus dem Operat (tiefgründiger, skelett- und tonreicher Karbonatstandort). Daher stimmten auch die aus den Bodencharakteristika abgeleiteten Eingangsparameter für TDEF grundsätzlich mit den aktuell gemessenen Werten überein, insbesondere Grobanteil und Sättigungswassergehalt. Beim generell sehr inhomogenen Bestand II wichen aktuelle Bestandesbeschreibung und Operatsangaben jedoch deutlich voneinander ab. Die Profilansprache ergab hier Rendzina mit sehr geringer Gründigkeit und unmittelbar anstehendem Grundgestein, häufig

durchzogen von Kalklehmtonen mit geringem Skelettanteil. Dieses Mosaik aus sehr seichtgründigen und spaltengründigen Mikrostandorten resultierte in einer großen Bandbreite für die Werte Durchwurzelungstiefe und Skelettanteil. Laut Operat befindet sich Bestand II innerhalb einer flächenmäßig großen Unterabteilung, die pauschal als seichtgründiger, sehr trockener Felssteilhangstandort beschrieben wird. Die Bodenart musste aufgrund dieser Beschreibung als Sand interpretiert werden, womit sich stark von den Laborergebnissen abweichende Werte für die bodenphysikalischen Parameter, Luftentritts-Druck des Bodens (ALPHA), Verteilung des unimodalen Boden-Porenvolumens (LAMBDA), Restwassergehalt (THETA_R) und Sättigungswassergehalt (THETA_S) ergaben. Die Korngrößenanalyse ergab für beide Bestände Schluff mit Tongehalten von 30-65% ohne jeglichen Sandanteil. Grobanteile und Korngrößen können im Labor sehr viel genauer bestimmt werden, als es durch eine Einschätzung im Gelände, beispielsweise mittels Fingerprobe, möglich wäre, geschweige denn durch eine pauschale Beschreibung des Standortes, wie dies im Operat erfolgte.

4.3.1 Vergleich gemessener und simulierter Bodenwassergehalte (SWC) unter Berücksichtigung verschiedener Eingangswerte

Insbesondere hinsichtlich der Durchwurzelungstiefe RD und dem Skelettanteil STONE ergaben sich für die Parametrierung von TDEF sehr unterschiedliche Parameter-Konstellationen. Die Schwankungsbreite der Messwerte für STONE lag im Bestand I bei 60% und im Bestand II bei 80%. Die minimale und maximale Durchwurzelungstiefe unterschied sich in Bestand I und II aufgrund der teils hohen Spaltengründigkeit um 900-950 mm. Die Größe der Eingangsparameter STONE und RD hat jedoch grundsätzlich sehr großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse, was sich im Zuge mehrerer Modelldurchläufen auf Basis der unterschiedlichen Parameterkonstellationen deutlich zeigte.

Bei Annahme von Minimalwerten für STONE von 90% und RD von 20 cm für Bestand I beschreibt das TDEF Modell Bodenwassergehalte eines alpinen Extremstandorts und liegt damit weit unter den aktuellen Messwerten. Gute Übereinstimmung, vor allem Ende August 2018, zeigen jedoch die vor Ort gemessenen Werte mit den Simulationsergebnissen, wenn sehr tiefgründige Bodenverhältnisse mit geringem Skelettgehalt angenommen werden. Etwa 10% darunter lag die Kurve auf Basis der Operatsdaten, die in etwa dem Mittel der für RD und STONE auf der Fläche erhobenen Werte entsprechen. Auffallend ist, dass die im Bestand I gemessenen Bodenfeuchtwerte im Frühjahr ansteigen, somit deutlich von Niederschlagsereignissen und Hangwasserzug beeinflusst waren, während die simulierten Werte zwischen Mai und Juli nur gering schwankten. Die Sensitivität des TDEF Modells in Bezug auf höhere Niederschlagsmengen ist offenbar begrenzt.

Der simulierte Bodenwassergehalt für Bestand II auf Basis der Operatsdaten bildet den Verlauf der tatsächlichen Messwerte im Gelände in keiner Weise ab. Damit zeigt sich wiederum die nicht den Tatsachen entsprechende Zuordnung der Bodenart Sand. Auch unter Annahme der minimalen, probenbasierten Werte ergaben sich sehr niedrige Bodenwassergehalte. Bei Berücksichtigung einer hohen Wasserspeicherkapazität des Bodens und der maximal vor Ort ermittelten Werte für RD und STONE lagen die modellierten SWC Werte ca. 10% über den Messwerten.

Eine gute Annäherung der beiden Kurven wurde jedoch unter Annahme der probenbasierten Mittelwerte für RD und STONE erzielt.

Aktuelle und simulierte Bodenwassergehalte stimmen am besten überein, wenn in Bezug auf Durchwurzelungstiefe und Skelettgehalt sehr gute Bedingungen vorausgesetzt wurden. Die TDR Messmethode erforderte eine Installation von Metallstäben in der Länge von 30 cm, die zur Gänze in den Boden getrieben werden mussten. Dies war jedoch nur an Standorten möglich, die hohe Gründigkeit und geringen Skelettanteil aufwiesen. Messwerte für Standorte mit geringer Gründigkeit und hohem Skelettanteil konnten folglich nicht erhoben werden.

4.4.2 Modellierung von Transpirationsdefiziten

Das Transpirationsdefizit berechnet sich aus der Differenz zwischen potentieller und aktueller Transpiration eines Bestandes in mm in Abhängigkeit von Bodenbedingungen und kann als Indikator für Trockenstress interpretiert werden (Zweifel et al., 2005; Bréda et al., 2006). Auf Basis von für das Untersuchungsgebiet optimalen Parameterkonstellationen, also geringer bis mittlerer Skelettanteil und hohe bis mittlere Durchwurzelungstiefe für Fichte auf tonreichen Böden, ergaben sich im Sommer 2018 keine Transpirationsdefizite. Nur unter Annahme „ungünstiger“ Werte für RD und STONE bzw. einer sehr geringen Wasserspeicherkapazität des Bodens (Bodenart Sand) kann in den untersuchten Beständen Trockenstress auftreten. Auf sehr seichtgründigen und skelettreichen Kleinstandorten mit geringer Wasserhaltekapazität sind folglich in den Sommermonaten tägliche Transpirationsdefizite von maximal 1,6 mm bzw. 3,5 mm theoretisch möglich. In Bezug auf das Sommerdefizit (Juni bis August) ergab sich damit für Bestand I eine Schwankungsbreite von 0,1-16,8 mm, für Bestand II von 0-36,6 mm. Die Werte für Bestand II ergeben sich jedoch aus der Bodenart Sand und überschätzen damit die tatsächliche Situation. Im Vergleich dazu betragen mittels TDEF berechnete mittlere Sommerdefizite des Forstbetriebs Waldviertel-Voralpen im Jahr 2013 ca. 17mm, im Jahr 2015 ca. 35 mm. Vergleichbare Werte wurden beispielweise in den Kalkalpen für den Forstbetrieb Inneres Salzkammergut mit unter 5 mm simuliert (Netherer et al., 2019).

4.5 Anwendung des Modells TDEF im Untersuchungsgebiet

Dem Modell TDEF liegen komplexe bodenphysikalische und klimatische Zusammenhänge zugrunde, wobei jedoch Wasserflüsse durch mehrere Bodenhorizonte oder Winterniederschläge nicht berücksichtigt werden (Matthews et al., 2018). Die Modellberechnungen starten unter der Bedingung, dass der Boden nach der Winterperiode wassergesättigt ist. Dies ist eine generelle Annahme und nicht in jeder geografischen Region gleich wahrscheinlich, entspricht jedoch den hydrologischen Gegebenheiten der Hundsau. Durch die großen Schneemengen in diesem Gebiet, die lange liegenbleiben, ist der Boden vor dem Austrocknen geschützt und im Frühjahr mit hoher Wahrscheinlichkeit wassergesättigt. Für Gebiete, in denen kaum Winterniederschläge fallen und der

Boden bereits im Frühjahr trocken ist, kann man die initialen Modellbedingungen, z.B. den Startzeitpunkt, anpassen.

