

Stabilitätsabschätzung von Schweizer Schutzwäldern mit neuartigen bildgebenden Verfahren



WHFF-Projekt 2012.15

Schlussbericht

September 2014

Autoren:	Jan Wunder & Zoe Bont
Projektleitung:	Wunder Consulting
Projektpartner:	AWN Chur WSL Birmensdorf ETH Zürich

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Abstract	2
1. Einleitung	3
2. Vorgehen	4
2.1 Feldarbeiten	4
2.2 Quantitative Erfassung von Kernfäulen – Schadengrad nach Graber	7
2.3 Qualitative Bestimmung von Kernfäulen – Identifikation der Erregerpilze	8
2.4 Statistische Analysen	9
3. Resultate & Diskussion	10
3.1 Zusammenstellung	10
3.2 Kernfäuleschaden pro Untersuchungsgebiet	11
3.3 Verteilung der Kernfäulen innerhalb eines Standorts	16
3.4 Phytopathologische Analysen	17
3.5 Analyse der Messgeräte	18
4. Schlussfolgerungen & Ausblick	24
5. Danksagung	26
6. Literaturverzeichnis	27
Anhang	A1
I: Fäuleabschätzungen pro Baum	A1
II: Fragebogen zum Projekt	A31
III: Rotfinder-Zusatzuntersuchung an schwachem und mittlerem Baumholz	A33
IV: Molekulare Identifikation der Kernfäule-Erreger	A34

Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt wurde der Kernfäulebefallsgrad von hochmontanen und subalpinen Schutzwäldern in Graubünden mit neuartigen bildgebenden Verfahren analysiert. Zwei nicht-destruktive Messgeräte wurden evaluiert, einerseits ein Schall- und Widerstandstomograph (PiCUS), andererseits ein einfacher „Kernfäule-Schnelltest“ basierend auf einer punktuellen Messung des elektrischen Widerstandes (Rotfinder). Beide Messgeräte wurden im Sommer 2013 an 105 Fichten (*Picea abies*) in zehn geplanten Eingriffsflächen in Gebirgsfichtenwäldern der Region Survelva angewendet. Die zehn Standorte wiesen eine unterschiedliche Beweidungsgeschichte, Höhenlage und Exposition auf. Nach dem Fällen der Bäume im Herbst 2013 wurden der Fäule-Schadengrad pro Baum bestimmt, sowie Holzproben zur Laborbestimmung von Kernfäuleerregern entnommen. Durchschnittlich waren fast 70 % der untersuchten Bäume kernfaul, wobei die Intensität der Kernfäulen stark variierte. Dies deutet darauf hin, dass die Schutzwaldstabilität zumindest stellenweise reduziert ist, insbesondere in ehemals beweideten Beständen. Die verwendeten Messgeräte zeigen zuverlässig Kernfäulen an, wobei sich der Rotfinder mit seiner einfachen Handhabung und kurzen Messdauer als Gerät für die Forstpraxis eignen könnte. Der Rotfinder könnte somit zu einer nachhaltigen Schutzwaldbewirtschaftung beitragen, indem er eine Früherkennung mit darauffolgender Entfernung der kernfaulen Bäume aus dem Bestand möglich macht, wodurch sowohl die Stabilität von Schutzwäldern als auch die Sicherheit bei Holzfällarbeiten erhöht werden könnten. Ein solcher „Schnelltest“ auf Kernfäulen wäre nicht nur für Schutzwälder, sondern allgemein für bewirtschaftete Wälder von grossem ökonomischen Interesse, da mit herkömmlichen Methoden nur ungenau abgeschätzt werden kann, ob ein Baum kernfaul ist oder nicht.

Abstract

In this project, the amount of heart-rot decay in forests protecting from natural hazards such as rockfall and snow avalanches in the Grisons was examined using new high-resolution imaging techniques. Two nondestructive measuring instruments were evaluated: firstly, a sonic- and electric resistivity tomograph (PiCUS) and secondly, a relatively simple and fast test for heart-rot decay estimation based on a point measurement of the electric resistivity (Rotfinder). Both measuring instruments were applied in summer 2013 on 105 Norway spruce (*Picea abies*) trees within ten sites dedicated for future logging in the mountainous Norway spruce forests of the Surselva. The ten sites differed with respect to grazing history, altitude and exposition. After the logging of the trees in autumn 2013, the degree of heart-rot decay was quantified for each individual tree and wood samples for laboratory-based heart-rot fungi identification were extracted. Nearly 70 % of the analysed trees exhibited heart-rot decay that varied highly in intensity among trees. Therefore, the analysed forests are at least partially reduced in their stability, especially in stands that experienced former grazing. Both applied measuring instruments were reliable in detecting heart-rot decays. Because of its simple handling and the rapid measurement, Rotfinder may become a useful measurement device for foresters. Thus, Rotfinder could contribute to a sustainable management of forests protecting from natural hazards because its application would enable the foresters to perform early detection and removal of trees with heart-rot decay. This would both increase the stability of the protection forests as well as the safety for workers during logging operations. In addition, a “rapid test” for heart-rot decay could also be of large economical value for common managed forests since it is difficult to assess the decay status of trees using traditional methods.

1. Einleitung

Etwa 40 % der Schweizer Wälder leisten als Schutzwälder einen wichtigen Beitrag zum Schutz von Menschenleben und Infrastruktur vor Naturgefahren. Vielerorts sind diese Schutzwälder fast reine Fichtenwälder, die vor 100 bis 150 Jahren aufgeforstet wurden und teilweise bis in die 1950er Jahre intensiv beweidet worden sind. Heute gelten viele dieser Bestände als überaltert im Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit und Stabilität.

Holzersetzende Kernfäulepilze bauen das Kernholz von infizierten Waldbäumen ab und tragen so zu einer Destabilisierung des Baumes bei. Eintrittspforten für Kernfäulepilze sind oft Verletzungen, wie z.B. Wurzelverletzungen im Zuge von Pflanzungen, Viehtritt durch (ehemalige) Waldweide oder auch Stammwunden infolge von Ast- oder Kronenbruch, insbesondere bei alten Bäumen. Zudem werden die Fäulen über Wurzelkontakte oder –verwachsungen von befallenen auf gesunde Bäume übertragen.

Für den Kernfäulebefallsgrad von Schutzwäldern liegen bisher keine genauen Zahlen vor, vorsichtige Schätzungen gehen von ca. 20 % aus, wobei lokal weit höhere Werte auftreten können. Derartige Bestände sind einerseits weniger schutzwirksam gegenüber Naturgefahren, andererseits steigt mit dem Kernfäulebefall auch die Windbruchwahrscheinlichkeit. Es ist anzunehmen, dass insbesondere in den überalterten Beständen eine weitere Ausbreitung der Kernfäulen stattfindet. Von erhöhten Temperaturen infolge der erwarteten Klimaänderung werden wohl eher kurzlebige holzersetzende Pilze als langlebige Bäume profitieren. Die erwartete Zunahme an Extremereignissen könnte die Stabilität weiter reduzieren: Zum einen dürfte Trockenstress die Baumabwehr reduzieren und somit die Wahrscheinlichkeit erfolgreichen Pilzbefalls erhöhen, zum anderen können stärkere Stürme zu grossflächigen Zusammenbrüchen kernfauler Bestände führen. Dies würde zumindest lokal zu einer massiven Reduktion der Schutzwirkung führen.

Es fehlen aber nach wie vor verlässliche Abschätzungen über den Kernfäulebefallsgrad und den damit verbundenen Stabilitätsverlust unserer Fichtenschutzwälder. Folglich fliessen diese wichtigen Informationen über das Vorhandensein von Kernfäulen weder in die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Schutzwäldern durch Forstpraktiker ein, noch können sie in aktuellen Waldsimulationsmodellen berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Projekt wurde der Kernfäulebefallsgrad in ausgewählten Schutzwäldern Graubündens erstmals mit hochauflösenden bildgebenden Verfahren erhoben. Dabei wurde das Innenleben von Bäumen mit verschiedenen neuartigen Messverfahren „durchleuchtet“, einerseits mit High-Tech Schall- und Widerstandstomographie, andererseits mit einem relativ einfachen Messinstrument, geeignet für die Anwendung in der Forstpraxis (Rotfinder). Folgende Forschungsfragen standen im Fokus der Untersuchung:

- Wie hoch ist der Kernfäulebefallsgrad in ausgewählten Schutzwäldern im Gebirgskanton Graubünden – und was sind die Konsequenzen für die Schutzwaldstabilität?
- Wie präzise lässt sich Kernfäulebefall mit der aufwändigen Tomographie-Methode ermitteln? Wie gut schneidet demgegenüber ein einfaches, preisgünstiges und handliches „Schnelltest“-Gerät ab?

2. Vorgehen

2.1 Feldarbeiten

Vorbereitende Arbeiten

Im April und Mai 2013 wurde mit der Vorbereitung der Feldarbeiten begonnen. In Gesprächen mit Ueli Bühler vom Amt für Wald und Naturgefahren (AWN) in Chur sowie mit Regionalforstingenieuren im AWN Ilanz (Christian Buchli, Gian Claudio Leeger, Bernhard Riedi und Luzi Schmid) erfolgte eine Vorauswahl der für den Sommer 2013 geplanten Schläge in unterschiedlichen Waldgesellschaften (hochmontan, subalpin, mit/ohne Beweidung). Im Juni 2013 schliesslich erfolgten auf fast allen geplanten Untersuchungsstandorten Vorbegehungen mit den zuständigen Revierförstern.



Abb. 1: Feldarbeiten Juni/Juli 2013. Von oben links, im Uhrzeigersinn: Dieter Trummer am Rotfinder (Zusatzmessung), Jan Wunder am PiCUS-Schalltomograph, Windbruch bei Riein, Rotfinder-Messgerät, Veronique Ringwald mit PiCUS-Tomographen-Ausrüstung, PiCUS-Widerstandstomograph, Jan Wunder und Anna Plotzki bei der Arbeit mit dem Schallhammer (PiCUS-Schalltomograph).

Tomographie-Messungen

Im Juni und Juli 2013 wurden während ca. drei Wochen Feldarbeit je 10 bis 12 Bäume auf zehn hochmontanen und subalpinen Waldstandorten (Tab. 1) in der Region Surselva (Graubünden) mit moderner Messtechnik analysiert. Zwei Instrumente kamen zum Einsatz: 1) der PiCUS Schall- und Widerstandstomograph, argus electronic GmbH Rostock/Deutschland, dessen um den Baum verteilte Sensoren den elektrischen Widerstand und die Durchschallungseigenschaften des Holzes registrieren und so Fäulebereiche sichtbar machen können; und 2) der Rotfinder, bei dem in einer Art „Schnelltest“ eine Widerstandsmessung zwischen zwei Elektroden Hinweise über das Ausmass des Kernfäulebefalls gibt (siehe Anhang I). Eine Messung mit dem PiCUS-Tomographen dauert mindestens 20-30 Minuten pro

Baum, eine Rotfinder-Messung 2-3 Minuten pro Baum. Die hier verwendete PiCUS-Ausrüstung kostet etwa Fr. 11000.- (Preis 2010, inklusive elektronische Kluppe), die Rotfinder-Ausrüstung kostet etwa Fr. 3000.- (Preis 2013, inklusive Trainingstag im Feld)¹.

In den Revieren Breil und Trun wurden mit diesen Messgeräten je 2 Standorte aufgenommen, in allen anderen Revieren je ein Standort (Abb. 1 und Tab. 1). Die Messebenen befanden sich in den meisten Fällen 30 bis 60 cm oberhalb der Wurzelanläufe – einzelne, meist kernfaule Bäume wurden auf weiteren Höhen analysiert (bis ca. 2 m Höhe).

Tab. 1: Lage der 10 untersuchten Standorte mit der Anzahl der vermessenen Bäume. Insgesamt wurden 107 Bäume mit dem PiCUS Schall- und Widerstandstomograph und dem Rotfinder vermessen (105 Fichten, 1 Tanne und 1 Buche).

Revier	Standort-Nr.	Lage (CH-Koordinaten)	Höhe ü.M. (m)	Anzahl der vermessenen Bäume
Laax	1	738250 / 186200	1230	10
Breil	2	723400 / 182400	1550	10
Breil	3	725800 / 180250	970	10
Obersaxen	4	721350 / 176500	1610	12
Trun	5	720400 / 180600	1650	10
Trun	6	720650 / 180500	1570	11
Ilanz	7	732350 / 185450	1520	10
Vals	8	732950 / 162900	1560	11
Safien	9	745850 / 182050	1130	12 (davon 1 Ta und 1 Bu)
Riein	10	738800 / 179450	1790	11

Sturmereignis von Anfang August 2013 & Einfluss auf das WHFF-Projekt

Anfang August 2013 warfen Hagel- und Gewitterstürme ca. 16'000 m³ Holz im Raum Ilanz – die daraus resultierenden Zwangsnutzungen beeinflussten die laufende forstliche Planung. Eine von den zehn untersuchten Flächen war direkt vom Sturm betroffen (Ruschein) – aufgrund von zahlreichen Windbrüchen/-würfen („Mikado-Situation“) war es leider nicht möglich, die markierten Bäume eindeutig den entsprechenden Stämmen zuzuordnen.

Die Sturmschäden führten auch zu Rückstellungen bei den ursprünglich geplanten Einschlägen - erst anfangs Oktober wurde klar, welche Flächen noch im Herbst 2013 geschlagen werden können. Schliesslich wurden sieben von neun verbleibenden Flächen geschlagen – für zwei Flächen (Riein & Laax) werden die Einschläge auf 2014 verschoben.

Befragung der Revierförster

Anfang August, nach Abschluss der Messungen, erhielten alle Revierförster einen Fragenbogen, um eine expertenbasierte Einschätzung der Kernfäule vorzunehmen (keine, geringe, mittlere, starke Kernfäule, siehe Anhang II).

¹ Die genauen Gerätekosten sind schwierig zu beziffern, da z.T. Training/Beratung hinzugekauft werden muss und die Hersteller auch Rabatte geben.

Stammscheiben-Entnahme

In sieben der insgesamt zehn zu untersuchenden Schutzwälder wurden am 14./15.10.2013, am 27.11.2013 und am 17.12.2013 je 10-12 im Rahmen des Projektes ausgewählte, mit den Messgeräten auf Kernfäule getestete und bereits gefällte Fichten beprobt (Abb. 2). Bei diesen sieben Standorten wurde jeweils der oberste Teil der stehengelassenen Stümpfe mit einer Motorsäge weggeschnitten, so dass sich der Schnitt auf Höhe der angezeichneten Messebene befand und so eine ebene Schnittfläche entstand. Ein zweiter Schnitt etwas unterhalb der Messebene wurde gemacht, um eine 2-5 cm dicke Stammscheibe zu erhalten. Diese wurde gesäubert, beschriftet und zusammen mit einem nach Norden ausgerichteten Kompass fotografiert (Abb. 2C).



Abb. 2: Feldarbeiten im Herbst 2013. **A** Entnahme der Stammscheiben entlang der Messebene (Dieter Trummer, Danis GR). **B** Transport der Stammscheiben zur Waldstrasse (Jan Wunder, Vals GR). **C** Markierung der Fäulnisstellen nach Zersetzungsgrad (Breil GR).