Die Verfügbarkeit und Qualität der Eingangsparameter bestimmt die Genauigkeit des Simulationsergebnisses. Die Anwendbarkeit von TDEF kann hier an seine Grenzen stoßen, insbesondere wenn notwendige Eingangsparameter, wie der Blattflächenindex und genaue Bodencharakteristika fehlen. Diese Problematik zeigte sich bei Bestand II, in dem das Werben ungestörter Bodenprofile und eine Laboranalyse sehr genaue Informationen lieferte, während das Operat der ÖBf AG nur eine lückenhafte und realitätsferne Datenquelle darstellte. Deren Beschreibung der Bodencharakteristika deutete am ehesten auf die Bodenart „Sand“ hin, obwohl aktuelle Analysen keinen Sandanteil, sondern hohe Schluff- und Tonanteile ergaben. Pedotransferfunktionen bieten die Möglichkeit, bodenphysikalische Eingangsparameter für hydrologische Modelle aus einfach bestimmbaren Eigenschaften wie der Bodenart (Sand, Lehm, Schluff und Ton) abschätzen zu können. Die Funktionen oder Algorithmen beschreiben den Zusammenhang zwischen verschiedenen Bodencharakteristika und können somit aufwändige Analysen ersetzen, berücksichtigen jedoch nicht zeitliche Variationen der Bodeneigenschaften, wie sie durch Änderungen des Bewuchses und des Managements entstehen. Bei Einmischung organischen Materials, Bodenerosion oder Bearbeitung verändern sich hydrologische Eigenschaften so stark, dass die Anwendbarkeit von Pedotransferfunktionen an ihre Grenzen gelangt (Pachepsky & Van Genuchten, 2011).

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der erforderliche Klimadatensatz, insbesondere tägliche Temperatur- und Niederschlagswerte. Gerade weil die Niederschlagsmengen lokal sehr unterschiedlich sein können, z.B. durch Sommergewitter, ist eine Klimastation vor Ort vorteilhaft. Niederschlagsmesser sind jedoch anfällig für Störungen, besonders wenn sie extremen Witterungsbedingungen ausgesetzt und Kontrollen aufwändig sind, wie am schwer erreichbaren Untersuchungsstandort Hundsau. Dass der Niederschlagsmesser schon zu Beginn der Untersuchungen verstopft war, wurde erst bei Kontrolle der Niederschlagsdaten im Juni 2018 erkannt. Auch nach der Reinigung waren die Regenwerte nicht plausibel, weshalb schlussendlich auf Daten der ZAMG-Station in Lunz am See zurückgegriffen werden musste. Trotz der Entfernung der ZAMG Station zum Untersuchungsgebiet ergaben sich auf Basis der Niederschlagsdaten plausible Simulationsergebnisse von TDEF.

4.6 Fallenfänge und Borkenkäferentwicklung im Vergleich zur Simulation der Buchdrucker-Phänologie mittels PHENIPS

Im Untersuchungsgebiet wurden entlang der im Sommer 2018 noch befahrbaren Forststraße fünf automatisierte und mit Pheroprax beköderte Pheromonfallen aufgestellt. Somit standen die Fallen auf verschiedenen Seehöhen. Die Fangzahlen der fünf Fallen waren recht unterschiedlich, von nur knapp dreitausend Buchdruckern in Falle 4, die auf einer Freifläche stand, bis zu über elftausend Individuen in der höchstgelegenen Falle 1 auf 900 m Seehöhe. Sie befand sich nahe bei Bestand I, einem 100-jährigen Fichtenreinbestand, der durch den Lawinenabgang 2009 zu einer Seite hin geöffnet ist und somit für den Buchdrucker sehr attraktiv war.

Phasen mit erhöhten und geringen Fangraten folgten an allen Fallenstandorten demselben Trend. Simulierte Schwärmzeiten zeigten eine gute Übereinstimmung mit den tatsächlich beobachteten

Flughöhepunkten von *I. typographus*. Die Erhebungen für diese Arbeit konnten jedoch wegen der Unzugänglichkeit des Gebietes und der Schneeablagerungen auf der Zufahrtsstraße erst Ende Mai begonnen werden, als die Käfersaison schon in vollem Gange war. Der von PHENIPS prognostizierte Schwärmbeginn, sowie die Hauptflugphase/der Befallsbeginn am 11. April wurden damit verpasst. Die Genauigkeit dieser ersten Prognose ist entscheidend für das Zutreffen aller weiteren Vorhersagen. Ein Nachweis, ob der aktuelle und prognostizierte Schwärmbeginn im Frühjahr exakt übereinstimmen kann hier nicht erbracht werden, ist jedoch aufgrund der geringen Abweichungen zwischen beobachteten und simulierten Flugzeiten der Filialgenerationen anzunehmen. Zwischen modellierter Anlage der ersten Geschwisterbrut und einem ersten vor Ort beobachteten Höhepunkt in den Fangzahlen bestand eine Abweichung von nur 2 Tagen. Zwischen dem berechneten Start der Brutanlage für die zweite Generation und dem zweiten Höhepunkt im Schwärmflug betrug die Abweichung nur einen Tag. Die prognostizierte Anlage der dritten Generation und ein weiterer Höhepunkt in den Fangzahlen wichen 4 Tage voneinander ab. Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist, dass alle beobachteten Ereignisse zeitlich nach den prognostizierten Entwicklungsschritten lagen, die sich grundsätzlich auf die schnellstmögliche Entwicklung beziehen. Für das Ergreifen von Maßnahmen zur Bekämpfung ist diese Verzögerung somit eher hilfreich. Der letzte große Höhepunkt in der Schwärmaktivität der Käfer im Untersuchungsgebiet war am 16. August 2018 zu beobachten. Danach gingen die Fangzahlen stark zurück und die Aktivität kam zum Erliegen, obwohl weiterhin ideale Temperaturen vorherrschten. Dieser Sachverhalt entspricht den Beobachtungen von Doležal & Sehnal (2002) und von Schopf et al. (2004), dass Buchdruckerimagines in eine reproduktive Diapause eintreten, wenn die Tageslänge weniger als 15 Stunden beträgt. Davon scheinen sie auch für Brutanlagen ideale Witterungs- und Temperaturbedingungen nicht abzuhalten.

Die tatsächliche Brutentwicklung an den Fangbäumen entsprach größtenteils der von PHENIPS für den jeweiligen Kontrollzeitpunkt prognostizierten Entwicklung. Eine Abweichung zwischen aktuellem und modelliertem Entwicklungsfortschritt gab es lediglich an einem Kontrolltermin bei einem Fangbaum, an dem länger als erwartet Individuen im Eistadium vorgefunden wurden. Für diesen Zeitpunkt prognostizierte das Modell ausschließlich Individuen im Larvenstadium (Geschwisterbrut) oder unreife Jungkäfer (Generation 1), es handelte sich somit um stark verspätete Eiablagen der Parentalgeneration. Des Weiteren gab es bei einem Fangbaum Unterschiede im Zeitpunkt der Besiedelung zwischen oberem und unterem Stammabschnitt, der stärker sonnenexponiert war aber trotzdem erst ab Mitte August Einbohrungen aufwies. Beim anderen Fangbaum wurde hingegen auf ganzer Stammlänge frische Einbohrlöcher bereits am ersten Kontrolltermin dokumentiert.

Eine gute Übereinstimmung zwischen dem tatsächlichen und von PHENIPS prognostizierten Entwicklungsfortschritt von Buchdrucker zeigen eine Reihe von Untersuchungen, zum Beispiel die Arbeiten im Nationalpark Kalkalpen (Schopf et al., 2004, 2007) und im Salzkammergut (Schopf et al., 2009). In der Hundsau wurden PHENIPS-Simulationen bereits im Jahr 2009 und 2010 mit Feldbeobachtungen verglichen. Die von Blackwell (2011) errechneten Rindentemperaturen stimmten gut mit jenen überein, die in den Bereichen der großen Lawine gemessen wurden. Im angrenzenden Bestand waren die Temperaturen aufgrund der Überschilderung geringer, die Brutentwicklung erfolgte dort langsamer als prognostiziert. Auch Berec et al. (2013) fanden im Böhmerwald keine bis nur geringe Abweichungen von durch PHENIPS aus den Lufttemperaturen errechneten Rindentemperaturen und mittels Wärmesensoren in der Rinde gemessenen Temperaturen. Die errechneten Schwärmzeiten korrespondierten im Großen und Ganzen mit den Beobachtungen. Ebenso wurde die Anzahl an Generationen und Geschwisterbruten von PHENIPS richtig prognostiziert, deren Beginn und

Entwicklungsabschluss waren jedoch nicht immer identisch. Gründe hierfür könnten Niederschlag und Beschattung der Borke sein, die lokal zur Reduzierung der Temperatur beitragen können.