Falls kernfaule Stellen vorhanden waren, wurden diese in 3 Stufen klassifiziert. Dafür wurde das von Kató (1967) entwickelte und von Graber (1996) verwendete Klassifizierungssystem leicht modifiziert:

Stufe 1 (nach Kató Stufe I & II):	Holz verfärbt, mechanische Eigenschaften (geringfügig) beeinträchtigt, Holz noch schnittfest
Stufe 2 (nach Kató Stufe III):	Holz verfärbt, mechanische Eigenschaften stark beeinträchtigt, jedoch Gefüge erhalten
Stufe 3 (nach Kató Stufe IV):	Holz weich und faserig aufgelöst, Struktur völlig verloren, so dass meist im Stamm eine Höhlung entsteht

Die äussere Kontur des Baumes entlang des Kambiums sowie die faulen Stellen wurden auf einer über die Stammscheibe gespannten Plastikfolie eingezeichnet (Fäulestufen als Farbcodes, Abb. 2C, 3A). Falls der Stumpf nicht vollständig intakt war (z.B. Fehlen eines Holzsegments aufgrund der Verwendung eines hydraulischen Fällkeils), wurde wenn möglich der Verlauf des Kambiums extrapoliert. Stammscheiben und Plastikfolien wurden anschliessend in die WSL Birmensdorf transportiert. Kehrriechtsäcke als Zwischenlagen verhinderten dabei einen direkten Kontakt der Scheiben, so dass die Wahrscheinlichkeit einer Pilzübertragung minimiert werden konnte. An der WSL wurden die Stammscheiben in zufälliger Reihenfolge kühl und trocken in einem Unterstand gelagert (ebenfalls durch Kehrriechtsäcke getrennt). Die kernfaulen Exemplare wurden innerhalb von sieben Tagen weiterverarbeitet.

Altersschätzung

Bei einigen Fichten erfolgte jeweils an einem Holzsegment pro Baumscheibe eine Altersschätzung. Dies war nur möglich bei geringem bis mittlerem Kernfäuleausmass – bei sehr faulen Bäumen war das Kernholz oftmals bereits so stark zersetzt, dass eine Bestimmung der Jahrringe nicht möglich war. Pro Stand-

ort wurde jeweils das Alter von 5 Fichten geschätzt (Ausnahmen: Bei „Sur Seivs“ waren nur 4, bei „Birchegga“ nur 3 durchgehende Holzsegmente vorhanden). Dazu wurden die Jahrringe vom Mark bis zum Kambium ausgezählt, wobei die Genauigkeit der Zählung hier ± 5 Ringe beträgt. Mit dieser Altersschätzung und dem zugehörigen Stammdurchmesser konnte die durchschnittliche Wachstumsrate der betreffenden Fichte ermittelt werden.

2.2 Quantitative Erfassung von Kernfäulen – Schadengrad nach Graber

Um das tatsächliche Ausmass und den biologischen Schaden der Kernfäulen zu bestimmen, wurde der relative Flächenanteil der einzelnen Fäulestufen pro Stammscheibe ermittelt. Dazu wurden die auf Plastikfolien hergestellten Abbildungen entlang der eingezeichneten Fäulestufen ausgeschnitten (Abb. 3B). Die im Feld extrapoliert eingezeichneten fehlenden Stammscheibenteile wurden dabei ebenfalls verwendet. War die Extrapolation nicht möglich oder der Verlauf der Fäulestufen in den fehlenden Abschnitten nicht eindeutig einschätzbar, so wurde nur der tatsächlich vorhandene Teil verwendet. Eine Laborwaage diente anschliessend zur Gewichtsbestimmung der einzelnen Folienteile pro Baum (Abb. 3C). Der relative Flächenanteil jeder Fäulestufe wurde aus dem Gewichtsverhältnis der Folienteile der jeweiligen Fäulestufe und allen Folienteilen berechnet. Dieser wurde dann nach Graber (1996) je nach Zersetzungsintensität mit einem Faktor zwischen 0 und 10 gewichtet. Die hier verwendete Fäulestufe 1 fasst die von Graber (1996) verwendeten Stufen zusammen - der entsprechende Gewichtungsfaktor entspricht dem Mittel der von Graber (1996) verwendeten Faktoren.

Gesunde Flächen	Faktor 0
Stufe 1	Faktor 2
Stufe 2	Faktor 7
Stufe 3	Faktor 10

Verrechnet man den relativen Flächenanteil pro Fäulestufe mit dem Gewichtungsfaktor und summiert die erhaltenen Werte, so lässt sich, wie in Gleichung (1) dargestellt, der Schadengrad nach Graber pro Baum ermitteln:

$$\text{Schadengrad} = 2 \frac{A_1}{A} + 7 \frac{A_2}{A} + 10 \frac{A_3}{A} \quad (1)$$

Dabei entspricht A der gesamten Fläche der Stammscheibe, A_1 der Fläche der Stufe 1, A_2 der Fläche der Stufe 2 und A_3 der Fläche der Stufe 3. Die Einheit dieses Wertes ist „Schaden-promille“ und der theoretisch mögliche Maximalwert beträgt 1000 ‰ (Graber 1996).



Abb. 3: A Einzeichnen der Fäulestufen im Feld. B Ausgeschnittene Plastikteile einer Stammscheibe, sortiert nach Fäulestufen. C Gewichtsbestimmung von Flächenanteil Stufe 3.

2.3 Qualitative Bestimmung von Kernfäulen – Identifikation der Erregerpilze

Probenentnahme

Die Stammscheiben mit sichtbaren Kernfäulen wurden in der Werkstatt des Versuchsgartens der WSL in zufälliger Reihenfolge mit Axt und Hammer gespalten und zerkleinert (Abb. 4A). Das benutzte Werkzeug wurde dabei jeweils mit 70 % EtOH desinfiziert, um eine Pilzübertragung zu verhindern. Folgende Proben wurden entnommen:

- 1) Aus Fäule- und Kontrollstellen wurden etwa 1 cm breite Holzstreifen entnommen. Aus deren Holzinneren wurden in zwei unterschiedlichen Höhen mit einer Gartenschere 4 Würfelchen (Kantenlänge 5-10 mm) geschnitten. Die 4 Würfelchen einer Probenstelle wurden in einer sterilen oder mit 70 % EtOH desinfizierten Petrischale gelagert und noch am gleichen Tag im Labor zur Pilzisolierung weiterverwendet.
- 2) Von jeder Stelle, bei der ein Probenstreifen entnommen wurde, diente ein zweiter Holzstreifen als „Backup“ für den Fall, dass die Pilzisolierung nicht erfolgreich sein sollte. Diese Backup-Proben wurden in einem Plastikbeutel bei 4°C gelagert.

Die Faul- und Kontrollstellen zur Pilzisolierung wurden auf einer Fotografie der Stammscheibe markiert und wie folgt ausgewählt:

- Von den ersten zwei zu verarbeitenden Stammscheiben eines Standortes wurde je eine Kontrollprobe aus einer nicht kernfaulen Stellen entnommen, sofern das sichtbar gesunde Gewebe der Scheibe mehr als 50 % der Gesamtfläche ausmachte.
- Sofern vorhanden, wurden Proben von allen drei Fäulestufen entnommen. Es wurden mehrere unabhängige Fäulestellen beprobt, sofern diese einen Durchmesser >1 cm hatten. Fäulestellen mit einem Durchmesser >5 cm wurden an zwei unterschiedlichen Stellen beprobt, jedoch wurde die maximale Anzahl Fäuleproben pro Stammscheibe auf 5 beschränkt.

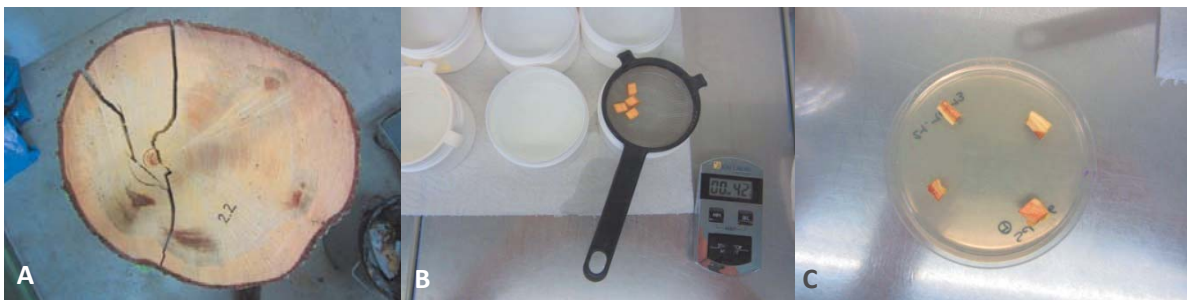


Abb. 4: A Probenentnahme in der Werkstatt. B Oberflächensterilisierung der für die Pilzisolierung hergestellten Holzwürfelchen. C Platzierung der Holzwürfelchen auf einer Maloy-Agar-Platte.

Pilzisolierung

Um eine Kontamination mit unerwünschten Pilzsporen oder Bakterien zu minimieren, wurden die Holzwürfelchen oberflächensterilisiert (adaptiert von Prospero et al. 2003). Dazu wurden sie unter sterilen Bedingungen während 45 s in Natrium-Hypochlorid (7 % aktives Chlorin) getaucht, dann zweimal während 60 s in sterilem Wasser gewaschen und zwischen Papiertüchern getrocknet (Abb. 4B). Anschließend wurden jeweils die vier oberflächensterilisierten Holzwürfelchen einer Probe auf 25 ml semiselektives Agar-Medium nach Maloy (1974; 12 g l-1 Malz Extrakt, 15 g l-1 Bacto Agar, 2 mg l-1 Benomyl und 100 mg l-1 Streptomycin) in einer sterilen Petrischale gelegt und im Dunkeln bei Zimmertemperatur inkubiert (Abb. 4C). Während 4 Wochen wurden die Proben alle 2-5 Tage mithilfe eines Binokulars auf

Pilzwachstum untersucht. Von den verschiedenen Mycelien wurden Reinkulturen auf 12 ml Diamalt-Agar (15 g l⁻¹ Bacto Agar, 20 g l⁻¹ Diamalt, Hefefabriken AG, CH-3324 Hindelbank) in sterilen Petrischalen erstellt.

Morphologische Identifikation der Pilzisolat

Drei der wichtigsten Kernfäuleerreger – *Armillaria* sp., *Heterobasidion* sp. und *Climacocystis borealis* – liessen sich relativ einfach anhand morphologischer Merkmale bestimmen. Bei Pilzen der Gattung *Armillaria* konnte man mit dem Binokular auf der Oberfläche der infizierten Holzwürfelchen weisse, büschelförmige Auswüchse erkennen. Charakteristisch für *Armillaria* war zudem das langsame Wachstum in Reinkultur, sowie oftmals die Bildung von dunklen Rhizomorphen (Abb. 5A). *Heterobasidion* entwickelte keulenförmige Konidiophoren, die unter dem Binokular gut sichtbar waren und als Erkennungsmerkmal dienten (Abb. 5B). *Climacocystis borealis* zeigte in Kultur ein charakteristisches, weisses Mycel (Abb. 5C). Zudem diente hier ein bereits bestimmtes Isolat aus der laboreigenen Mykothek als Referenzkultur.



Abb. 5: **A** *Armillaria*-Mycel mit Rhizomorphen auf Diamalt-Agar. **B** Konidiophoren von *Heterobasidion*, Mikroskopaufnahme in 20-facher Vergrösserung. **C** Mycel von *Climacocystis borealis* auf Diamalt-Agar.

Von den vorerst unbekanntem Reinkulturen wurden morphologische Gruppen (sortiert nach Farbe und Beschaffenheit des Mycels) gebildet. Wurde ein so gruppierter Pilz von der gleichen Stammscheibe mehrmals isoliert, wurde nur eine (exemplarische) Kultur für die molekulare Bestimmung ausgewählt.

Molekulare Identifikation der Pilzisolat

Die unbekanntem Pilze sowie die genaue Art der *Armillaria* und *Heterobasidion* Isolate wurden mit molekularen Methoden bestimmt. Die genauen Angaben dazu sind im Anhang zu finden (Anhang IV.A Methodik).

2.4 Statistische Analysen

Alle statistischen Analysen wurden mit R (Version 3.0.2, www.cran.r-project.org) durchgeführt. Für die Analyse der beiden Messmethoden (PiCUS und Rotfinder) wurden die Messwerte pro Baum gegen die tatsächlichen Schadengrade aufgetragen und mit einem LOESS-Modell angepasst (*local polynomial regression fitting*, R-Funktion *loess* mit einem *span* (*degree of smoothing*) von 1.1). Als Modellgüte-Kriterium wurde die Pearson-Moment-Korrelation zwischen geschätzten und beobachteten Werten verwendet („Pseudo-r“). Bei den dargestellten Boxplot-Diagrammen entspricht die horizontale Linie (innerhalb der Box) dem Median, das obere und das untere Ende der Box stehen für die 25. und 75. Perzentile. Die vertikalen Linien (*Whisker*) repräsentieren die Maximalwerte (sofern keine Ausreisser vorhanden sind) oder das 1.5-fache des Interquartilsabstands. Die Ausreisser werden als Punkte dargestellt.

3. Resultate & Diskussion

3.1 Zusammenstellung

Die zehn Untersuchungsflächen liegen in fichtendominierten Schutzwäldern (Tab. 2). Zur besseren Übersicht wurden alle auf Einzelbaubelebene erhaltenen Tomogramme, Rotfinder-Messungen und Einschätzungen der Förster in einer Tabelle zusammengefasst (siehe Kapitel 2.1). Aus den bereits erwähnten Gründen konnten an drei Standorten keine Stammscheiben entnommen werden. Bei den Standorten Obersaxen und Safiental fehlen ebenfalls einige wenige Stammscheiben. Der Standort in Obersaxen wurde ausserdem zu früh gefällt, so dass der zuständige Förster keine vorangehende Einschätzung der Kernfäulen abgeben konnte. Ebenso war die Förstereinschätzung beim Standort in Ruschein nicht möglich, da dieser vom Sturm völlig zerstört wurde. Somit bleiben sechs Standorte, für die alle drei Angaben (T=Tomographie, S=Stammscheiben, F=Förstereinschätzung) vorhanden sind.

Tab 2: Untersuchte Schutzwaldstandorte in Graubünden. WG EK72: Waldgesellschaft nach Ellenberg & Klötzli (1972). T: Tomographie vorhanden. S: Stammscheiben vorhanden. F: Förstereinschätzung vorhanden.

Standort	Revier	Höhenlage (m ü. M)	WG EK72	Expo- sition	Förster	Beweidung	T	S	F
Grosscher	Vals	subalpin (1560)	57C	NW	Siegfried Berni	"eher nein"	x	x	x
Preuls	Trun	subalpin (1570)	57V	SE	Mattias Cadruvi	"nein"	x	x	x
Birchegga	Safiental	hochmontan (1130)	51	E	Marco Casanova	"eher nein"	x	x	x
Uaul Bacun	Breil	hochmontan (970)	51Ct	S	Wendelin Hürlimann	"nein"	x	x	x
Uaul dils Runs	Laax	hochmontan (1230)	52A	SE	Maurus Cavigelli	"nein"	x	-	x
Sur Seivs	Trun	subalpin (1650)	57A	SE	Mattias Cadruvi	"eher ja"	x	x	x
Zavragia	Ober- saxen	subalpin (1610)	57C	NW	Kaspar Henny	"eher ja"	x	x	-
Plauca	Riein	subalpin (1790)	53W	S	Andreas Stucki	"Beweidung in der Nähe der Alp"	x	-	x
Sut Plaun Grond	Breil	hochmontan (1550)	55*	NE	Wendelin Hürlimann	"ehemals beweidet"	x	x	x
Sut Alp Dado	Ruschein	hochmontan (1520)	50Pr, 55, 51	W	Domenic Bandli	"Beweidung in der Nähe der Alp"	x	-	-

Bei einigen Bäumen wurden mehrere Rotfinder-Messungen auf der Messebene durchgeführt. Der in der Tabelle verwendete Wert entspricht dem Minimalwert dieser Messungen (siehe Kapitel 3.5).

3.2 Kernfäuleschaden pro Untersuchungsgebiet

An allen Standorten und bei insgesamt 69 % der gefälltten Bäume (n=70) wurden Fäulen festgestellt - dies deutet darauf hin, dass die Schutzwaldstabilität zumindest stellenweise reduziert ist. Der erhaltene Anteil fauler Bäume erscheint eher hoch, doch finden sich vergleichbare Studien mit ähnlichem Fäulebefall in der Literatur. So zeigte Graber (1996), dass bei drei untersuchten Beständen mit keinem/minimalem menschlichem Einfluss bereits eine „Grundbelastung“ von ca. 15-20 % Kernfäulebefall vorliegt – über alle Standorte gesehen hatten 47.3 % der von ihm untersuchten Fichten nördlich der Schweizer Alpen eine Kernfäule (Graber 1996, Wundfäulen wurden dabei nicht berücksichtigt). In einer nach dem Sturm Lothar durchgeführten Studie von Rigling (2005) wurde ein Fäulebefall von 48 % bei den stehengebliebenen Fichten diagnostiziert – Fichten mit Stockbrüchen wiesen zu 100 % Fäulen auf. In einer Studie zur Stammfäule im Bündner Gebirgswald wurden bei insgesamt 70 % der untersuchten Bäume Fäulen (Kern- und/oder Wundfäulen) gefunden, wobei durchschnittlich 57 % der Bäume kernfaul waren (Huber et al. 1996). Der in der vorliegenden Studie erhaltene Fäulebefall von 69 % erscheint somit plausibel. Man muss jedoch beachten, dass die hier erhaltene Zahl auf nur 70 untersuchten Bäumen basiert und dass durch Wundfäuleerreger verursachte Fäulen nicht explizit aussortiert worden sind.

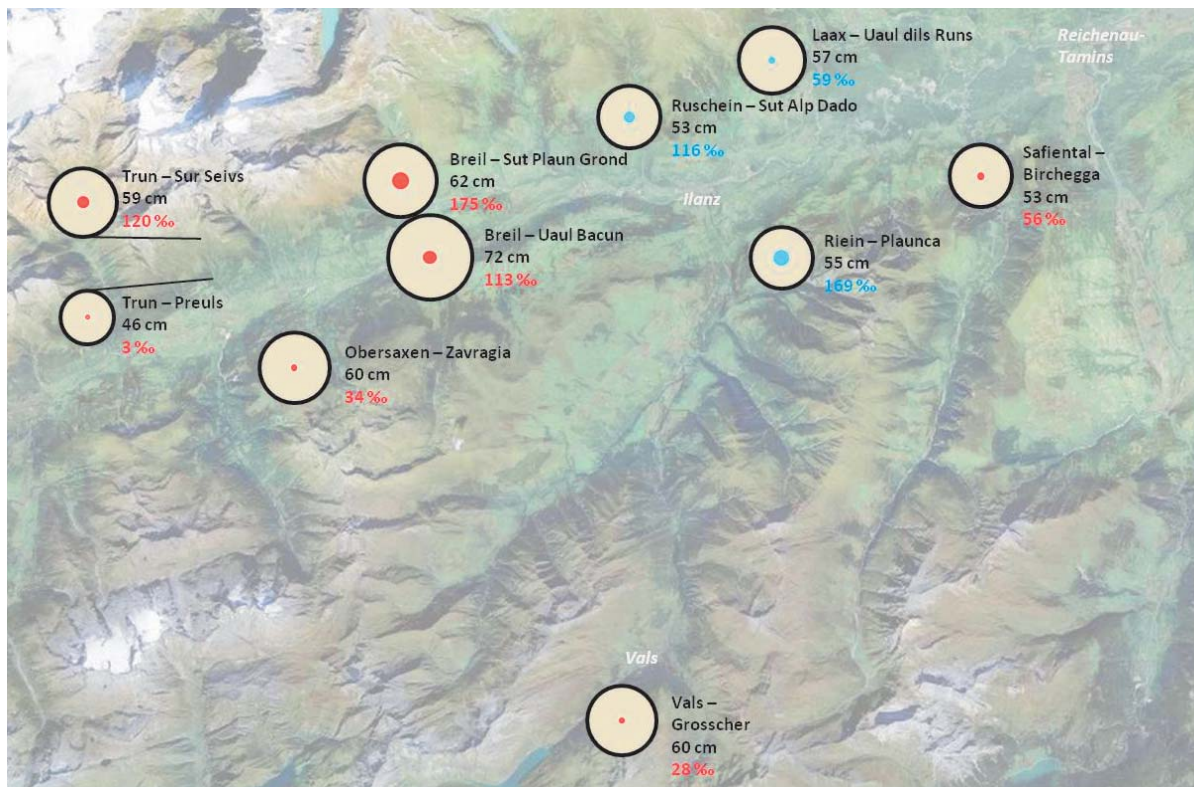


Abb. 6: Vergleich von Kernfäuleschaden im Verhältnis zum Brusthöhendurchmesser pro Standort. Der schwarze äussere Kreis stellt den durchschnittlichen BHD aller untersuchten Fichten des betreffenden Standortes dar. Die inneren Kreise entsprechen dem Verhältnis des durchschnittlichen Anteils an Schadengraden nach Graber zum BHD dieses Standortes (1000 ‰ Schadengrade würde einen rot/blau ausgefüllten, schwarz umrandeten Kreis ergeben). Die Durchschnitts-Schadengrade der vorhandenen Stammscheiben sind rot eingefärbt. Für die Standorte ohne Stammscheiben wurden die Durchschnitts-Schadengrade anhand der gemessenen Tomographen-Werte berechnet (blau). Für diese Berechnung wurde ein lineares Modell erstellt, welches die Rotfinder- und PiCUS-Werte als erklärende Variablen verwendet und eine Extrapolation über den vorhandenen Wertebereich hinaus zulässt. Landkarten-Quelle: Bundesamt für Landestopografie.

Das Ausmass des Kernfäuleschadens variierte beträchtlich zwischen den einzelnen Untersuchungsgebieten (Abb. 6). Die mit Abstand höchsten Kernfäuleschäden konnten auf vier der fünf ehemals beweideten Flächen (Riein-Plaunca, Breil-Sut Plaun Grond, Trun-Sur Seivs, Ruschein-Sut Alp Dado) festgestellt werden, einzig das nordwest-exponierte Obersaxen-Zavrugia weist sehr tiefe Kernfäulebefallswerte auf. Das höchste Befalls-Ausmass auf den nicht beweideten Standorten wurde in Breil-Uaul Bacun gemessen – an den mit Abstand stärksten Bäumen (durchschnittlicher BHD: 72 cm). Sowohl (ehemalige) Beweidung als auch eine tiefere Höhenlage scheinen einen beachtlichen Einfluss auf das durchschnittliche Kernfäule-Ausmass pro Untersuchungsgebiet zu haben (Abb. 7 und 8.). Die beiden subalpinen, nicht beweideten Standorte (Preuls und Vals) beheimateten die Bäume mit dem durchschnittlich geringsten Schadengrad nach Graber (Abb. 6 und 7). Ein möglicher Einfluss der Exposition der Standorte lässt sich nicht eindeutig erkennen (Abb. 8). Auf Ebene der Baumindividuen wurde ebenfalls eine grosse Variation des Schadenausmasses gefunden (Abb. 7). Bäume mit Schadengrad nach Graber über 100 % kommen fast ausschliesslich entweder auf ehemals beweideten Flächen vor – oder auf solchen mit sehr starken Bäumen (Breil-Uaul Bacun).

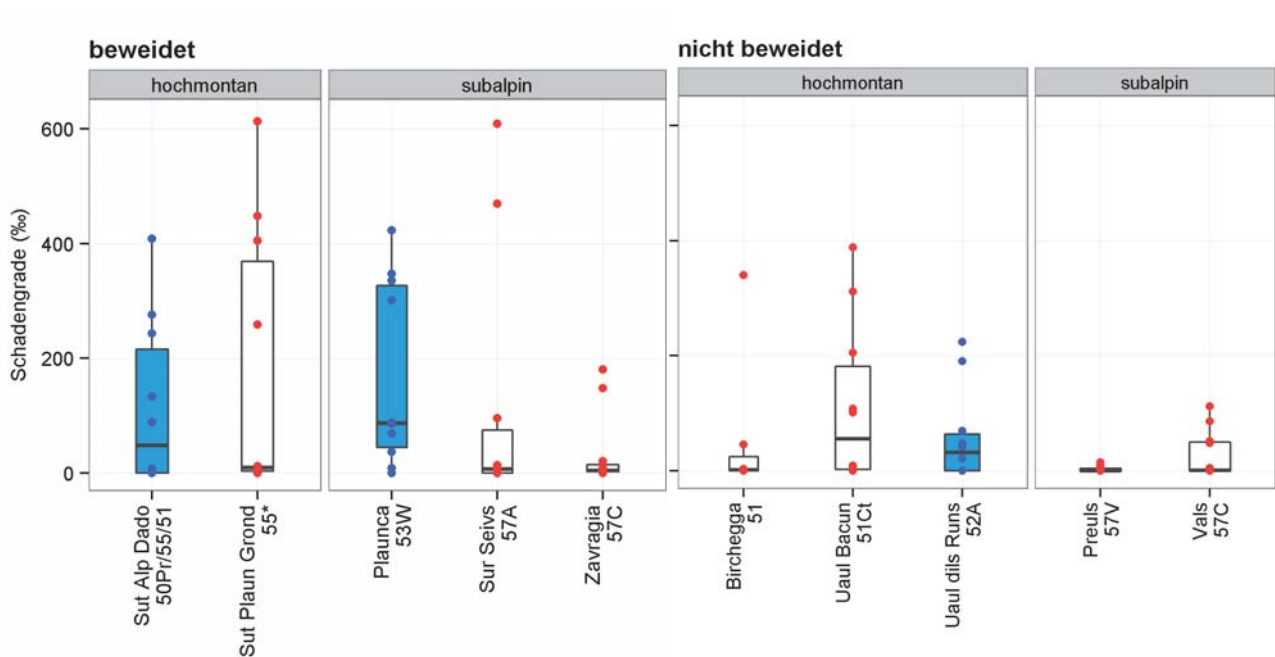


Abb. 7: Kernfäule-Ausmass pro Untersuchungsort, unterteilt nach Beweidung und Höhenlage. Weisse Boxen mit roten Punkten: Verteilung und Rohdaten für die vorhandenen Stammscheiben (7 Standorte). Blaue Boxen mit blauen Punkten: Verteilung und anhand der gemessenen Tomographenwerte geschätzte Schadengrade nach Graber (3 Standorte). Zusätzlich wird die Waldgesellschaft nach Ellenberg & Klötzli (1972) angegeben.

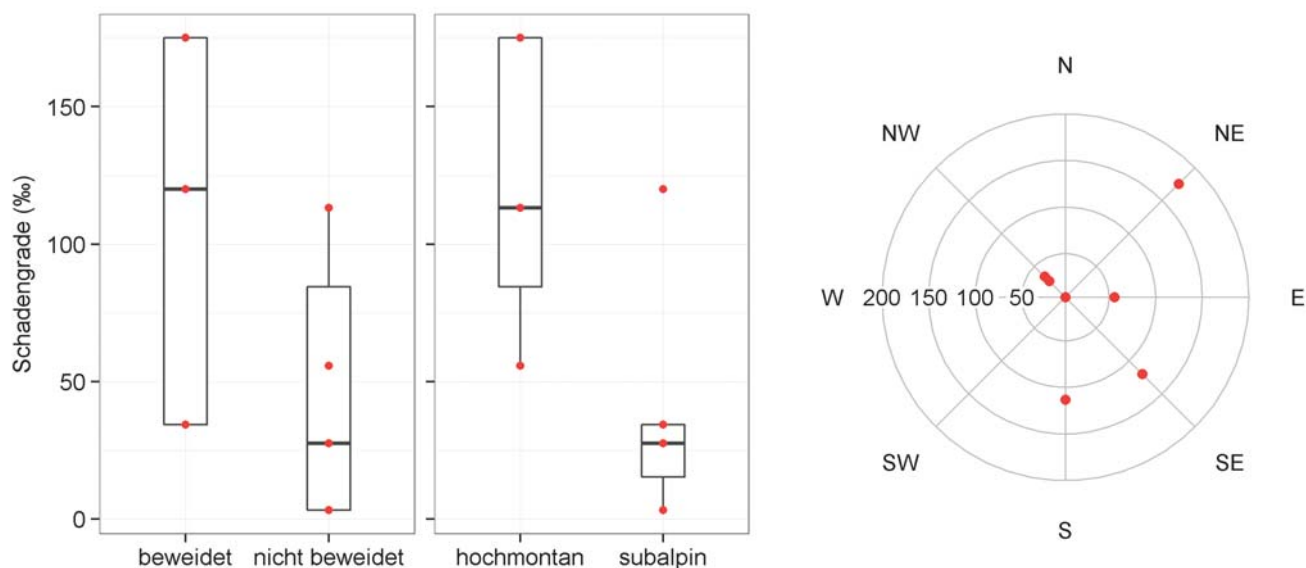


Abb. 8: Durchschnittliches Kernfäule-Ausmass in Abhängigkeit von Beweidung (Bild links), Höhenstufe (Bild Mitte) und Exposition (Bild rechts, Kreise stellen Schadenpromille-Achse dar (0-200 ‰)). Die Punkte entsprechen dem arithmetischen Mittel der Schadengrade nach Graber pro Standort. Es wurden nur die Standorte mit vorhandenen Baumscheiben analysiert. Man beachte, dass die Anzahl Datenpunkte teilweise recht gering ist, da die Analyse auf Standort- und nicht auf Einzelbaumebene durchgeführt wurde.

Auf Ebene der einzelnen Individuen konnte kein klarer Zusammenhang zwischen Brusthöhendurchmesser (BHD) und Kernfäule-Ausmass festgestellt werden (Abb. 9, links). Bei der Betrachtung des durchschnittlichen Schadengrads nach Graber pro Untersuchungsgebiet war jedoch ein Trend in Richtung grösseren Schadenausmasses bei stärkeren Bäumen erkennbar (Abb. 9, rechts). Dies könnte mit einer bei diesen Bäumen möglicherweise höheren Wachstumsgeschwindigkeit zusammenhängen (Abb. 10). Bei der Analyse der altersgeschätzten Fichten-Untergruppe (siehe Kapitel 2.1) zeigt sich, dass sowohl Wachstum als auch BHD das Schadenausmass der gebildeten Gruppen zu beeinflussen scheinen (Abb. 10). Man muss jedoch beachten, dass die altersgeschätzte Fichten-Untergruppe nur aus 32 Bäumen besteht und die daraus gebildeten Vergleichs-Gruppen „Schadengrad < 2 ‰“ und „Schadengrad > 50 ‰“ sogar nur 6 bzw. 5 Individuen enthalten. Dennoch finden die hier erhaltenen Trends Rückhalt in der Literatur – so konnten Edman et al. (2006) zeigen, dass schnell gewachsenes Fichtenholz anfälliger für von Fäulepilze verursachten Abbau ist als das Holz langsam gewachsener Fichten. Dies könnte u.a. mit den unterschiedlichen Holzstrukturellen Eigenschaften von langsam und schnell wachsendem Fichtenholz zusammenhängen. So haben langsam wachsende Fichten generell eine höhere Holzdicke (Pape 1999), was möglicherweise den Fäuleerregern die Holzersetzung erschwert. Diese Hypothese wird nebst anderem im Rahmen des parallel laufenden BAFU-Projektes „Einfluss von Kernfäulen auf den Kohlenstoffspeicher Wald“ (Wunder Consulting) weiterverfolgt werden.