PHENIPS kann somit für unterschiedliche Regionen und Standorte die Schwärmphasen und die Generationsentwicklung des Buchdruckers genau berechnen. Verändert werden müssen im Modell lediglich bestimmte Eingangswerte wie Längen- und Breitengrad, sowie die Zeitzone. Berec et al. (2013) betonen darüber hinaus, dass Temperaturschwellenwerte, die für bestimmte Entwicklungsstadien erreicht werden müssen, populationsbedingt unterschiedlich sein können und sich möglicherweise auch mit der Höhenlage ändern. Im Phänologiemodell für skandinavische Populationen von *I. typographus* wurden Schwellenwerte wie der Entwicklungsnullpunkt basierend auf Feldbeobachtungen von Annala (1969) angepasst (Jönsson et al., 2007, 2009, 2011).

Weitere relevante Parameter für die Simulation von Buchdrückerschwärmzeiten und Entwicklung sind Niederschlag und Wind, da das Modell an sehr regnerischen oder windigen Tagen die Aktivität der Käfer überschätzen kann. Die Daten hierfür sind in der Praxis meist nicht verfügbar. In Beständen mit kleinräumigen Temperaturgradienten können simulierte Ergebnisse auch von tatsächlichen Beobachtungen abweichen, wenn keine hochaufgelösten Meteodaten, sondern nur die Temperaturen einer weiter entfernten Klimastation verwendet werden.

4.7 Beifänge

In den Fallen wurden neben *I. typographus* eine Vielzahl anderer Insektenarten und Spinnentiere (Arachnidae) gefangen. Bockkäfer (Cerambycidae) waren die häufigsten Vertreter, vor allem *Rhagium*-Arten wie der Gelbbindige Zangenbock (*Rhagium bifasciatum*) oder der Schrotbock (*Rhagium inquisitor*). Beides sind typische Totholzbewohner, die durch den Buchdruckerbefall im Untersuchungsgebiet viele morsche Stümpfe und Stämme finden, um ihre zweijährige Entwicklung darin abzuschließen.

Die häufigste Art war jedoch der Ameisenbuntkäfer (*Thanasimus formicarius*). Die Aggregationspheromone von *I. typographus* werden von *T. formicarius* als Kairomone wahrgenommen und locken diese an (Hansen, 1983; Zurr, 1983). Somit war ein relativer hoher Beifang von mit Pheroprax beköderten Fallen zu erwarten. Während ihrer Entwicklung frisst eine Ameisenbuntkäferlarve durchschnittlich 57 Larven von Borkenkäfern (Dippel et al., 1997), aber auch als adultes Tier macht der Ameisenbuntkäfer Jagd auf adulte Buchdrucker.

Ameisenbuntkäfer und Buchdrucker wurden in einem durchschnittlichen Verhältnis von 1:21 gefangen. Die erste Falle hatte die meisten Buntkäferfänge im Verhältnis zu Buchdruckern mit 1:16 und auch die höchsten absoluten Buchdruckerfangzahlen während des gesamten Untersuchungszeitraumes. Nur diese Falle (mit 900 m Seehöhe am höchsten gelegen) stand in unmittelbarer Nähe zu einem für Buchdruckerbefall prädisponierten Bestand, und gleichzeitig auch nahe ehemaliger Befallsflächen. Die mit 790 m Seehöhe tiefst gelegene Falle folgte mit einer Fangrate von knapp 5800 Buchdruckern und einem Ameisenbuntkäferverhältnis von 1:19. Dieser Fallenstandort grenzte weder an besonders befallsgefährdete Bestände, noch lag sie neben alten Befallsflächen. Eine andere Falle, bei der das eher zutraf, hatte hingegen den geringsten Anteil an Ameisenbuntkäfern mit 1:45. Akkuzu et al. (2009) konnten ebenfalls keine Korrelation zwischen der Anzahl der *T. formicarius* und *I. typographus* erkennen. Die Autoren behaupten aber, dass *T. formicarius* im Gegensatz zu

I. typographus nordexponierte Lagen am Unterhang bevorzugt. Auch Weslien (1994) stellte einen signifikanten Unterschied der Fangzahlen bei *Thanasimus spp.* in Abhängigkeit von der Höhenlage fest. Dies konnte hier nicht bestätigt werden. Im Zuge einer Masterarbeit wurden im Kobernaußer Wald (Oberösterreich) mittels Prügelfallen am Oberhang deutlich mehr Ameisenbuntkäfer gefangen als am Unterhang (Koleva, 2010).

Der im Untersuchungsgebiet vorgefundene Anteil an Ameisenbuntkäfern in den Fallen lag mit durchschnittlich 4% deutlich höher als die in der Literatur dokumentierten Anteile zwischen 0,1% - 1% (Nicolai et al., 1992; Schlyter & Lundgren, 1993; Weslien, 1994; Rettelbach, 2002).

Neben der Anzahl war auch die Vielfalt der Antagonisten im Beifang insgesamt bemerkenswert groß, beides könnte am Naturwaldcharakter des Untersuchungsgebietes liegen. In der Hundsau treten als natürliche Störung regelmäßig Lawinenabgänge auf, die in der Folge zu Buchdruckerbefall führen. Auch nach einer sehr großen Lawine im Jahre 2009, die viel Brutmaterial zur Verfügung stellte, fand nur lokal eine Gradation statt. Der Befall blieb immer patchworkartig im Gebiet verteilt. Laut Weslien (1994) ist das Verhältnis zwischen *T. formicarius* und *I. typographus* in Gradationsgebieten zehnmal höher zugunsten der Ameisenbuntkäfer als in gradationsfreien Gebieten. Auch sinkt in der Retrogradation die Anzahl der Prädatoren nicht so schnell wie diejenige der Beute. Befallene und tote Bäume wurden in der Hundsau nicht entfernt. Die Entwicklung des Ameisenbuntkäfers erfolgt zeitversetzt (Rettelbach, 2002) und somit konnte sich vermutlich eine hohe Population aufbauen. Im Wirtschaftswald werden die Bäume entfernt, in denen sich Gegenspieler entwickeln könnten. Der Buchdrucker ist zu diesem Zeitpunkt häufig schon ausgeflogen. Begiftung und Entrindung haben vermutlich einen größeren Einfluss auf univoltine Nützlinge wie Ameisenbuntkäfer als auf multivoltine Buchdrucker (Altenkirch et al., 2002). Weslien & Schroeder (1999) vermuten passend dazu, dass in den bewirtschafteten Wäldern die Anzahl von *T. formicarius* signifikant niedriger ist als in nicht bewirtschafteten Wäldern. Die hohe Zahl an Ameisenbuntkäfern in der Zeit nach der Gradation könnte auch dazu beitragen, die Buchdruckerpopulation weiter zu verringern bzw. auf dem Latenzniveau zu halten (Rettelbach, 2002).

4.8 Einschätzung der Buchdrucker-Befallsgefährdung

Um die Befallsgefährdung der untersuchten Fichtenbestände im Untersuchungsjahr 2018 einschätzen zu können, wurde die zeitliche Koinzidenz von Schwärmperioden mit Perioden erhöhter Disposition für Befall infolge Trockenstress (Transpirationsdefizit) der Bestände betrachtet. Aufgrund der Ergebnisse des Rosalia Roof Experiments (Netherer et al., 2015; Matthews et al., 2018) und Erkenntnissen aus früheren Studien (Marini et al., 2013; Temperli et al., 2013) kann das Transpirationsdefizit als geeigneter Kennwert für eine erhöhte Befallsgefährdung durch *I. typographus* angesehen werden. Eine besonders erhöhte Gefährdung besteht, wenn ein Transpirationsdefizit im vorhergegangenen Jahr auftrat, dem ein erneutes Transpirationsdefizit im Sommer des nächsten Jahres folgt. Die Disposition für Befall ist besonders hoch, wenn ein Bestand bereits im Vorjahr vom Buchdrucker besiedelt wurde und einen hohen Fichtenanteil, hohe Bestandesdichte und Gleichaltrigkeit aufweist. Bei Beständen, die generell gut mit Wasser versorgt sind, reichen vergleichsweise geringe Vorjahres-Transpirationsdefizite von 4-5 bis max. 10 mm, um die Befallsdisposition von Beständen entscheidend zu erhöhen (Netherer et al., 2019).

Schopf und Köhler (1995) untersuchten die Auswirkungen von kleinstandörtlichen und baumbezogenen Parametern auf den Befall durch den Buchdrucker im Nationalpark Bayerischer Wald und stellten fest, dass Fichten auf blocküberlagertem Gelände hoch signifikant häufiger befallen werden als solche, die auf Böden ohne Blocküberlagerung stocken. Gerade nach schneearmen Wintern ist auf solchen Standorten, die nur ein geringes Wasserspeichungsvermögen besitzen, die Gefahr von Trockenstress und damit Befall durch Buchdrucker sehr hoch. Es zeigte sich, dass Besonnung ein dominanter Faktor für die Befallsentstehung ist, gefolgt von Blocküberlagerung, Grobskelettanteil, Wechselfeuchte, Vernässung und dem Auftreten von Wipfelbrüchen.