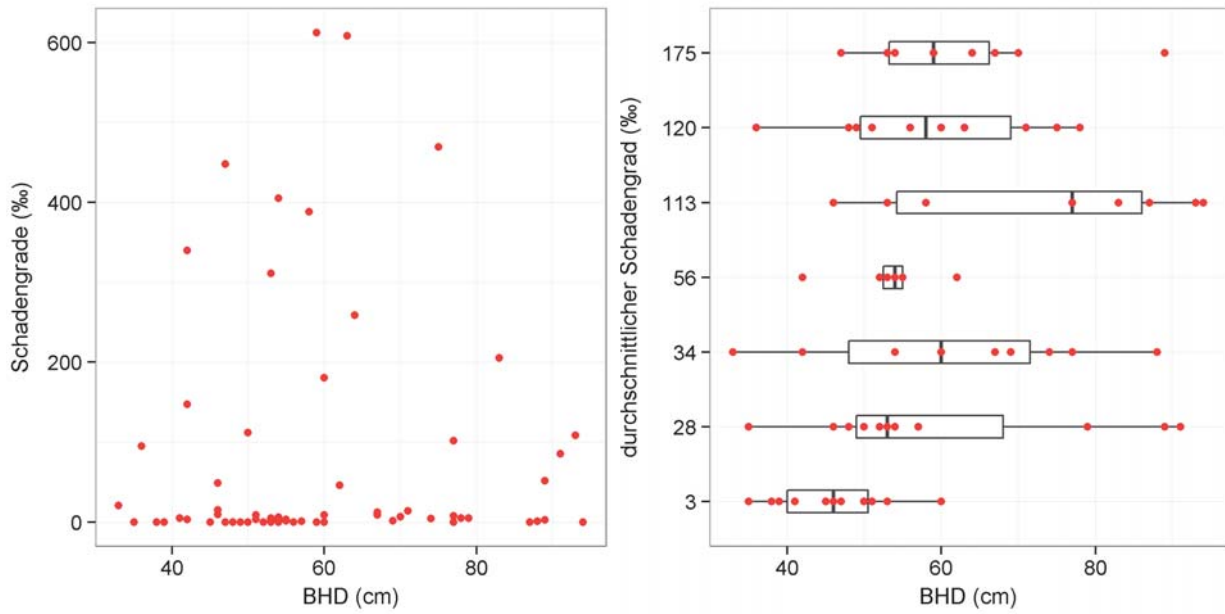


Abb. 9: Kernfäule-Ausmass in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser (BHD) der Fichten, standortunabhängig (links) und als Boxplot-Diagramm pro Untersuchungsgebiet (rechts). Die roten Punkte entsprechen den Rohdaten.

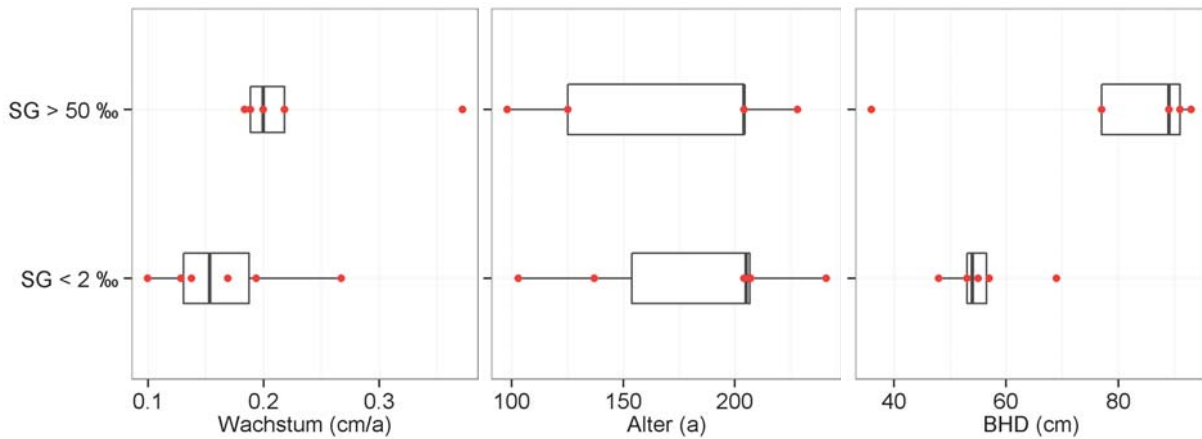


Abb. 10: Kernfäule-Ausmass der altersgeschätzten Fichten. Es wurden zwei Untergruppen der betrachteten Bäume definiert („Kontrollgruppe“ (n=6) mit Schadegrad < 2 % und „Faule“ (n=5) mit Schadegrad > 50 %) und als Boxplot-Diagramme in Abhängigkeit von Wachstum, Alter und BHD dargestellt (rechts). Die roten Punkte entsprechen den Rohdaten.

Für sechs Standorte liegen sowohl Förster-Einschätzungen als auch tatsächliche, auf der Basis von Stammscheiben ermittelte Schadengrade nach Graber vor (Abb. 11): Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass eine Bestimmung von Kernfäulen anhand äusserer Merkmale nur sehr schwer möglich ist – und bestätigen damit die Ergebnisse vorheriger Untersuchungen (z.B. Graber 1996). In seinen Analysen konnte Graber (1996) zeigen, dass kernfaule und gesunde Bäume anhand waldbaulich-wachstumskundlicher Merkmale nicht zu unterscheiden seien.

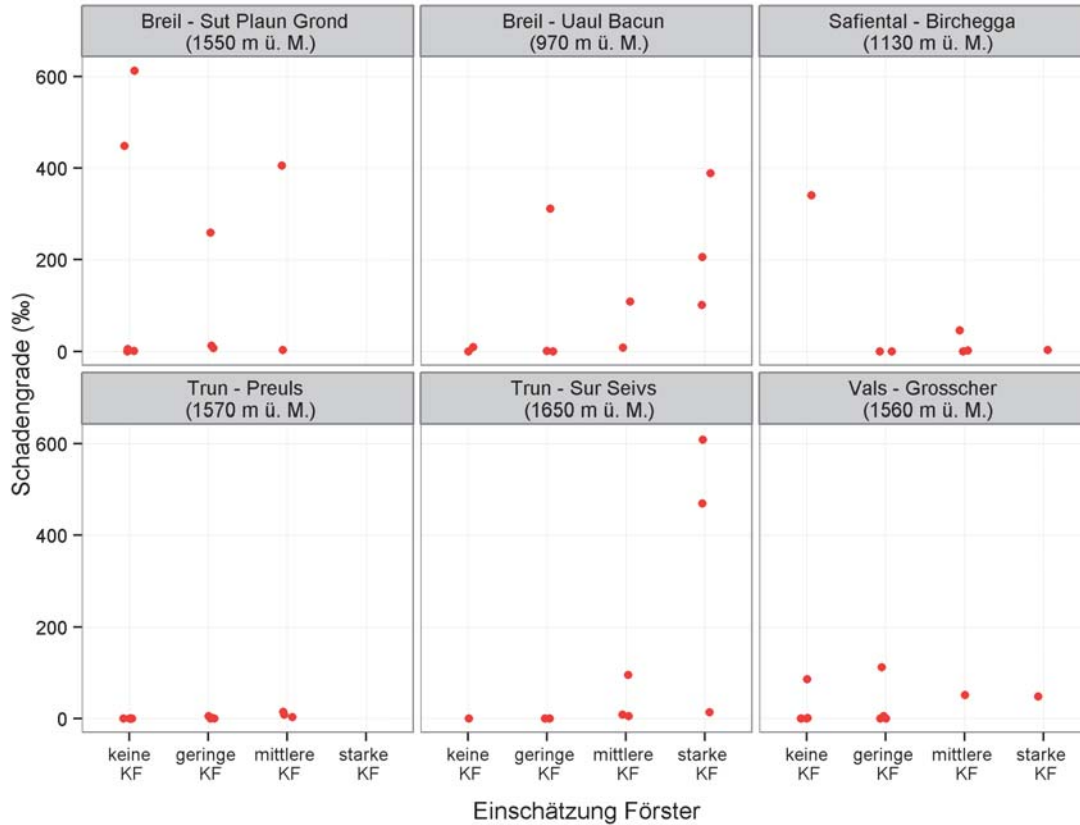


Abb. 11: Förstereinschätzung von Kernfäulen. Pro Untersuchungsgebiet werden die Einschätzungen der zuständigen Förster (KF=Kernfäule) und die tatsächlichen Schadengrade nach Graber der betreffenden Fichten dargestellt.

3.3 Verteilung der Kernfäulen innerhalb eines Standorts

Innerhalb eines Standortes traten die Kernfäulen häufig geklumpert auf, was auf eine Ausbreitung über die Wurzelanläufe hinweist (siehe Wunder et al. 2013). Beispielhaft wird dies hier für Sut Plaun Grund im Forstrevier Breil aufgezeigt, d.h. den Standort, der von allen untersuchten Flächen mit vorhandenen Stammscheiben den höchsten Kernfäulebefallsgrad aufweist (Abb. 12).

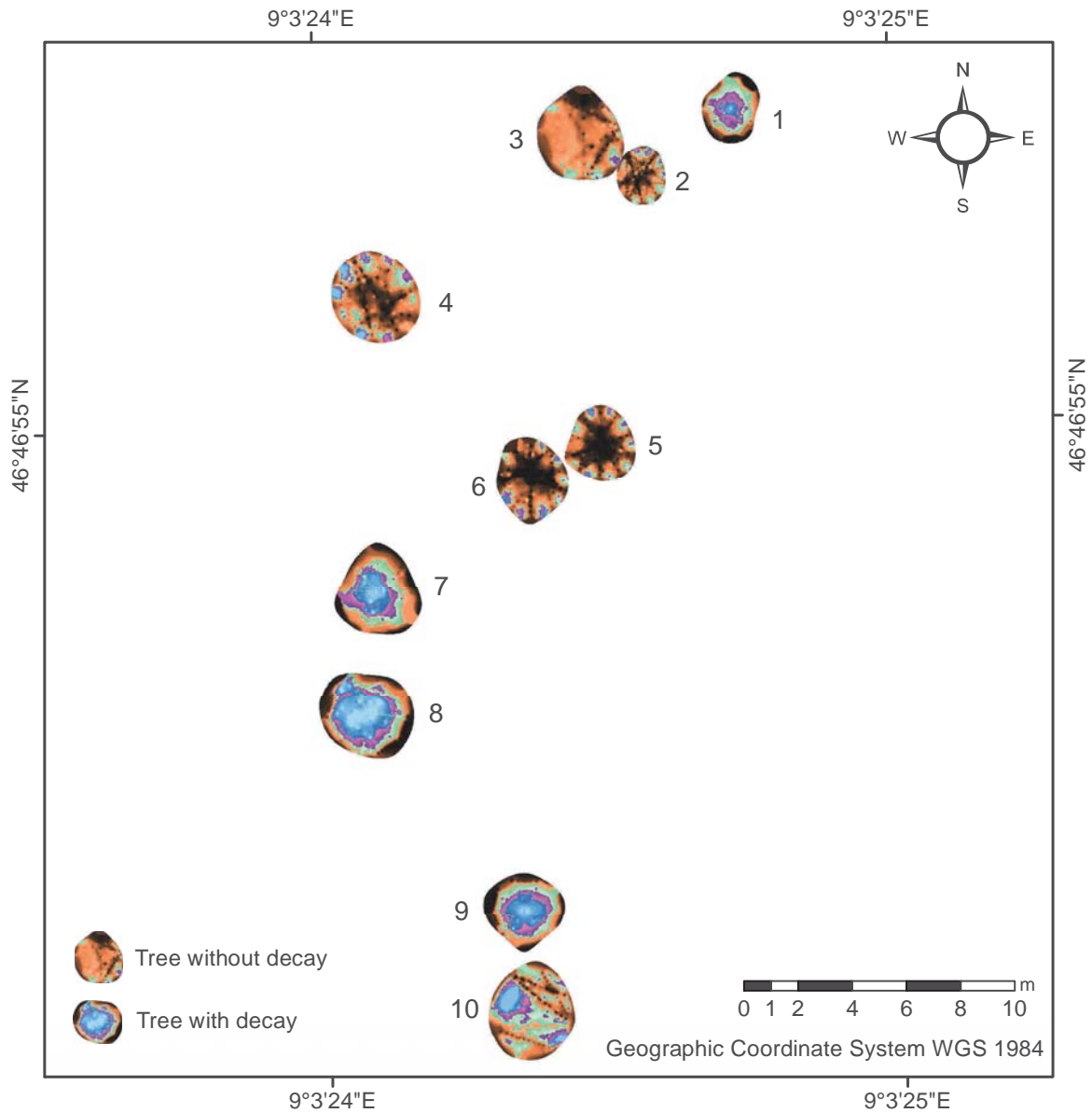


Abb. 12: Räumliche Verteilung der Bäume mit Kernfäulen („tree(s) with decay“) innerhalb des Standortes Sut Plaun Grund (Forstrevier Breil). An diesem Standort stimmen die Schalltomographen-basierten Messungen sehr gut mit dem Schadensgrad nach Graber überein. Siehe auch Anhang I, Tab. I für eine vergrößerte Darstellung der Einzelbaummessungen.

3.4 Phytopathologische Analysen

Die molekulare Diagnostik hat ergeben, dass es sich bei den isolierten *Armillaria* sp. Kulturen um *Armillaria cepistipes* handelt. Alle isolierten *Heterobasidion* sp. Kulturen wurden als *Heterobasidion parviporum* („Fichten-Wurzelschwamm“) identifiziert.

Betrachtet man alle Stammscheiben zusammen, so weisen insgesamt 48 der 70 Bäume (69 %) eine Fäule auf. Von diesen 48 Scheiben wurden mit den beschriebenen Methoden bei 37 Scheiben zahlreiche verschiedene Pilze isoliert, oftmals auch mehrere Erreger pro Scheibe – für 19 Scheiben (ca. 27 % aller Bäume und ca. 40 % aller faulen Bäume) konnten die drei erwarteten Haupterreger von Kernfäulen *Armillaria cepistipes* (3 Bäume), *Climacocystis borealis* (4 Bäume) und *Heterobasidion parviporum* (12 Bäume) nachgewiesen werden (Abb. 13, rechts). Ebenfalls mehrfach wurden die Basidiomyceten *Pholiota squarrosa* (2 Bäume) und *Stereum sanguinolentum* (5 Bäume) isoliert. *P. squarrosa* ist ein bekannter Fäuleerreger, jedoch ist dieser Pilz eher auf Laubbäumen zu erwarten (z. B. Gilbertson 1980). *S. sanguinolentum* gilt als Wundfäulepilz und ist häufig auf Fichten zu finden (Vasiliauskas & Stenlid, 1996). Da in der vorliegenden Studie Fäulen von durch Wunden eingetretenen Erreger nicht explizit aussortiert wurden, ist die Isolation von *S. sanguinolentum* nicht überraschend. Am häufigsten wurde *Heterobasidion parviporum* isoliert, gefolgt von *Climacocystis borealis*. *Armillaria cepistipes* wurde vor allem von stark faulen Bäumen isoliert (Abb. 13, links). Insgesamt liegt die Anzahl der *Armillaria*-Isolationen etwas unter einem allfälligen Erwartungswert (z.B. Graber 1996). Neben den hier erwähnten holzabbauenden Basidiomyceten wurden noch weitere Pilze isoliert (z.B. eher bodenlebende Pilze wie *Coprinellus* sp. und *Mortierella* sp.), auf die hier jedoch aufgrund ihrer geringeren Bedeutung nicht eingegangen wird. Bei 11 Stammscheiben (23 % der faulen Fichten) war die Isolation des Erregers nicht erfolgreich. Es handelte sich hierbei hauptsächlich um Stammscheiben mit beginnender Kernfäule und (noch) geringem Schadenausmass (Abb 13, rechts).

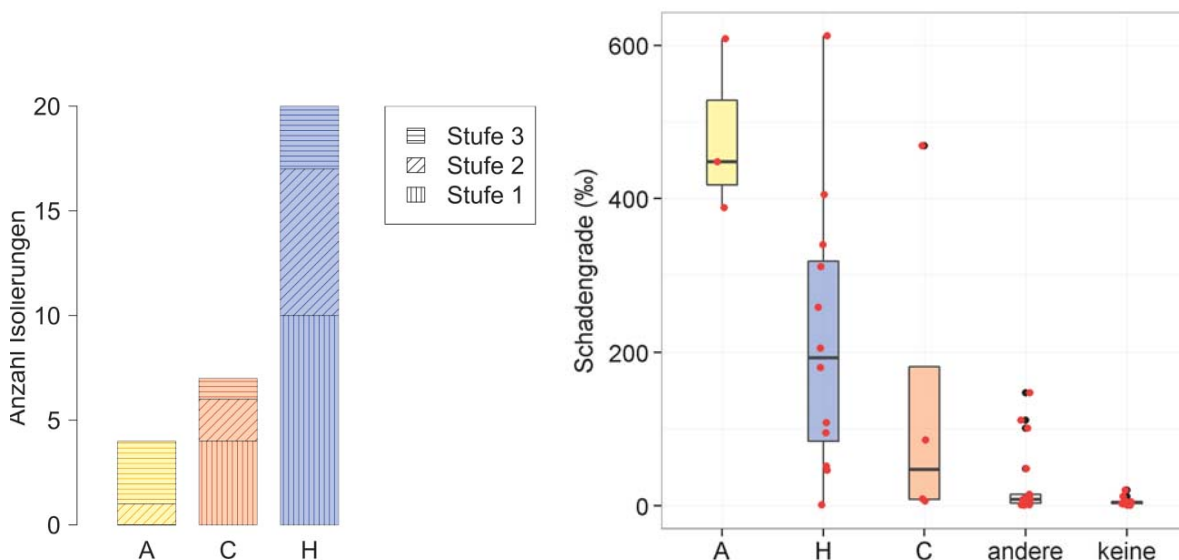


Abb. 13: Links: Anzahl isolierter Kulturen der drei Kernfäule-Haupterreger in allen Untersuchungsgebieten, verteilt auf die drei Kernfäulestufen. Mehrfachisolierungen aus denselben Fäuleklassen einer Stammscheibe wurden nicht berücksichtigt. Rechts: Hauptfäuleerreger der untersuchten Stammscheiben im Verhältnis zu deren Schadengrad nach Graber. Die roten Punkte entsprechen den Rohdaten. A: *Armillaria cepistipes*. C: *Climacocystis borealis*. H: *Heterobasidion parviporum*. andere: Pilze anderer Arten. keine: es konnte trotz vorhandener Kernfäule kein Erreger isoliert werden.

3.5 Analyse der Messgeräte

PiCUS

Der rein bildliche Vergleich der erhaltenen Schall- und Widerstandstomogramme mit den tatsächlichen Stammquerschnitten zeigt, dass der PiCUS die vorhandenen Kernfäulen oftmals ortsgetreu erfasst (siehe Anhang I, Tab. I und Anhang I, Abb. I-III). Jedoch stimmen dabei nicht in allen Fällen Ort und Intensität der in den beiden Tomogrammen detektierten Kernfäulen überein. Ein möglicher Grund dafür könnte in unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der gemessenen Fichten liegen. So wird zum Beispiel laut Hersteller der gemessene elektrische Widerstand vom Wassergehalt, der Zellstruktur und der chemischen Zusammensetzung bestimmt, die gemessene Schallgeschwindigkeit hingegen ist abhängig vom Elastizitätsmodul und der Dichte des Holzes. Daher wird empfohlen, Schall- und Widerstandstomographie in einem ergänzenden Sinn zu betrachten.

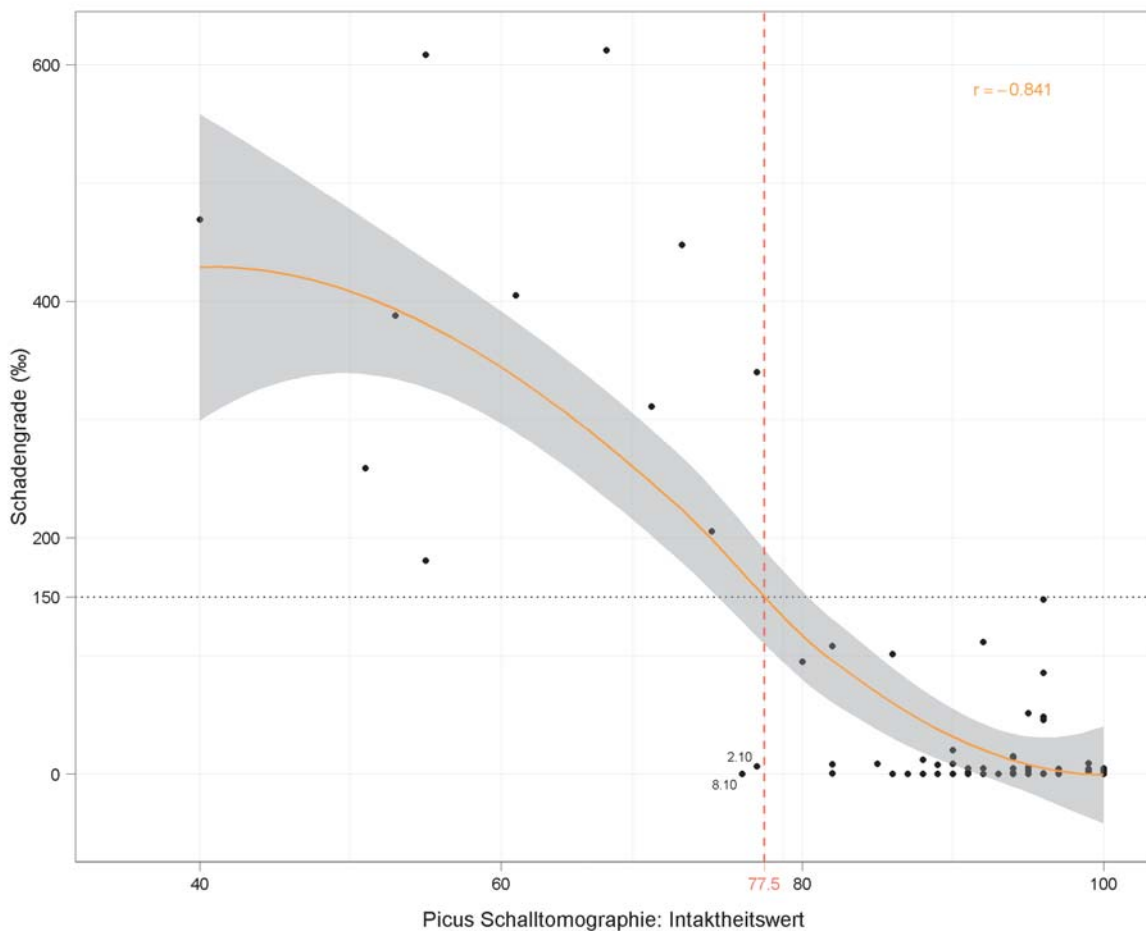


Abb. 14: PiCUS Schalltomographie: Intaktheitswert (100 % minus „fauler Anteil“) pro Schadengrad nach Graber. Regressionskurve und Korrelationskoeffizient wurden mit einem LOESS Modell (span=1.1) berechnet. Grau schattiert wird das 95 % Konfidenzintervall dargestellt. Die rote, gestrichelte Linie entspricht dem anhand der Regressionskurve bestimmten PiCUS-Schwellenwert von 77.5. Werte darunter mit Schadengrad < 150 % sowie Werte darüber mit Schadengrad > 150 % wurden als Ausreisser definiert und sind identifiziert.

Die von der PiCUS-Software im Schalltomogramm bestimmten prozentualen Anteile an gesundem und faulem Holz (dazwischen gibt es eine unterschiedlich grosse grün eingefärbte „Übergangszone“) lassen sich mit Regressionsmodellen analysieren (Abb. 14). Um einen geeigneten „Intaktheitswert“ aus diesen Anteilen zu bestimmen, wurden drei verschiedene Modelle analysiert („% gesundes Holz“, „100 - %

faules Holz“, „% gesundes - % faules Holz“). Mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -0.841$ erzielte das Modell „100 - % faules Holz“ die höchste Modelleistung (zum Vergleich: „% gesundes Holz“ mit $r = -0.763$ und „% gesundes - % faules Holz“ mit $r = -0.810$).

Anhand der Werteverteilung der dargestellten PiCUS-Intaktheitswerte (Abb. 14) und der erstellten Regressionskurve wurde ein Schwellenwert für die Schalltomographie definiert: Ist der PiCUS-Intaktheitswert kleiner als 77.5, so sind die betroffenen Bäume mit hoher Wahrscheinlichkeit relativ stark kernfaul (Schadengrad > 150 ‰). Höhere Werte deuten auf gesunde bis nur leicht kernfaule Bäume hin (Schadengrad < 150 ‰). Die in der Abbildung beschriebenen Ausreisser wurden mit ihren Identifikationsnummern versehen, so dass sie mit den Stammquerschnitten sowie den Rotfinder-Werten und den PiCUS-Widerstandstomogrammen verglichen werden können. So können mögliche „falsche Faule“ (vom PiCUS als kernfaul eingestuft, Schadengrade aber < 150 ‰) und „falsche Gesunde“ (Schadengrade > 150 ‰, aber laut PiCUS-Wert gesund) ermittelt werden, welche Rückschlüsse auf die Fehlerquote der PiCUS Schalltomographie zulassen. Die Diskussion dieser Ausreisser folgt im Abschnitt „Vergleich Rotfinder vs. PiCUS“.

Die PiCUS Widerstandstomographie wurde ebenfalls mit Regressionsmodellen analysiert (Abb. 15). Dazu wurden die von der PiCUS-Software bestimmten Maximal- und Minimal-Widerstandswerte (die Werte wurden jeweils von der rot-blauen Farbskala entnommen, siehe Anhang I, Tab. I) verwendet. Bei den Messungen wurde normalerweise die niedrigste Standard-Spannung verwendet. In einigen Fällen wurde aufgrund niedriger Messqualität eine zweite Messung mit vierfacher Standard-Spannung gemacht. Wenn sich entweder der Minimal- oder der Maximal-Widerstandswert bei diesen Mehrfachmessungen um mehr als 10 % unterschied, so wurde für die Modellanalyse der mit der vierfachen Standard-Spannung erzielte Wert verwendet (dies war bei den Bäumen 1.7, 5.5 und 5.8 der Fall). Es wurden ebenfalls drei verschiedene Modelle analysiert (Minimalwerte, Maximalwerte, Durchschnittswerte). Die Verwendung der Minimalwerte ergab dabei mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -0.891$ die höchste Modelleistung (Maximalwerte: $r = -0.804$; Durchschnittswerte: $r = -0.811$).

Anhand der Werteverteilung und der erstellten Regressionskurve wurde wiederum ein Schwellenwert gewählt: Ist der PiCUS Widerstandstomographie Minimalwert kleiner als 66.8, so sind die betroffenen Bäume mit hoher Wahrscheinlichkeit relativ stark kernfaul (Schadengrad < 150 ‰), wo hingegen Werte grösser als 66.8 auf gesunde bis nur leicht kernfaule Bäume hindeuten (Schadengrad < 150 ‰). Um die Leistung der PiCUS-Widerstandstomographie zu evaluieren, wurden auch hier mögliche „falsche Faule“ und „falsche Gesunde“ wie in der Abbildung beschriebenen als Ausreisser mit Identifikationsnummern versehen. Sie werden im Abschnitt „Vergleich Rotfinder vs. PiCUS“ diskutiert.

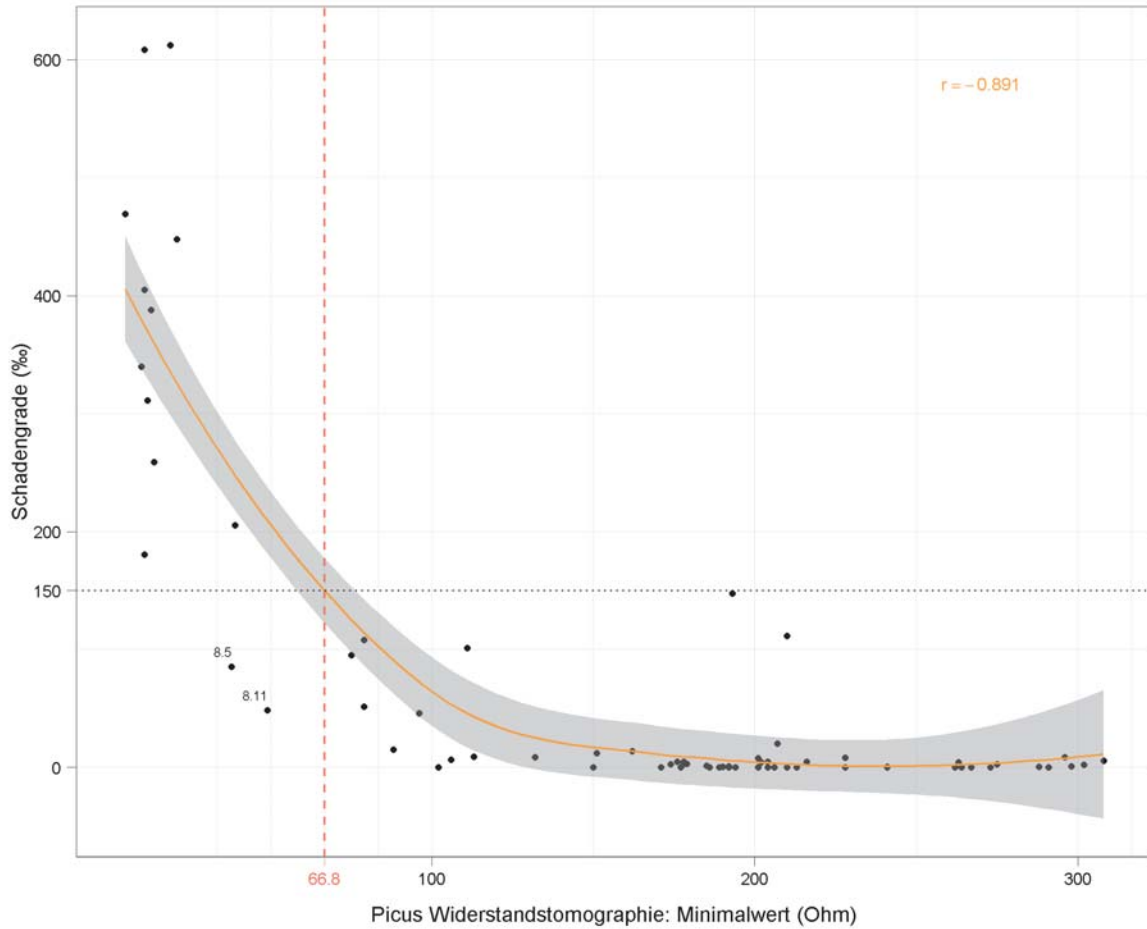


Abb. 15: PiCUS Widerstandstomographie: Minimalwert in Ohm pro Schadengrad nach Graber. Regressionskurve und Korrelationskoeffizient wurden mit einem LOESS Modell (span=1.1) berechnet. Grau schattiert wird das 95 % Konfidenzintervall dargestellt. Die rote, gestrichelte Linie entspricht dem anhand der Verteilung und der Regressionskurve bestimmten PiCUS-Schwellenwert von 66.8. Werte darunter mit Schadengrad < 150 ‰ sowie Werte darüber mit Schadengrad > 150 ‰ wurden als Ausreisser definiert und sind identifiziert.