Im Sommer 2018 fand im Untersuchungsgebiet kein Stehendbefall statt. Doch auch hier sind vor allem Einzelbäume, die auf ungünstigen Mikrostandorten in Bezug auf die Wasserversorgung stocken, für Befall disponiert. Das nestartige Befallsmuster im Gebiet spiegelt diesen Sachverhalt wider. Doch die Fichte als sogenannter Flachwurzler kann in spaltengründigen Böden häufig ein stabiles Senkerwurzelsystem ausbilden, mit dem eine gute Wasserversorgung gewährleistet ist. Eine erhöhte Befallsgefährdung gesamter Bestände aufgrund von Trockenstress kann im Untersuchungsgebiet im Sommer 2018 trotz der ungewöhnlich hohen Temperaturen ausgeschlossen werden.

4.9 Schlussfolgerungen

Insgesamt konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass Simulationen des Transpirationsdefizites der Fichte mittels des hydrologischen Modells TDEF realistische Ergebnisse selbst auf extremen Standorten erbringen können, sofern die Modelleingangsdaten eine entsprechende Qualität und Genauigkeit aufweisen. Auf Basis von Operatsdaten, die sich auf zu große Flächeneinheiten beziehen bzw. nur pauschale Beschreibungen beinhalten oder nicht mehr aktuell sind, können Bodenwassergehalte und Transpirationsdefizite nicht plausibel berechnet werden. Die Aktualität der Operatsdaten und wie repräsentativ sie für die betrachtete Fläche sind, ist entscheidend dafür, ob TDEF die Dynamik von Bodenwassergehalt und Transpirationsdefiziten widerspiegeln kann. Vor Ort erhoben werden müssen neben der Bodenart, aus der sich nötige bodenphysikalische Parameter herleiten lassen, die Durchwurzelungstiefe und der Skelettanteil. Entscheidend für die Qualität der Simulationsergebnisse sind zudem eine nahe gelegene Klimastation, deren Messdaten stündlich abgerufen werden können und vor allem repräsentative Niederschlagsdaten.

Der Vorteil der Modellanwendung in der Abschätzung einer Befallsgefährdung aufgrund von Trockenstress liegt darin, dass im Gegensatz zur (zusätzlich auch aufwändigen) Messung die große Bandbreite an Bodenbedingungen dargestellt werden kann. Somit spiegelt sie die Heterogenität dieser Gebirgsstandorte wider und zeigt, dass gute Wasserversorgung und Trockenstress auf kleiner Fläche in direkter Nachbarschaft zeitgleich möglich sind. Bei einer Messung des Bodenwassergehaltes hingegen, findet durch die Methodik eine Selektion tiefgründigerer Standorte mit weniger Skelettgehalt statt.

Diese Arbeit hat außerdem gezeigt, dass PHENIPS mit wenigen Eingangsparametern und auf Basis von für den Standort maßgeblichen Klimadaten die Schwärmphasen, den Befallsbeginn und den Zeitpunkt der Anlage von weiteren Generationen und Geschwisterbruten von *I. typographus* genau simulieren kann. Daraus kann geschlossen werden, dass das Prognosemodell PHENIPS ein Fallenmonitoring ergänzen und sogar weitgehend ersetzen kann. PHENIPS ist ein rein temperaturbasiertes Modell, das neben der Lufttemperatur nur einige wenige Werte wie Seehöhe, Neigung und Exposition des

Bestandes benötigt. Dieses Modell für Risikogebiete zu etablieren ist daher kein Aufwand, während eine zeitnahe Prognose der Borkenkäferentwicklung eine Planung von Forstschutzmaßnahmen und die effiziente Bekämpfung des Buchdruckers unterstützt. Da Trockenstress die Fichte für einen Befall durch den Buchdrucker disponiert, kann die Kopplung des Borkenkäfer-Phänologiemodells mit dem hydrologischen Modell eine Einschätzung der Befallsgefährdung verbessern.

PHENIPS-TDEF kombiniert Informationen zur regionalen Entwicklung des Buchdruckers mit Daten zum Trockenstress der Fichten und dient als effizientes Frühwarnsystem, um zeitgerecht Maßnahmen bei einer drohenden Massenvermehrung des Käfers zu ergreifen.

Literaturverzeichnis

- Akkuzu, E., Sariyildiz, T., Kucuk, M. & Duman, A., 2009.** *Ips typographus* (L.) and *Thanasimus formicarius* (L.) populations influenced by aspect and slope position in Artvin-Hatila valley national park, Turkey. African Journal of Biotechnology Vol. 8 (5): 877-882.
- Altenkirch, W., Majunke, C., Ohnesorge, B., 2002.** Waldschutz auf ökologischer Grundlage. Ulmer Verlag: 434 S.
- Anderbrant, O., Schlyter, F., Birgersson, G., 1985.** Intraspecific competition affecting parents and offspring in the bark beetle *Ips typographus*. Oikos 45: 89-98.
- Annala, E., 1969.** Influence of temperature upon the development and voltinism of *Ips typographus* L. (Coleoptera, Scolytidae). Ann. Zool. Fennici 6: 161-208.
- Amt der NÖ Landesregierung, Gruppe Raumordnung, Umwelt und Verkehr – Abteilung Naturschutz (Hrsg.), 2009.** Europaschutzgebiete: „Ötscher – Dürrenstein“, Informationen zum Natura 2000-Management für das FFH- und das Vogelschutzgebiet, erhältlich: http://www.noel.gv.at/noe/Naturschutz/broschuere_03_oetscher_4.pdf: 23 S.
- Baier, P., Pennerstorfer J., Schopf, A., 2007.** PHENIPS—A comprehensive phenology model of *Ips typographus* L. (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. Forest Ecology and Management, 249(3): 171-186.
- Bengtsson, J., Nilsson, S.G., Franc, A., Menozzi, P., 2000.** Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests. Forest Ecology Management 132: 39–50.
- Berec, L., Dolezal, P., Hais, M., 2013.** Population dynamics of *Ips typographus* in the Bohemian Forest (Czech Republic): Validation of the phenology model PHENIPS and impacts of climate change. Forest Ecology and Management 292: 1–9.
- Biermann, G., 1977.** Zur Überwinterung des Buchdruckers, *Ips typographus* L., in der Bodenstreu (Col., Scolytidae). Abt. B-Waldschutz- der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Göttingen. Journal of applied Entomology 84: 59-74.
- Bitterlich, W., 1948.** Die Winkelzählprobe. Ein optisches Meßverfahren zur raschen Aufnahme besonders gearteter Probeflächen für die Bestimmung der Kreisflächen pro Hektar an stehenden Waldbeständen. Allgemeine Forst- und Holzwirtschaftliche Zeitung, 59. Jahrg., Folge ½: 215-225.
- Blackwell, E., 2011.** Risk assessment of bark beetle outbreaks after an avalanche occurrence in the Dürrenstein Wilderness Area. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria. Institute of Forest Entomology, Forest Pathology and Forest Protection. Diplomarbeit: 84 S.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., Dreyer, E., 2006.** Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. Annals of Forest Science. Vol. 63, Nr. 6: 625-644.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964.** Hydraulic Properties of Porous Media. Colorado State University Hydrology Papers. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA: 37 S.
- Chapin III, F.S., Matson, P.A., Vitousek, P., 2011.** Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer, New York: 529 S.

- Chianucci, F., Cutini, A., 2012.** Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: current controversies and opportunities. Review Paper - doi: 10.3832/ifor0775-005. iForest – Biogeosciences and Forestry 5: 290-295.
- Christiansen E., Warning E.H., Berryman A.A., 1987.** Resistance of Conifers to Bark Beetle Attack: searching for General Relationships. Forest Ecology and Management 22: 89-106.
- Dippel, C., Heidger, C., Nicolai, V., Simon, M., 1997.** The influence of four different predators on bark beetles in European forest ecosystems (Coleoptera: Scolytidae). Entomologia generalis, 21: 161-175.
- Dolezal, P., Sehna, F., 2003.** Imaginal diapause in the bark beetle, *Ips typographus*. In: McManus, Michael L., Liebhold, A. M., (Hrsg.). Proceedings: Ecology, Survey and Management of Forest Insects; Krakow, Poland. Gen. Tech. Rep. NE-311. Newtown Square, PA: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station: 127 S.
- Dolezal P., Sehna, F., 2007.** Effects of photoperiod and temperature on the development and diapause of the bark beetle *Ips typographus*. Journal of Applied Entomology 131: 165 – 173.
- Ellenberg, H., Weber, H.E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., Paulßen, D., 1992.** Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica 18, 2. Auflage, Göttingen: 124 S.
- Faccoli, M., Bernardinelli, I., 2011.** Breeding performance of the second generation in some bivoltine populations of *Ips typographus* (Coleoptera Curculionidae) in the south-eastern Alps. Journal of Pest Science 84: 15-23.
- Forster, B., Meier, F., 2010.** Sturm, Witterung und Borkenkäfer. Risikomanagement im Forstschutz. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Merkblatt für die Praxis, 44: 1-8.
- Fournier, R. A., Hall, R. J., 2017.** Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications. Springer-Verlag: 306 S.
- Gattinger, T.E., 1980.** Hydrogeologie. In: Oberhauser, R. (Hrsg.). Der geologische Aufbau Österreichs. Geologische Bundesanstalt, Wissenschaftliche Redaktion. Springer. Wien, New York: 586 S.
- Gaylord, M.L., Kolb, T.E., Pockman, W.T., Plaut, J.A., Yopez, E.A., Macalady, A.K., Pangle, R.E., McDowell, N.G., 2013.** Drought predisposes pinon-juniper woodlands to insect attacks and mortality. New Phytologist 198: 567-578.
- Hager, H., 2019.** Lunzer Wetterblog auf <http://lunzerwetter.blogspot.com/2019/01/stuem-zeitweise-schneefall-kalt.html>).
- Hansen, K., 1983.** Reception of Bark Beetle Pheromone in the Predaceous Clerid Beetle, *Thanasimus formicarius* (Coleoptera: Cleridae). - J. Comp. Physiol., 150: 371-378.
- Helmschrot, J., 1999.** Integration von Fernerkundung, GIS und empirischer Geländeaufnahme zur Parameterisierung physiographischer Faktoren für die distributive hydrologische Modellierung. Eine Fallstudie im semiariden Flußeinzugsgebiet des Umzimvubu, Ostkap Provinz, Südafrika. Diplomarbeit, Institut für Geographie der Friedrich-Schiller-Universität Jena (unveröffentlicht), 144 S.
- Hoch, G., 2017.** Borkenkäfer 2017: satte 3,5 Millionen Festmeter Schadholz in Österreich. Forstliche Bundesversuchsanstalt, Waldforschungszentrum, BFW, Wien, aufrufbar: <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms2.web?dok=9756>.

- Hochebner T., Frank, G., Rotheneder, G., 2015.** Monitoring der Spechte (*Picidae*) im Wildnisgebiet Dürrenstein. *Silva Fera* 4: 41-69.
- Inoue, A., Yamamoto, K., Mizoue, N., 2011.** Comparison of automatic and interactive thresholding of hemispherical photography. *Journal of Forest Science*, 57: 78-87.
- IUCN.** <https://www.iucn.org/>, aufgerufen am 10.11.2018.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F., 2004.** Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19-35.
- Jönsson, A.M., Harding, S., Bähring, L., Ravn, H.P., 2007.** Impact of climate change on the population dynamics of *Ips typographus* in southern Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology* 146: 70-81.
- Jönsson, A.M., Appelberg, G., Harding, S., Bähring, L., 2009.** Spatio-temporal impact of climate change and the activity and voltinism of the spruce bark beetle *Ips typographus*. *Global Change Biology* 15: 486-499.
- Jönsson, A.M., Harding, S., Krokene, P., Lange, H., Lindelöw, Å., Økland, B., Raven, H.P. Schroeder, L.M., 2011.** Modelling the potential impact of global warming on *I. typographus* voltinism and reproductive diapause. *Climatic Change* 109: 695-718.
- Kenis, M., Wermelinger, B., Grégoire, J.C., 2004.** Research on parasitoids and predators of Scolytidae - a review. In: Lieutier, F., Day, K.R., Battisti, A., Grégoire, J.C., Evans, H.F (Hrsg.). *Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis*, Kluwer Academic Publishers: 237-290.
- Kilian, W., Müller, F., Starlinger, F., 1994.** Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten. Forstliche Bundesversuchsanstalt, Waldforschungszentrum, BFW, Wien: 59 S.
- Kirisits, T., 2004.** Fungal associates of European bark beetles with special emphasis on the ophiostomatoid fungi. In: Lieutier, F., Day, K.R., Battisti, A., Grégoire, J.C., Evans, H.F (Hrsg.). *Bark and wood boring insects in living trees, a synthesis* Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers: 181-235.
- Kirkendall, L. R., Biedermann, P. H. W., Jordal, B. H., 2015.** Evolution and Diversity of Bark and Ambrosia Beetles. In: Vega, F.E., Hofstetter, R. W., (Hsg.). *Bark Beetles - Biology and Ecology of Native and Invasive Species*, Kapitel 3: 85-156.
- Koleva, P., 2010.** Untersuchungen zur Effizienz von insektizidbehandelten Fanghölzern (Prügelfallen) gegenüber Borkenkäfer (*Ips typographus*). Universität der Bodenkultur, Wien, Masterarbeit: 63 S.
- Koštál, V., Doležal, P., Rozsypal, J., Moravcová, M., Zahradníčková, H., Šimek, P., 2011.** Physiological and biochemical analysis of overwintering and cold tolerance in two Central European populations of the spruce bark beetle *Ips typographus*. *J. Insect Physiology* 57: 1136–1146.
- Krehan, H., Steyrer, G.; Tomiczek, C., 2015.** Borkenkäfer-Kalamität 2009: Ursachen für unterschiedliche regionale Befallsentwicklungen. In <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms2.web?dok=9434>, Forstliche Bundesversuchsanstalt, Waldforschungszentrum, BFW, Wien.
- LAI_WOODY_PLANTS_1231.** A Global Database of Field-observed Leaf Area Index in Woody Plant Species, 1932-2011. <https://earthdata.nasa.com>;
https://daac.ornl.gov/daacdata/global_vegetation/LAI_Woody_Plants/.

- Leditznig, C., Pekny, R., 2014.** Wildnisgebiet Dürrenstein, Wälder aus längst vergangenen Tagen. Hrsg. Schutzgebietsverwaltung Wildnisgebiet Dürrenstein, Scheibbs: 288 S.
- Leditznig, C., Pekny, R., Kohl, I., Zehetner, H., Fischer, S., 2013.** Managementplan Wildnisgebiet Dürrenstein für die Jahre 2013-2022. Hrsg. Schutzgebietsverwaltung Wildnisgebiet Dürrenstein, Scheibbs: 49 S.
- Lehmberg, L., 2013.** Emission von Kommunikationsstoffen des Buchdruckers: Effekt auf Artgenossen und zeitlicher Verlauf, Doktorarbeit, TU München: 83 S.
- Lobinger, G., 1994.** Die Lufttemperatur als limitierender Faktor für die Schwärmaktivität zweier rindenbrütender Fichtenborkenkäferarten, *Ips typographus* L. und *Pityogenes chalcographus* L. (*Col., Scolytidae*). Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz 67: 14-17.
- Marini, L., Lindelöw, Å., Jönsson, A.M., Wulff, S., Schroeder, L.M., 2013.** Population dynamics of the spruce bark beetle: a long-term study. *Oikos, Synthesis Ecology* 122: 1768-1776.
- Marini, L., Økland, B., Jönsson, A.M., Bentz, B., Carroll, A., Forster, B., Gregoire, J.-C., Hurling, R., Nageleisen, L.M., Netherer, S., Ravn, H.P., Weed, A., Schroeder, M., 2017.** Climate drivers on bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography* 40: 1426-1435.
- Marschall J., 1988.** Hilfstafeln für die Forsteinrichtung. Österreichischer Agrarverlag. Wien: 2 S.
- Matthews, B., Netherer, S., Katzensteiner, K., Pennerstorfer, J., Blackwell, E., Henschke, P., Hietz, P., Rosner, S., Jansson, P., Schume, H., Schopf, A., 2018.** Transpiration deficits increase host susceptibility to bark beetle attack: experimental observations and practical outcomes for *Ips typographus* hazard assessment. *Agricultural and Forest Meteorology* 263: 69-89.
- Matthews, B., Netherer, S., 2018.** Investigating drought impacts on the predisposition of Norway spruce to bark beetle infestation (Rosalia Roof Project revisited). *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie* 21: 1-6.
- Mezei, P., Jakuš, R., Pennerstorfer, J., Havašová, M., Škvarenina, J., Ferencík, J., Slivinský, J., Bičárová, S., Bilčík, D., Blaženec, M., Netherer, S., 2017.** Storms, temperature maxima and the Eurasian spruce bark beetle *Ips typographus*—An infernal trio in Norway spruce forests of the Central European High Tatra Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology* 242: 85-95.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 2008.** Principles of Environmental Physics. Academic Press: 418 S.
- Netherer, S., Pennerstorfer, J., 2001.** Parameters relevant for modelling the potential development of *Ips typographus* (*Coleoptera: Scolitidae*). *Integrated Pest Management Reviews* 6: 177-184.
- Netherer S., Nopp-Mayr U., 2005.** Predisposition assessment systems (PAS) as supportive tools in forest management-rating of site and stand-re-lated hazards of bark beetle infestation in the High Tatra Mountains as an example for system application and verification. *Forest Ecology and Management* 207 (1): 99-107.
- Netherer, S., Henschke, P., Matthews, B., Schopf, A., 2013.** Modelling Dynamic Predisposition to Attacks by the Eurasian Spruce Bark Beetle *Ips typographus*. A Drought Stress-Experiment: ROSALIA ROOF PROJECT. *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie* 19: 93-96.