Rotfinder

Mit einem Minimum von ca. 2000 und einem Maximum von 30780 wiesen die Rotfinderwerte eine grosse Spannweite auf und wurden deshalb für die Darstellungen log-transformiert. Wie bereits erwähnt, wurden bei einigen Bäumen mehrere Rotfinderwerte auf der gleichen Messebene bestimmt. Daher wurden in drei Szenarien die Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerte dieser Mehrfachmessungen analysiert, um den Schätzer zu bestimmen, der am besten den Schadengrad beschreibt. Es zeigte sich, dass die Minimalwerte mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -0.810$ am besten geeignet sind (zum Vergleich: Maximalwerte mit $r = -0.757$ und Durchschnittswerte mit $r = -0.772$).

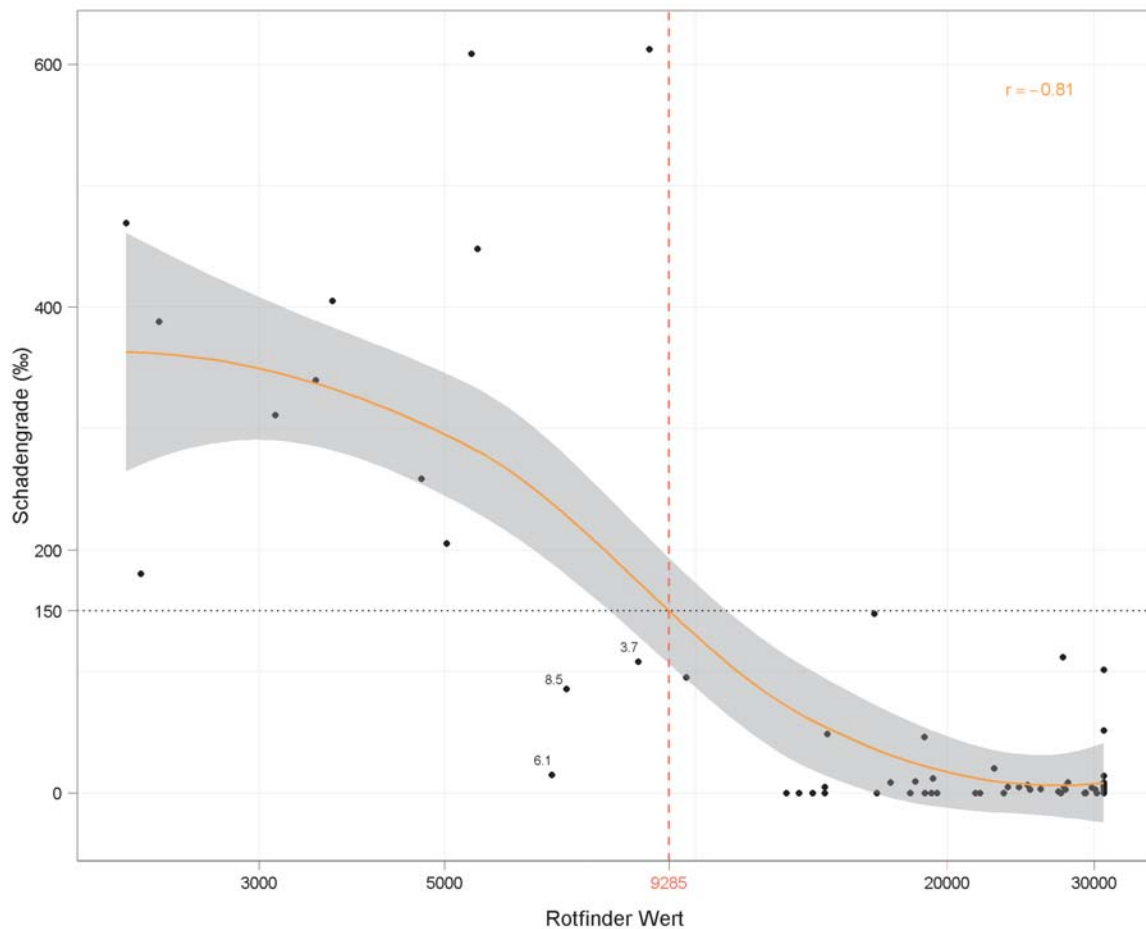


Abb. 16: Logarithmierte Rotfinderwerte pro Schadengrad nach Graber. Regressionskurve und Korrelationskoeffizient wurden mit einem LOESS Modell (span=1.1) berechnet. Grau schattiert wird das 95 % Konfidenzintervall dargestellt. Die rote, gestrichelte Linie entspricht dem anhand der Verteilung und der Regressionskurve bestimmten Rotfinder-Schwellenwert von 9285. Werte darunter mit Schadengrad < 150 ‰ sowie Werte darüber mit Schadengrad > 150 ‰ wurden als Ausreisser definiert und sind identifiziert.

Anhand der Werteverteilung der dargestellten Rotfinder-Messwerte (Abb. 16) und der erstellten Regressionskurve wurde ein Schwellen-Rotfinderwert von 9285 definiert. Werden tiefere Werte gemessen, so sind die betroffenen Bäume mit hoher Wahrscheinlichkeit relativ stark kernfaul (Schadengrad > 150 ‰). Höhere Werte deuten auf gesunde bis nur leicht kernfaule Bäume hin (Schadengrad < 150 ‰). Um die Qualität des Rotfinders als „Kernfäuledektektor“ zu eruieren, wurden auch hier die in der Abbildung beschriebenen Ausreisser mit ihren Identifikationsnummern versehen und in mögliche „falsche Faule“ und „falsche Gesunde“ unterteilt. Diese Fehlbeurteilungen werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

Vergleich Rotfinder vs. PiCUS

Keine der Messmethoden erzielte „falsche Gesunde“ – beide Messgeräte erkennen somit vor allem mittlere bis starke Kernfäulen sehr zuverlässig. Bei den „falschen Faulen“ wurden drei Bäume vom Rotfinder falsch eingeteilt – zwei davon scheinen eher „atypische“ Kernfäulen (oder sogar Wundfäulen) zu haben (Tab. 3 und Anhang I, Tab. I, Abb. I). Beim Baum 3.7 wurde möglicherweise der Schadengrad unterschätzt. Je zwei weitere „falsche Faule“ stammen von der PiCUS Schall- und Widerstandstomographie, welche sich aber durch die sich ergänzenden Messmethoden ausschliessen lassen. Die beschrie-

benen Fehlklassifikationen treten bei verschiedenen identifizierten Pilzen auf und lassen kein klares Muster bezüglich der Fäuleerreger erkennen (Tab. 3). Es scheint keinen Zusammenhang zwischen Fehlfunktionen der Messgeräte und bestimmten Pilzarten zu geben – somit lassen sich sowohl PiCUS als auch Rotfinder generell bei allen hier isolierten Kernfäuleerregern anwenden.

Tab. 3: Aufgrund der definierten Schwellenwerte als Ausreisser („falsche Faule“) bestimmte Bäume. Angegeben werden die betreffenden Messgeräte (R: Rotfinder, PS: PiCUS Schalltomographie, PW: PiCUS Widerstandstomographie) sowie eindeutig identifizierte Fäuleerreger.

Ausreisser	Messgerät	mögliche Begründung	Fäuleerreger
2.10	PS	Fäulezentrum eher am Rand; schwache Fäule	keine isoliert
3.7	R	grossflächige, eher schwache Fäule	<i>Heterobasidion parviporum</i>
6.1	R	beginnende Fäule; Fäulezentrum eher am Rand als im Kern	<i>Stereum sanquinolentum</i>
8.5	PW, R	eher grosser Baumdurchmesser; keine typische Kernfäule	<i>Climacocystis borealis</i>
8.10	PS	keine speziellen Merkmale sichtbar (keine Fäule vorhanden)	keine isoliert
8.11	PW	keine typische Kernfäule, Fäule- zentrum eher am Rand	<i>Stereum sanquinolentum</i>

Aufgrund der definierten Schwellenwerte wurden für alle gemessenen Rotfinder- und PiCUS-Werte je zwei Gruppen gebildet („faul“ und „nicht faul“). Die Verteilung der Schadengrade nach Graber in diesen Gruppen (Abb. 17) lässt bei beiden Messgeräten einen signifikanten Unterschied zwischen „faulen“ und „nicht faulen“ Bäumen erkennen, der mit dem Wilcoxon-Rangsummentest bestätigt werden konnte ($p < 0.001$).

Insgesamt wurden 11 der vollständig untersuchten Fichten mit allen drei Messmethoden korrekt als „faul“ erkannt und 53 der gesunden oder nur schwach kernfaulen korrekt als „gesund“ eingestuft (Abb. 17). Beide Messgeräte scheinen somit gut zu funktionieren und erkennen besonders schwere Kernfäulen zuverlässig. Bei Gebrauch des deutlich aufwendigeren PiCUS (mindestens 20-30 Minuten Messdauer pro Baum) scheint es sinnvoll, Schall- und Widerstandstomographie zusammen zu betrachten – so lassen sich Ausreisser minimieren. Beachtlich ist die hohe Leistungsfähigkeit des relativ einfachen und schnellen Rotfinder-Tests (2-3 Minuten Messzeit pro Baum) – die von Oliva et al. (2011) erzielten vielversprechenden Ergebnisse in schwedischen Forsten scheinen sich für die hier untersuchten Schweizer Wälder mit deutlich stärkeren Bäumen zu bestätigen. Die Resultate einer kleinen Zusatzstudie (siehe Anhang III) deuten darauf hin, dass der Rotfinder auch bei schwachem und mittlerem Baumholz Kernfäulen relativ zuverlässig detektiert.

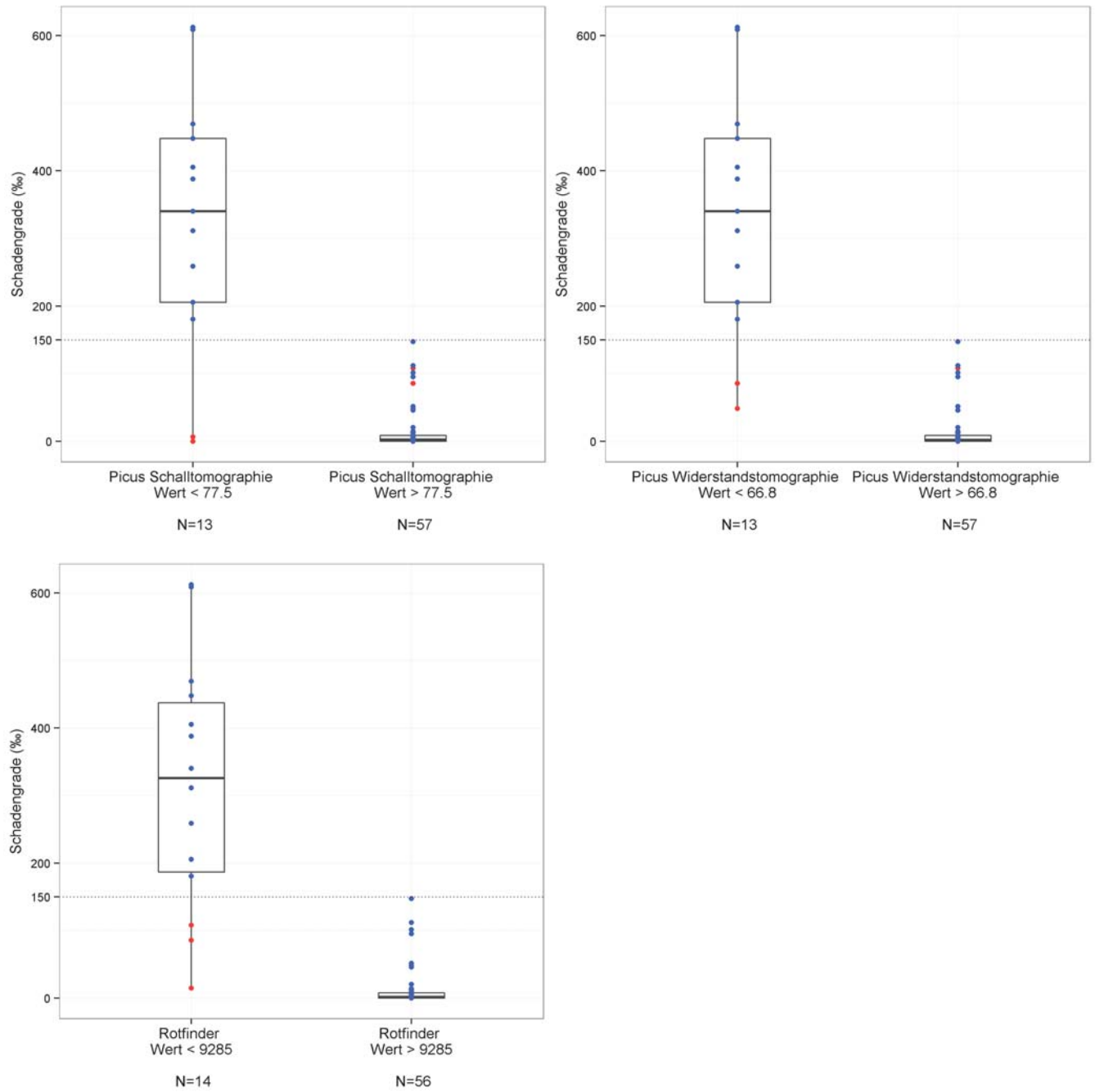


Abb. 17: Boxplots von Schadengraden nach Graber und PiCUS-/Rotfinderwerten. Die Punkte entsprechen den Rohdaten. Blau dargestellt sind die Werte der Bäume, die von allen drei Messgeräten korrekt als „faul“ bzw. „gesund“ erkannt wurden. Die jeweils zusätzlich vom betreffenden Messgerät als „faul“ bzw. „gesund“ definierten Bäume sind rot dargestellt.

4. Schlussfolgerungen & Ausblick

Kernfäulebefallsgrad: In den untersuchten Standorten in fichtendominierten Beständen im Kanton Graubünden wurde bei 69 % der gefälltten Bäume (n=70) eine Fäule festgestellt, deren Ausmass jedoch stark variierte. Für 40 % der faulen Bäume wurden die typischen Kernfäuleerreger *Heterobasidion parviporum*, *Climacocystis borealis* und *Armillaria cepistipes* nachgewiesen. Die Kernfäulen traten häufig geklumpt auf, was auf eine Ausbreitung der Fäulen über die Wurzelanläufe schliessen lässt. In weiteren Untersuchungen, z.B. mit Hilfe populationsgenetischer Analysen, könnte diese Hypothese überprüft werden. Die durchschnittlichen Schadengrade pro Untersuchungsgebiet (vereinfacht nach Graber 1996) variierten stark zwischen 3 bis 178 ‰. Die vier am stärksten von Kernfäulen befallenen Standorte wurden ehemals beweidet. Starke Kernfäulen > 100 ‰ kommen fast ausschliesslich an Bäumen auf diesen beweideten Flächen vor – oder bei sehr grossen Bäumen unbeweideter Flächen (Breil - Uaul Bacun). Wie bei Graber (1996) wurden Bäume mit sehr kleinen Fäuleflächen bereits als „kernfaul“ eingestuft. Diese schwachen Fäulen haben keine grosse praktische Bedeutung und werden durch die angewendete Gewichtung (Schadengrad) entsprechend relativiert. Die Erfassung kleiner Kernfäulen ist jedoch sinnvoll, da bei diesen Bäumen mit fortlaufendem Wachstum auch eine Zunahme des Fäulebefalls wahrscheinlich ist - sie könnten somit in naher Zukunft zu stark kernfaulen Bäumen werden.