- Netherer, S., Matthews B., Katzensteiner, K., Blackwell, E., Henscke, P., Hietz, P., Pennerstorfer, J., Rosner, S., Kikuta, S., Schume, H., Schopf, A., 2015.** Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *New Phytologist* 205: 1128-1141.
- Netherer, S., Pennerstorfer, J., 2018.** Zusammenhang von Trockenstress (Transpirationsdefizit) bei Fichte und Anfall von Schadholz durch Buchdrucker-Befall in Forstbetrieben der ÖBf AG. Projekt-Endbericht. Bereitstellung eines Prototyps des Modells PHENIPS-TDEF für die ÖBf AG. Wien: 48 S.
- Netherer, S., Pennerstorfer, J., Matthews, B., 2019.** Trockenstress von Fichtenbeständen fördert den Schadholzanfall durch Buchdrucker. Aus dem Projekt: Bereitstellung von Berechnungsergebnissen basierend auf dem Prototyp des Modells PHENIPS-TDEF. *Forstschutz Aktuell* 65 (2): 1-9.
- Netherer, S., Panassiti B., Pennerstorfer J. and Matthews B., 2019.** Acute Drought Is an Important Driver of Bark Beetle Infestation in Austrian Norway Spruce Stands. *Front. For. Glob. Change* 2:39. doi: 10.3389/ffgc.2019.00039
- Nicolai, V.; Hedger, C.; Dippel, C., Strohmenger, T., 1992.** Bark beetles and their predators in bark beetle pheromon traps. - *Zool. Jb. Sys.*, 119: 315-338.
- Nierhaus-Wunderwald, D., Forster, B., 2004.** Zur Biologie der Buchdruckerarten. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, Merkblatt für die Praxis 18: 1-8.
- Nierhaus-Wunderwald, D., 1996.** Die natürlichen Gegenspieler der Borkenkäfer. Merkblatt für die Praxis, 19. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL: 8 S.
- Pachepsky Y.A., van Genuchten M.T., 2011.** Pedotransfer Functions. In: Gliński J., Horabik J., Lipiec J. (Hrsg.). *Encyclopedia of Agrophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series.* Springer, Dordrecht: 556-560.
- Pechacek, P., Kristin, A., 1993.** Nahrung der Spechte im Nationalpark Berchtesgaden. *Vogelwelt* 114: 165-177.
- Plöschinger, B., 1980.** Die nördlichen Kalkalpen. In: Oberhauser, R. (Hrsg.). *Der geologische Aufbau Österreichs.* Geologische Bundesanstalt, Wissenschaftliche Redaktion. Springer. Wien, New York: 223 u. 254 ff.
- Prem, J., Ehgartner, P., 2019.** Holzeinschlagsmeldung über das Kalenderjahr 2018. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus Abteilung III: 13 S.
- Puhe, J., 2003.** Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands - a review. *Forest Ecology and Management* 175: 253-273.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1989.** Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel-Seytoux, H.J. (Eds.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modelling: Theory and Practice.* Springer, Netherlands, Dordrecht: 275-300.
- Rettelbach, T., 2002.** Die Antagonisten des Buchdruckers im Nationalpark Berchtesgaden. - *Forschungsbericht* 47: 239.
- Rich, P.M., 1990.** Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. In: N.S. Goel and J.M. Norman (eds), *Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions.* *Remote Sensing Reviews* 5: 13-29.

- Ryan M.G., Sapes G., Sala A., Hood S.M., 2015.** Tree physiology and bark beetles. *New Phytologist* 205: 955-957.
- Schiebe, C., 2011.** Host choice mechanisms in tree killing bark beetles. An overview of joint knowledge and a suggested model of host choice mechanisms in the European spruce bark beetle. Introductory Paper at the Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science 2011: 3, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp: 43 S.
- Schlyter, F., Lundgren, U., 1993.** Distribution of a Bark Beetle and its Predator within and outside Old Growth Forest Reserves: No Increase of Hazard Near Reserves. *Scandinavian Journal of Forest Research*, Vol.8: 246-256.
- Schopf A., 1989.** Die Wirkung der Photoperiode auf die Induktion der Imaginaldiapause von *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology* 107: 275-288.
- Schopf, A., Baier, P., Netherer, S., Pennerstorfer, J., 2004.** Risikoabschätzung von Borkenkäfer-Massenvermehrung im Nationalpark Kalkalpen. BMLFUW, Nationalpark Kalkalpen GmbH: 128 S.
- Schopf, A., Kritsch, P., 2010.** Kältehärtigkeit und Überwinterung des Buchdruckers. *Forstschutz Aktuell* 50: 1-16.
- Schopf A., Blackwell E., Wimmer V., 2012.** Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf Voltinismus und Ausbreitung des Buchdruckers, *Ips typographus*, im alpinen Raum. Endbericht von StartClim 2011: Anpassung an den Klimawandel in Österreich: Themenfeld Wald. Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, ÖBf: 33 S.
- Schopf, R., Köhler, U., 1995.** Untersuchungen zur Populationsdynamik der Fichtenborkenkäfer im Nationalpark Bayerischer Wald. Aus: 25 Jahre auf dem Weg zum Naturwald. Berichte über die wissenschaftliche Beobachtung der Waldentwicklung. Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald mit Unterstützung des Vereins der Freunde des Ersten Deutschen Nationalparks Bayerischer Wald: 88-111.
- Schwertfeger, F., 1955.** Pathogenese der Borkenkäferepidemie 1946-1950 in NW Deutschland. *Schriften der forstlichen Fakultät Göttingen* 13/14: 135 S.
- Sousa, W.P., 1984.** The Role of Disturbance in Natural Communities. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 15: 353-391.
- Steyrer, G., Hoch, G., 2015.** Die Vermehrung der Borkenkäfer, ein Lagebericht (Oktober 2015). Aktualisierung 30.10.2015, BFW, Wien, aufrufbar: <http://bfw.ac.at/db/bfwcms.web?dok=10060>
- Steyrer, G., Hoch, G., 2018.** Borkenkäfer: Schwärmflug voll im Gange. BFW, Forstzeitung 04/2018. In: <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms2.web?dok=9757>
- TRASE. Operating Instructions 1996.** Soilmoisture equipment corporation, Goleta CA 93117, Californien
- Wegensteiner, R., Wermelinger, B., Herrmann, M., 2015.** Natural enemies of bark beetles: Predators, parasitoids, pathogens and nematodes. In: Vega, F.E., Hofstetter, R.W. (Eds.), *Bark beetles: Biology and ecology of native and invasive species*. Academic Press, London: 247-304.
- Wermelinger, B., 2003.** Borkenkäfer: Der Herr der Rinde. *Bündnerwald*, Vol. 56 (6): 12-16.

Wermelinger, B., 2004. Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus*- a review of recent research. *Forest Ecology and Management* 202: 67–82.

Wermelinger, B., Seifert, M., 1998. Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology* 122: 185–191.

Weslien, J. & Schroeder, L.M., 1999. Population levels of bark beetles and associated insects in managed and unmanaged spruce stands. *Forest Ecology and Management* 115: 267-275.

Weslien, J., 1994. Interaction within and between species at different densities of bark beetle *Ips typographus* and its predator *Thanasimus formicarius*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 71: 133-143.

Wild, M., 1950. Die Entwicklung des großen Fichtenborkenkäfers *Ips typographus* L. im Hochschwarzwald (1000–1200 m) und ihre Abhängigkeit vom Klima. Dissertation. Forstzoologischen Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: 175 S.

Yu X., Lamačová A., Duffy C., Krám P., Hruška J., White T., Bhatt G., 2015. Modelling long-term water yield effects of forest management in a Norway spruce forest, *Hydrological Sciences Journal* 60(2): 174-191.

ZAMG, 2019.