Kernfäulen & Schutzwaldstabilität: Die vorliegende Studie konnte einerseits bestätigen, dass der Kernfäulebefallsgrad in Graubündens Schutzwäldern gebietsweise hoch ist - und somit ein relevantes Problem für die Bestandesstabilität darstellt. Andererseits konnte gezeigt werden, dass geeignete technische Mittel zur Verfügung stehen, um den Kernfäulebefallsgrad rasch und zuverlässig zu erfassen. Damit wäre ein erster Schritt getan, um in Folgeuntersuchungen den Kernfäuleanteil in wichtigen Schutzwäldern mit potentiell hohem Kernfäuleanteil zu bestimmen. Auf der Basis solcher Daten liessen sich dann zuverlässige Rückschlüsse über den Zustand der Schutzwälder ziehen. Zudem wäre eine Bestimmung des Kernfäuleanteils von Schutzwäldern sinnvoll, die kurz zuvor von einem grösseren Naturgefahrenereignis betroffen waren. So liesse sich mittelfristig abschätzen, ab welchem „Kernfäulebefalls-Schwellenwert“ von den Stabilitätsträgern eines Schutzwaldes mit grösseren Zusammenbrüchen zu rechnen ist, ein Waldbestand also seine Schutzfunktion verliert. Weiterhin könnten solche statischen Erfassungen mit einem Monitoring von Kernfäulen auf ausgesuchten Dauerbeobachtungsflächen komplementiert werden, um die dynamische Entwicklung von Fäulen zu kontrollieren. Auf diese Weise könnte man einem möglicherweise drohenden Stabilitätsverlust durch eine Zunahme der Kernfäulen rechtzeitig erkennen und entgegen wirken.

Messgeräte-Vergleich: Beide Messgeräte können verlässlich Kernfäulen erkennen. Der PiCUS-Schall- und Widerstandstomograph zeigt eine beachtliche Detailtreue über das Ausmass der Fäulen. Der Rotfinder-„Schnelltest“ erzielt eine ähnliche hohe Leistung wie die Einschätzung auf der Basis des PiCUS-Intaktheitswertes - und könnte sich daher als Gerät für die Forstpraxis eignen. Das Messgerät könnte zu einer nachhaltigen Schutzwaldbewirtschaftung beitragen. Einerseits kann der Kernfäulebefallsgrad von wichtigen Schutzwäldern systematisch erfasst werden, z.B. oberhalb von Autobahnen oder Eisenbahnlinien, und so frühzeitig kernfaule Bäume aus dem Bestand herausgenommen werden. Andererseits könnte direkt beim Anzeichnen der Kernfäulebefallsgrad bestimmt und mit Farbspray am Baum markiert werden – und dadurch die Sicherheit bei den Holzfällarbeiten erhöht werden. Ein solcher „Schnelltest“ wäre somit nicht nur für Schutzwälder, sondern allgemein für bewirtschaftete Wälder von grossem ökonomischen Interesse, da mit herkömmlichen Methoden nur ungenau abgeschätzt werden kann, ob ein Baum kernfaul ist oder nicht.

Weiteres Vorgehen: Das Projekt soll in den nächsten Wochen und Monaten über verschiedene Kanäle der Forstpraxis & Forschung zugänglich gemacht werden: Im *Bündnerwald* ist soeben ein Artikel erschienen, welcher das Projekt der Forstpraxis vorstellt („Stabilitätsabschätzung mit moderner Kernfäulemesstechnik“, Ausgabe Juni 2014). Eine erste Präsentation in einem wissenschaftlichen Rahmen erfolgte an einem WSL-Kolloquium am 22.4.13. Darüber hinaus sind weitere Vorträge (z.B. Gebirgswaldpflegegruppe, Bildungszentren Wald in Maienfeld und Lyss, HAFL Zollikofen) sowie 1-2 internationale wissen-

schaftliche Publikationen geplant (bis Ende 2014/ Anfang 2015). Für eine interessierte Öffentlichkeit wird ein populärwissenschaftlicher Beitrag in einer grossen Tageszeitung angestrebt (z.B. Neue Zürcher Zeitung, Tagesanzeiger).

Im Rahmen des parallel laufenden BAFU-Projektes „Einfluss von Kernfäulen auf den Kohlenstoffspeicher Wald“ (Wunder Consulting) wird daran gearbeitet, die Tomogramme und Rotfinder-Messungen mit Dichtemessungen an denselben Stammscheiben zu korrelieren - um einerseits die hier verwendete Referenzgrösse „Schadengrad“ nach Graber zu verifizieren, und andererseits um Fehlklassifikationen beider Messgeräte durch Dichteschwankungen zu erklären. Schliesslich sollte die vielversprechende sensorbasierte Kernfäuleerfassung auf weitere Standorte und Baumarten ausgedehnt werden.

5. Danksagung

Zahlreiche Personen haben zum Gelingen dieses Projektes beigetragen – herzlichen Dank an:

Anna Plotzki, Veronique Ringwald, Dieter Trummer, Daniel & Lukas Rigling: Für den tatkräftigen Einsatz und die gute Gesellschaft bei den Feldarbeiten in Graubünden.

Andreas Rigling: Für die Unterstützung des Projektes, zahlreiche fruchtbare Diskussionen und das Bereitstellen von WSL-Technikern und Infrastruktur.

Daniel Rigling: Für die gute Beratung, die Koordination der phytopathologischen Analysen und die Bereitstellung der Laborinfrastruktur.

Domenic Bandli, Siegfried Berni, Mattias Cadruvi, Marco Casanova, Maurus Cavigelli, Kaspar Henny, Wendelin Hürlimann & Andreas Stucki: Für die konstruktive Zusammenarbeit und die grosse Flexibilität, auf meine Anfragen in punkto Feldbegehungen und bei den Fällungen einzugehen.

Ueli Bühler, Christian Buchli und Urban Maissen: Für die Unterstützung des Projektes und hilfreiche Diskussionen, insbesondere im Hinblick auf die vorbereitenden Arbeiten zur Auswahl der Untersuchungsflächen.

Bernhard Riedi, Luzi Schmid und Gian Claudio Leeger: Für die Beratung bei der definitiven Flächenauswahl, das Zusammenstellen von bestandesgeschichtlichen Informationen und von umfangreichem Kartenmaterial.

Lucie Homolova: Für die Hilfe bei der Erstellung der GIS-Karten.

André Wunder und einem anonymen Experten: Für hilfreiche Kommentare zu einer früheren Version dieses Schlussberichtes.

Peter Brang: Für die Beratung bei der Flächenauswahl und die Unterstützung beim Aufgleisen des Projektes.

Harald Bugmann: Für die Bereitstellung des PiCUS-Tomographen.

Werner Riegger: Für die reibungslose Betreuung dieses Projektes.

Schliesslich sei dem Wald- und Holzforschungsfonds des BAFU gedankt, der mit seiner finanziellen Unterstützung dieses Projekt möglich gemacht hat.

6. Literaturverzeichnis

- Edman, M., Möller R., Ericson, L. (2006): Effects of enhanced tree growth rate on the decay capacities of three saprotrophic wood-fungi. *Forest Ecology and Management* 232: 12-18.
- Ellenberg, H., Klötzli, F. (1972): Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. *Mitteilungen EAFV* 48: 587-930.
- Gilbertson, R. L. (1980): Wood-rotting fungi of North America. *Mycologia* 72(1): 1-49.
- Graber, D. (1996): Die Kernfäuleschäden an Fichte (*Picea abies* Karst.) in der Schweiz nördlich der Alpen: Untersuchungen über das Schadenausmass, die ökologischen, waldbaulichen und mykologischen Einflussfaktoren sowie die ökonomischen Auswirkungen. *Beih. Nr. 79 Schweiz. Z. Forstwes.* 283 S.
- Huber, R., Bally, B., Knecht, M., Förderer, L. (1996): Untersuchungen zu Ausmass und Ursachen der Stammfäule im Bündner Gebirgswald. *Bündnerwald* 4: 57-62.
- Kató, F. (1967): Beitrag zur Beurteilung einzelner schwerwiegender Probleme der Fichten-Rotfäule. *Forstw. Cbl.* 86: 348-367.
- Maloy, O. C. (1974): Benomyl-malt agar for the purification of cultures of wood decay fungi. *Plant Disease Reports* 58: 902-904.
- Oliva, J., Romeralo, C. & Stenlid, J. (2011): Accuracy of the Rotfinder instrument in detecting decay on Norway spruce trees. *Forest Ecology and Management* 262: 1378-1386.
- Pape, R. (1999): Influence of Thinning and Tree Diameter Class on the Development of Basic Density and Annual Ring Width in *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14: 27-37.
- Prospero, S., Holdenrieder, O., Rigling, D. (2003): Primary resource capture in two sympatric *Armillaria* species in managed Norway spruce forests. *Mycol. Res.* 107 (3): 329-338.
- Rigling, D. (2005): Kap. 2.4: Wie wirken sich Fäulebefall an Stamm und Wurzeln auf die Sturmempfindlichkeit aus und welche Erreger sind beteiligt? in: Indermühle, M., Raetz, P., Volz, R. 2005: *LOTHAR. Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramms 6.* Umwelt-Materialien Nr. 184. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 145 S.
- Vasiliauskas, R., Stenlid, J. (1998): Influence of spatial scale on population structure of *Stereum sanguinolentum* in Northern Europe. *Mycological Research* 102(1): 93-98.
- Wunder, J., Manusch, C., Queloz, V., Brang, P., Ringwald, V. & Bugmann, H. (2013): Does increment coring enhance tree decay? New insights from tomography assessments. *Canadian Journal of Forest Research* 43: 711-718.

Anhang I

Fäuleabschätzungen pro Baum

Tab I: Im vorgestellten Projekt wurden zwei Messgeräte vergleichend analysiert, einerseits der PiCUS Schall- und Widerstandstomograph, andererseits der Rotfinder „Kernfäule-Schnelltest“. Hier dargestellt werden die erhaltenen Resultate pro Baum, geordnet nach Untersuchungsgebieten. Die Stammquerschnitte sind jeweils nach Norden ausgerichtet und die einzelnen Bäume pro Standort nach zunehmendem Brusthöhendurchmesser geordnet.

Bild links: PiCUS Schalltomogramm. Schallgeschwindigkeiten sind abhängig von Elastizitätsmodul und Dichte des Holzes. Hohe Schallgeschwindigkeiten deuten auf gesundes Holz hin (braun), wohingegen kernfaules Holz zu relativ geringen Schallgeschwindigkeiten führt (violett und blau). Intaktheitswerte: Die grüne Zahl entspricht dem so bestimmten prozentualen Anteil von gesundem Holz, die rote Zahl stellt den beschädigten Teil dar.

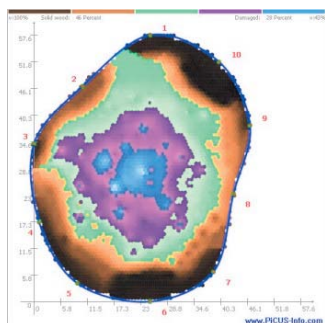
Bild mitte links: PiCUS Widerstandstomogramm. Widerstandswerte sind abhängig von Wassergehalt, Zellstruktur und chemischer Zusammensetzung. Gesundes Holz ist relativ trocken und führt zu hohen Widerstandswerten (rot), kernfaules Holz reduziert den Widerstand (blau). In gesunden Bäumen ist das „rote“ Kernholz von „blauem“ Splintholz umgeben, Kernfäule führt zu einem „umgekehrten“ Bild (Farbskala stellt relative Widerstandswerte pro Baum dar).

Bild mitte rechts: Stammquerschnitt der gefällten Fichte. „SG“ steht für „Schadengrade nach Graber“, ermittelt nach der beschriebenen Methode (Kapitel 2.2).

Angaben rechts: Der oberste Wert wurde mit dem Widerstandsmessgerät Rotfinder bestimmt (Maximalwert 30780). Eine rote Box entspricht dabei einem Wert von < 9285, blau sind Werte > 9285 (siehe 3.5 Analyse der Messgeräte). In der Mitte befindet sich die Einschätzung der zuständigen Förster („KF“ steht für „Kernfäule“). Der unterste Wert (BHD) ist der Brusthöhendurchmesser der Fichte.

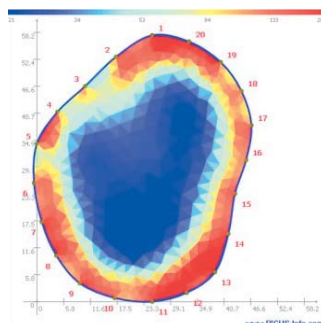
Breil – Sut Plaun Grond (1550 m ü. M.)