Informationsportal Klimawandel: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel>

Zumr, V., 1983. Effect of synthetic pheromones Pheroprax® on the coleopterous predators of spruce bark beetle *Ips typographus* (L.). *Journal of Applied Entomology*, Vol. 95: 47-50.

Zweifel, R., Zimmermann, L., Newbery, D. M., 2005. Modeling tree water deficit from microclimate: an approach to quantifying drought stress. *Tree Physiology* 25: 147–156.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Graphische Darstellung der Borkenkäferentwicklung mit PHENIPS, am Beispiel Auerberg im Jahr 2013 (Quelle: http://iff-server.boku.ac.at).	13
Abb. 2: Einfaches Modell zur Simulation von Wasserbilanzen, entwickelt am Standort Rosalia (Quelle: http://iff-server.boku.ac.at).....	16
Abb. 3: Mögliche grafische Darstellung von PHENIPS-TDEF: Buchdrucker-Schwärmphasen (Parental-/Filiargenerationen, Geschwisterbruten) im zeitlichen Verhältnis zur standörtlichen Wasserversorgung bzw. Trockenstressphasen des Bestandes (Quelle: http://iff-server.boku.ac.at)	17
Abb. 4: Klimadiagramm Lunz am See. Jahresmittelwerte für Temperatur und Niederschlag, gemittelt über die letzten 20 Jahre (Quelle: Hager, 2019).	20
Abb. 5: Durchschnittstemperaturen (JM) von Lunz am See für die Jahre 1909 bis 2018, sowie 10-jährige (10j.) und 20-jährige gleitende Temperaturmittel (20j.) (Quelle: Hager, 2019).	20
Abb. 6: Ausschnitt aus der topographischen Karte mit dem Untersuchungsgebiet Hundsau. Die roten Flächen sind die Untersuchungsstandorte I und II (Quelle: http://atlas.noe.gv.at).	21
Abb. 7: Ausschnitt aus der geologischen Karte. Die Lunzer Schichten ziehen sich, dargestellt als oranges Band durch die Hundsau. Die roten Punkte markieren die Untersuchungsflächen Bestand I und II. a) Ramsadolomit, b) Lunzer Schichten, c) Dachsteindolomit, d) Hangschutt (Quelle: Geologische Karte der Republik Österreich: 71 Ybbssitz, Maßstab 1:50.000. Herausgegeben von der geologischen Bundesanstalt Wien, 1988).....	22
Abb. 8: Das Auftreten der Lunzer Schichten ist, wie in diesem Beispiel vom Gegenhang der Untersuchungsstandorte, oft am Waldbild erkennbar (hier zieht sich ein Band Fichten von links unten nach rechts oben). Denn diese wüchsigen Standorte wurden nach der Nutzung mit Fichte aufgeforstet. Der Bestand oberhalb wurde vermutlich nie flächig genutzt und entspricht der natürlichen Baumartenzusammensetzung.....	22
Abb. 9: Forstkarte (Stand 2014) mit Altersklassen. Beide Flächen (p und h) fallen in die 5 AKL und sind somit ca. 100 Jahre alt (Quelle: Forstkarte, ÖBf: FB172 Waldviertel-Voralpen, FR 09 Göstling, Revierteil 1720902 Göstling, Abteilungen 454-477, Blatt2. Maßstab 1:10000. Stand: 16.6.2014).....	24
Abb. 10: Lage der Untersuchungsbestände I und II, der Fallenstandorte 1-5 und der Klimastation.	24
Abb. 11: Detailskizze von Bestand I mit den Positionen der TDR Messpunkte, der Winkelzählproben (WZP), des Fangbaumes und der automatischen Borkenkäferfalle.....	25
Abb. 12: Detailskizze von Bestand II mit den Positionen der TDR Messpunkte, der Winkelzählproben (WZP), des Fangbaumes und der automatischen Borkenkäferfalle.....	25
Abb. 13: Beispiel für ein unbearbeitetes Hemi-Foto vom WZP Punkt 4 im Bestand I.	30
Abb. 14: Zusammenhang zwischen Bestandesalter und LAI. Funktion nach Yu et al., 2015 (rote Punkte), erweiterter NASA Datensatz (earthdata.nasa.com) (blaue Punkte).	32

Abb. 15: Luftbild der Flächen, die im Operat unter verschiedenen GIS_IDs zusammengefasst wurden. Das gelbe Kreuz zeigt die Lage des Bestandes I und das rote jene von Bestand II (Quelle: ÖBf AG).....	39
Abb. 16: Spatenprobe im Bestand I mit Humusaufgabe und A _{hb} - Horizont.....	42
Abb. 17: Bodenprofil des Bestand I: Pseudovergleyter Kalklehm mit nach unten stark zunehmendem Skelettanteil. Aus diesem Profil wurden Bodenproben aus jedem Horizont für die Korngrößenanalyse geworben	42
Abb. 18: Bodenprofil 1 des Bestand II: Rendzina mit sehr geringer Gründigkeit und unmittelbar anstehendem Gestein.....	42
Abb. 19: In unmittelbarer Nähe zu sehr seichtgründigen Rendzinen wie in Abb. 18 finden sich tiefgründige Kalklehmflaschen im Bestand II. Diese weisen einen geringen Skelettgehalt auf.	43
Abb. 20: Korngrößenklassen des Horizontes B _{rel,g} des Bodenprofils in Bestand I (F...fein, G...grob, M...mittel, K...Kies, S...Sand, U...Schluff, T...Ton).....	44
Abb. 21: Korngrößenklassen des Horizontes B _{rel,1} des Bodenprofils (Profil 3) in Bestand II (F...fein, G...grob, M...mittel, K...Kies, S...Sand, U...Schluff, T...Ton).	45
Abb. 22: Verortung der Ergebnisse der Korngrößenanalyse im Texturdreieck (nach USDA Standards). Die grünen Punkte markieren die Textureigenschaften der Proben aus der Profilgrube im Bestand I (Wertebereiche entsprechen der Entnahmetiefe). Sp steht für „Spaltenfüllung“. Diese Probe wurde im Bestand II mittels Schlagbohrer in rund 1 m Tiefe geworben. Die orangen Punkte im Dreieck markieren die Textureigenschaften der Proben des dritten Profils aus den Horizonten A _{hb} (1), AB _{rel} (2), B _{rel} (3-5) (pseudovergleyter Kalklehm; Schlagbohrerprobe).....	46
Abb. 23: Kumulierter Niederschlag, gemessen an den Klimastationen Hundsau (blauer Graph) und Lunz am See (roter Graph).....	50
Abb. 24: Tagesmittelwerte der Temperatur an den Klimastationen Hundsau (blauer Graph) und Lunz am See (roter Graph).....	50
Abb. 25: Volumetrische Bodenwassergehalte (SWC, %; Mittelwerte und Standardabweichung) in Bestand I und II von Mai bis September 2018.	51
Abb. 26: Volumetrische Bodenwassergehalte (SWC) in Bestand I im Zeitraum 1.4.2018 (DOY 91) bis 31.10.2018 (DOY 304): Tägliche, simulierte Werte (rote Punkte) mit der maximalen probenbasierten Parameterkonstellation und zweiwöchentlich vor Ort mittels TDR gemessene Werte (blaue Punkte).....	52
Abb. 27: Volumetrische Bodenwassergehalte (SWC) in Bestand II im Zeitraum 1.4.2018 (DOY 91) bis 31.10.2018 (DOY 304): Tägliche, simulierte Werte (rote Punkte) mit der mittleren probenbasierten Parameterkonstellation und zweiwöchentlich vor Ort mittels TDR gemessene Werte (blaue Punkte).....	53
Abb. 28: Verlauf des gemessenen volumetrischen Bodenwassergehalts (blaue Kurve) in Bestand I im Vergleich zu den mit unterschiedlichen Parameterkonstellationen modellierten Werten. Die rote Linie basiert auf den maximalen Parameterwerten, die gelben Linien auf minimalen Angaben für RD und STONE. Die graue Kurve wurde auf Basis der Operatsdaten simuliert. Für die absoluten Werte der jeweiligen Eingangsparameter siehe Tab. 22.	54

Abb. 29: Verlauf des gemessenen volumetrischen Bodenwassergehalts (blaue Kurve) in Bestand II, im Vergleich zu den mit unterschiedlichen Parameterkonstellationen modellierten Werte. Die rote Linie basiert auf den maximalen Parameterwerten, die grüne Linie auf mittleren und die gelbe Linie auf minimalen Angaben für RD und STONE. Die graue und die schwarze Kurve wurde auf Basis der Operatsdaten simuliert. Für die absoluten Werte der jeweiligen Eingangsparemeter siehe Tab. 23.....	55
Abb. 30: Simulierte Transpirationsdefizite (TDEF) je nach Parameterkonstellation für Bestand I.	56
Abb. 31: Simulierte Transpirationsdefizite (TDEF) je nach Parameterkonstellation für Bestand II.	56
Abb. 32: Fangzahlen der automatisierten Pheromonfallen (Falle1-5) im Beobachtungszeitraum vom 23.05.- 05.09.2018 im Vergleich zum Verlauf der Tagestemperaturmittel (Klimastation Hundsau).....	58
Abb. 33: Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse von PHENIPS für das Gebiet Hundsau	60
Abb. 34: Simulationsergebnisse von PHENIPS (Quelle: http://iff-server.boku.ac.at) im Vergleich mit tatsächlich an den Fangbäumen vorgefundenen Entwicklungsstadien zum jeweiligen Kontrolltermin in beiden Beständen.	61
Abb. 35: Fangzahlen von Buchdrucker und Ameisenbuntkäfer in den 5 Fallen und Verhältnis der Fangzahlen.	63

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Merkmale der Bestände I und II	23
Tab. 2: Variable Parameter, die für den jeweiligen Bestand für PHENIPS-TDEF anzugeben sind.....	26
Tab. 3: Fixe Parameter, deren jeweilige Werte und Einheiten, die im Modell PHENIPS verwendet werden	26
Tab. 4: Fixe und variable Parameter für TDEF und deren Wertebereich und Einheit.....	27
Tab. 5: Bestandesparameter und deren Aufnahmemethode	28
Tab. 6: Erforderliche Klimadaten für die Modelle PHENIPS und TDEF und deren Messmethoden.....	32
Tab. 7: Übersicht erforderlicher Boden-Parameter und deren Aufnahmemethoden	33
Tab. 8: Die Standortstypen aus dem Operat (Standortseinheiten 1-97) und deren Zuordnung zu den Texturklassen Sand, Schluff, Lehm oder Ton (Netherer & Pennerstorfer, 2018)	35
Tab. 9: Herleitung der bodenphysikalischen Parameter für die Gleichung nach Brooks und Corey (1964): Sättigungswassergehalt (THETA_S), Restwassergehalt (THETA_R), Lufteintrittsdruck des Bodens (ALPHA) und Verteilung des unimodalen Porenvolumens (LAMBDA) nach Texturklasse entsprechend den Pedotransferfunktionen von Rawls & Brakensiek (1989) nach Netherer & Pennerstorfer (2018).....	36
Tab. 10: Herleitung des Grobanteils (STONE, %) durch Interpretation von Operatsangaben (SE= Standortseinheiten, Waldorte) nach Netherer & Pennerstorfer (2018)	36
Tab. 11: Herleitung der Durchwurzelungstiefe (RD, mm) durch Interpretation der Operatsangaben der Bundesforste (SE= Standortseinheiten, Waldorte) zur Bodengründigkeit der Standortseinheiten, nach Netherer & Pennerstorfer (2018).....	36
Tab. 12: Übersicht der erhobenen Daten beim Monitoring des Buchdruckers.....	37
Tab. 13: Seehöhen der 5 Fallenstandorte	38
Tab. 14: Merkmale zur Position der Fangbäume 1 und 2. Die Lage der Fangbäume entspricht der Lage von Bestand I und II	38
Tab. 15: Erhobene Bestandes-Parameter im Vergleich zu Operatsdaten der Bundesforste.....	40
Tab. 16: Auswertung der Winkelzählproben in beiden Beständen: Aktuelle Grundfläche (G_{ist}), Grundfläche laut Ertragstafel (G_{ET}) in m^2 pro Hektar. Bestockungsgrad (BG) = G_{ist} / G_{ET}	40
Tab. 17: Blattflächenindex an den WZP-Punkten der Bestände I und II	40
Tab. 18: Bestand I: Pseudovergleyter Kalklehm mit stark zunehmendem Skelettanteil über die Tiefe. Die Humusform war mullartiger Moder. Bodenansprache am Profil vom 29.5. 2018	41
Tab. 19: Drei Profilansprachen im Bestand II vom 29.5.2018 mit Anmerkungen. Profil 1 entspricht einer Rendzina, mit sehr geringer Gründigkeit. Die Humusform war Mull. Profil 2 war pseudovergleyter Kalklehm mit stark schwankendem Grobanteil und stark schwankender Gründigkeit. Die Humusform war mullartiger Moder	43

Tab. 20: Bestand I: Bodenphysikalische Parameter aus der Pedotransferfunktion. Die Eingangsgröße Bodenart wurde einmal mittels Beprobung und Analyse ermittelt und einmal aus Angaben im Operat gutachtlich abgeleitet	47
Tab. 21: Bestand II: Bodenphysikalische Parameter aus der Pedotransferfunktion. Die Eingangsgröße Bodenart wurde einmal mittels Beprobung und Analyse ermittelt und einmal aus Angaben im Operat gutachtlich abgeleitet	47
Tab. 22: Eingangsparameter für TDEF für Bestand I: Grün hinterlegte Werte wurden von der Bodenart abgeleitet (ALPHA, LAMBDA, THETA_R und THETA_S). Durchwurzelungstiefe RD und Skelettanteil (STONE) sind Variablen, die im Gelände eine große Variation aufwiesen (gelb markiert). Auf Basis der unterschiedlichen Parameterkonstellationen (Proben basierte Minimal- bzw. Maximalwerte, Werte in Anlehnung an das Operat) wurden mehrere Durchgänge mittels TDEF gerechnet	48
Tab. 23: Eingangsparameter für TDEF für Bestand II: Grün hinterlegte Werte wurden von der Bodenart abgeleitet (ALPHA, LAMBDA, THETA_R und THETA_S). Die Durchwurzelungstiefe RD und der Skelettanteil (STONE) sind Variablen, die im Gelände eine große Variation aufwiesen (gelb markiert). Auf Basis der unterschiedlichen Parameterkonstellationen (Proben basierte Minimal- Maximal- bzw. Mittelwerte, Werte in Anlehnung an das Operat) wurden mehrere Durchgänge mittels TDEF gerechnet	49
Tab. 24: Summierte Transpirationsdefizite der Monate Juni bis August, sowie für das ganze Jahr aufsummierte Defizite für beide Bestände bei verschiedenen Parameterkonstellationen ...	57
Tab. 25: Zeitpunkte der beobachteten Höhepunkte in der Flugaktivität des Buchdruckers im Jahr 2018	59
Tab. 26: Zeitpunkte der simulierten Entwicklungsereignisse des Buchdruckers im Jahr 2018.....	59
Tab. 27: Vergleich der prognostizierten (PHENIPS) und beobachteten (Pheromonfallen) Schwärmzeiten von <i>I. typographus</i> in der Hundsau (2018).....	60
Tab. 28: Entwicklungskontrollen von <i>Ips typographus</i> im unteren, mittleren und oberen Stammabschnitt der Fangbäume in Bestand I und II. Das Vorhandensein von Rammelkammern (RK) und die Länge von Muttergängen(MG) wurden vermerkt, sowie die vorgefundenen Entwicklungsstadien, Eier, Larven (La), Puppen (Pu), Jungkäfer (JK)	62

Alle Abbildungen und Tabellen, sofern keine Quellenangaben vorhanden, sind von mir selbst.

Danksagung

Dank an Sigrid Netherer, die mich auf dieses Thema aufmerksam gemacht hat und mir somit einen wunderschönen Sommer im Wildnisgebiet ermöglicht hat. Danke für die gute Betreuung der Arbeit.

Dank an Joseph Pennerstorfer für seine Arbeit mit den Klimadaten und den Modelldurchläufen, an Christa Schafellner für ihre Korrekturvorschläge und Helmut Schume für die Unterstützung bei den Bodenprofilen.

Dank an die MitarbeiterInnen der Schutzgebietsverwaltung des Wildnisgebiets Dürrenstein für alles, was sie mir in der Zeit, in der ich bei ihnen war, beigebracht haben.

Dank an Hans-Peter Lang für die Privatexkursion in die Hundsau zum Untersuchungsgebiet.

Dank an Hannes Hager, Lunz am See, für die Bereitstellung der Klimadaten.

Dank der Familie Hager in Sulzbach für das Haus am See.

Dank an die Leute der Abteilung Neuroanatomie der Universität Bonn, allen voran Prof. Dr. Hofmann für ihr Vertrauen und den schönen Arbeitsplatz im Poppelsdorfer Schloss.

Dank an Gabriel Sattig für seine Geduld, wenn ich die meine gelegentlich über den intelligenten Funktionen von word verloren habe.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.