Baum 2.1



46 %

28 %



SG: 447.94 ‰

Rotfinder

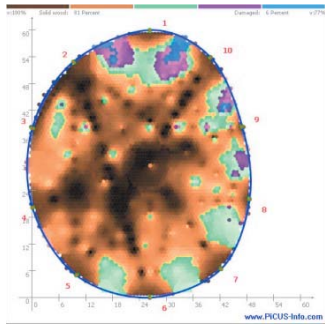
5480

Förster

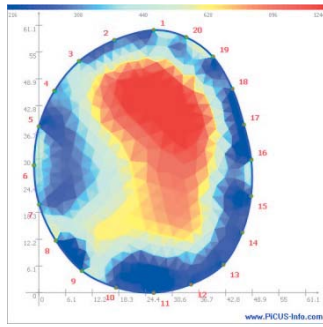
keine KF

BHD: 47 cm

Baum 2.2



81 % 6 %



SG: 4.80 %

Rotfinder

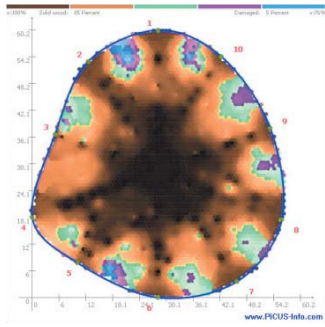
25855

Förster

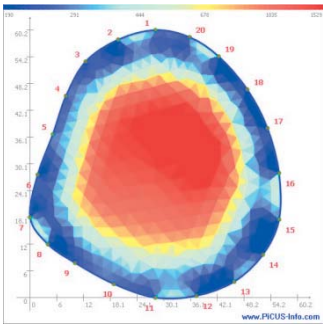
keine KF

BHD: 53 cm

Baum 2.5



85 % 5 %



SG: 0.40 %

Rotfinder

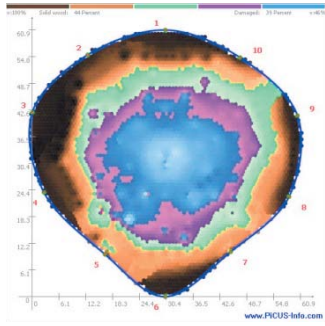
29302

Förster

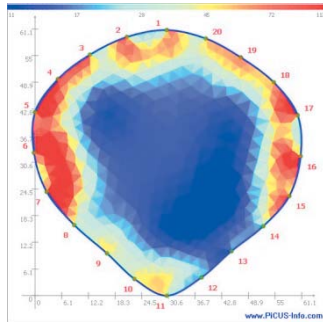
keine KF

BHD: 53 cm

Baum 2.9



44 % 39 %



SG: 405.15 %

Rotfinder

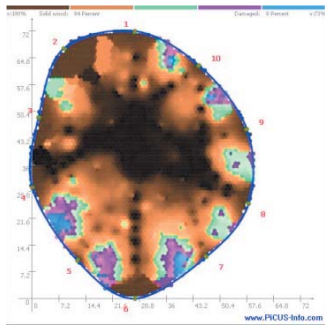
3671

Förster

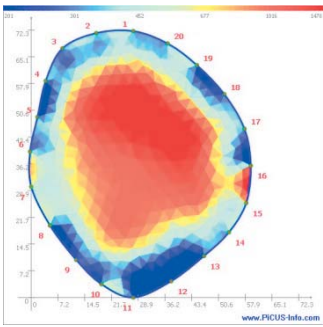
mittlere KF

BHD: 54 cm

Baum 2.6



84 % 8 %



SG: 0 %

Rotfinder

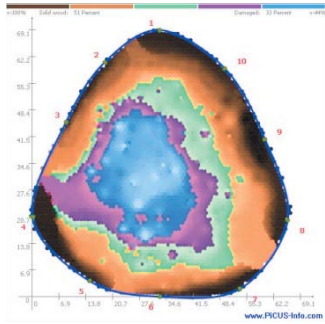
30780

Förster

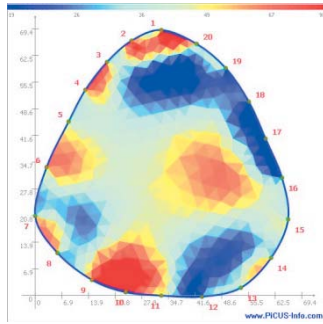
keine KF

BHD: 59 cm

Baum 2.7



51 % 33 %

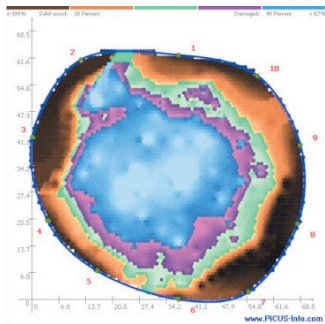


SG: 612.38 ‰

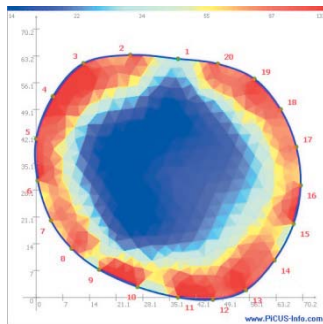
Rotfinder
8797
Förster
keine KF

BHD: 59 cm

Baum 2.8



38 % 49 %

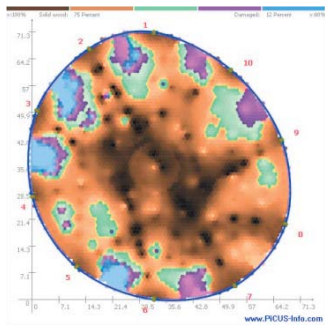


SG: 258.77 ‰

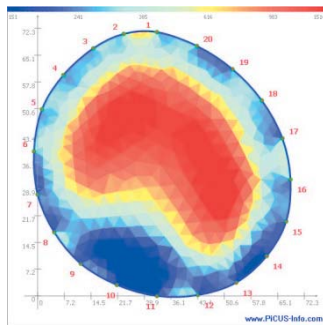
Rotfinder
4692
Förster
geringe KF

BHD: 64 cm

Baum 2.4



75 % 12 %

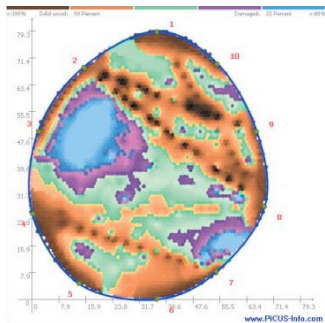


SG: 12.20 ‰

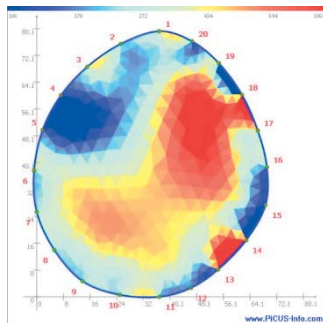
Rotfinder
19237
Förster
geringe KF

BHD: 67 cm

Baum 2.10



50 % 23 %

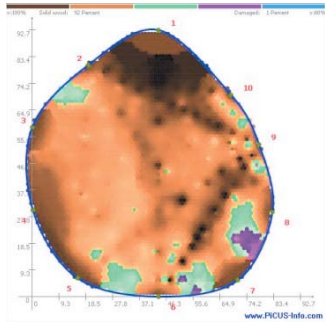


SG: 6.56 ‰

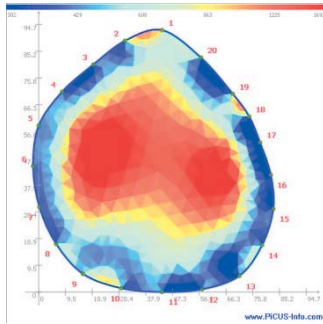
Rotfinder
24952
Förster
geringe KF

BHD: 70 cm

Baum 2.3



91 % 1 %



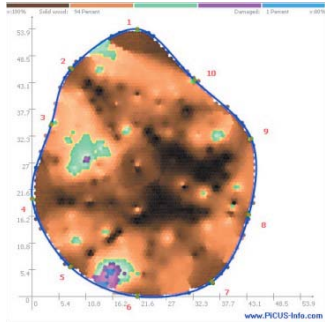
SG: 2.31 %

Rotfinder
30780
Förster
mittlere KF

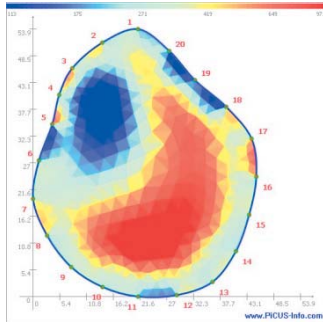
BHD: 89 cm

Breil – Uaul Bacun (970 m ü. M.)

Baum 3.8



94 % 1 %

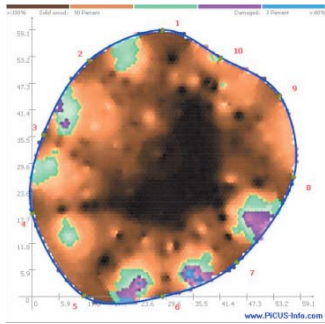


SG: 9.35 %

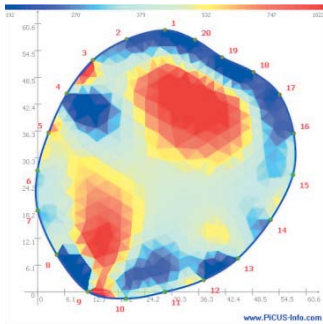
Rotfinder
18297
Förster
keine KF

BHD: 46 cm

Baum 3.1



90 % 3 %

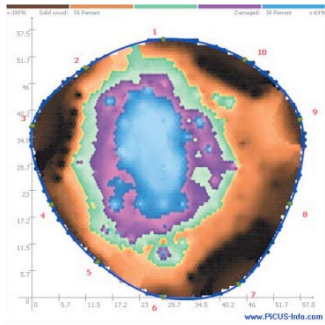


SG: 1.00 %

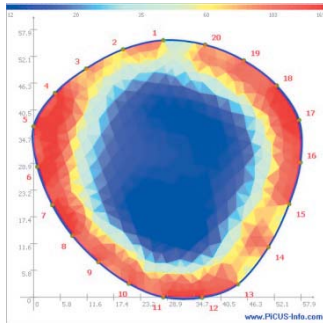
Rotfinder
30780
Förster
geringe KF

BHD: 53 cm

Baum 3.6



56 % 30 %

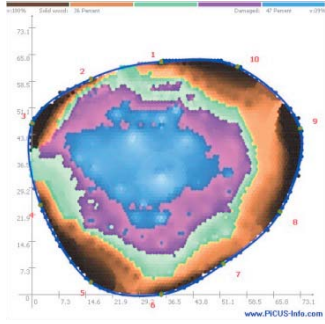


SG: 311.10 %

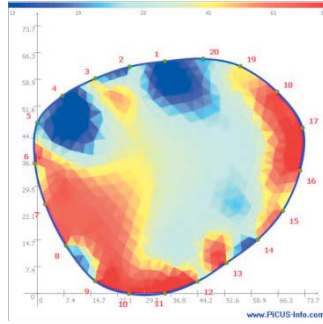
Rotfinder
3139
Förster
geringe KF

BHD: 53 cm

Baum 3.9



36 % 47 %



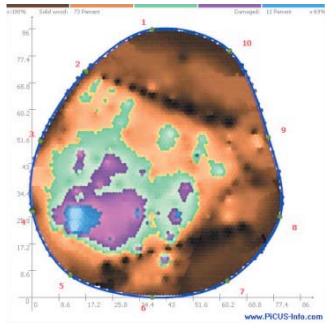
SG: 388.05 %

Rotfinder
2277

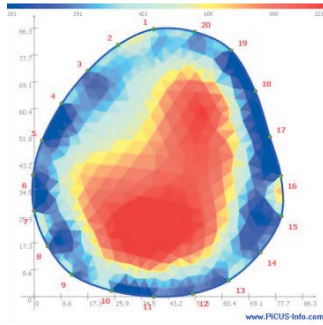
Förster
starke KF

BHD: 58 cm

Baum 3.4



73 % 11 %



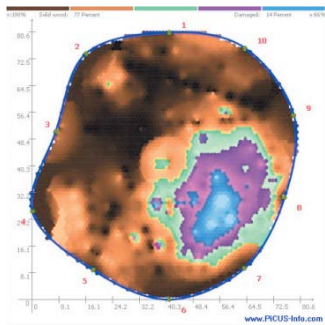
SG: 7.71 %

Rotfinder
30780

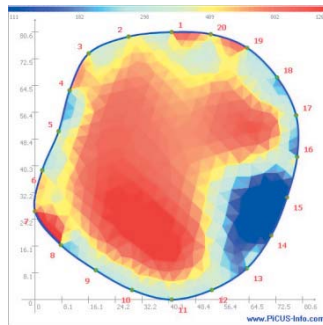
Förster
mittlere KF

BHD: 77 cm

Baum 3.5



77 % 14 %



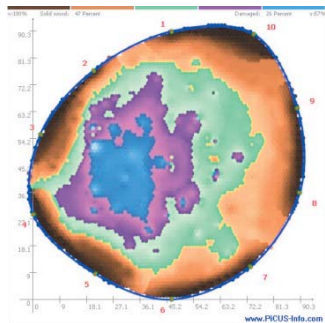
SG: 101.43 %

Rotfinder
30780

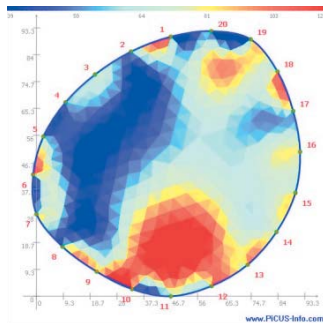
Förster
starke KF

BHD: 77 cm

Baum 3.10



47 % 26 %



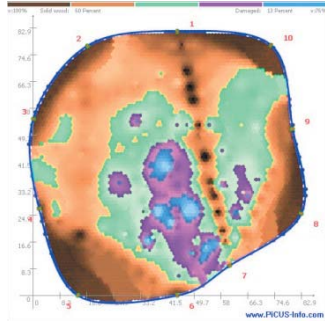
SG: 205.40 %

Rotfinder
5034

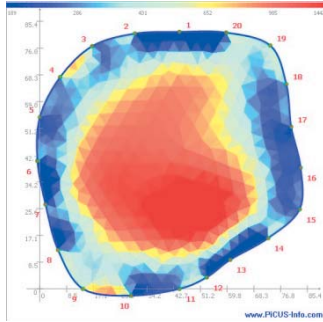
Förster
starke KF

BHD: 83 cm

Baum 3.3



47 % 26 %

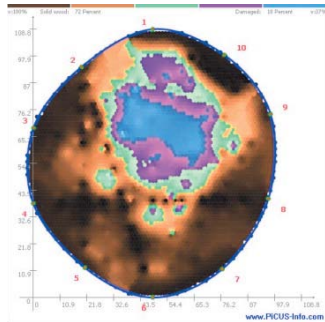


SG: 0.40 ‰

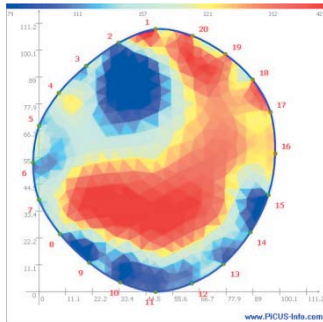
Rotfinder
30780
Förster
geringe KF

BHD: 87 cm

Baum 3.7



72 % 18 %

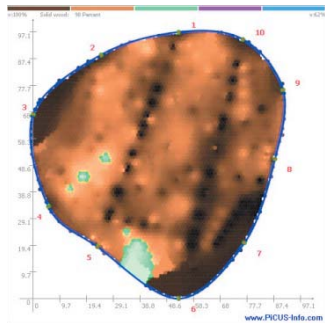


SG: 108.18 ‰

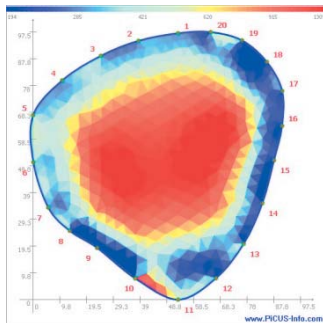
Rotfinder
8536
Förster
mittlere KF

BHD: 93 cm

Baum 3.2



98 % 0 %



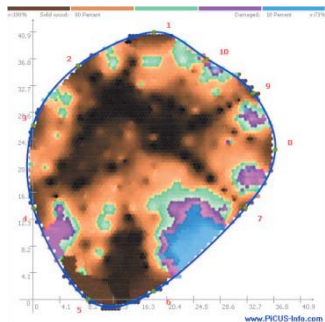
SG: 0.00 ‰

Rotfinder
30205
Förster
keine KF

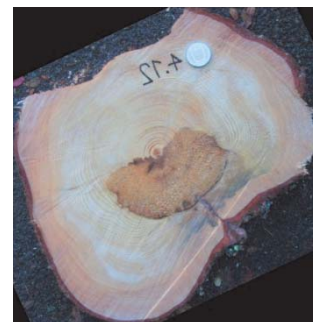
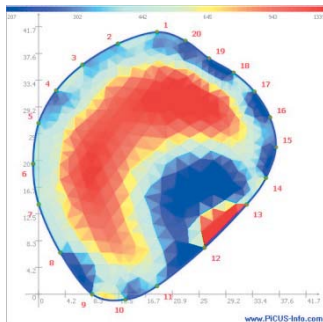
BHD: 94 cm

Obersaxen - Zavragia (1610 m ü. M.)

Baum 4.12



80 % 10 %

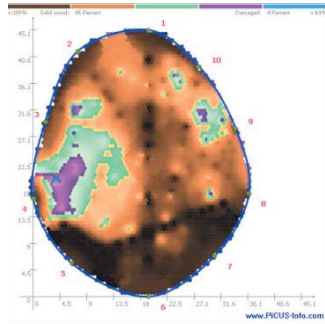


SG: 20.48 ‰

Rotfinder
22763
Förster
fehlt

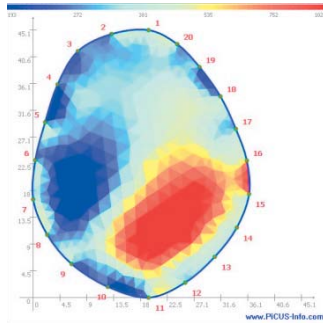
BHD: 33 cm

Baum 4.9



85 %

4 %

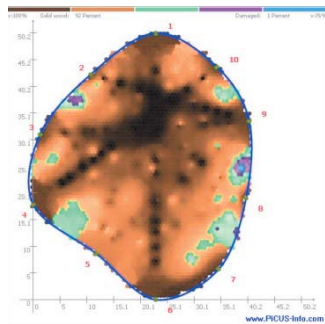


SG: 147.54 %

Rotfinder
16344
Förster
fehlt

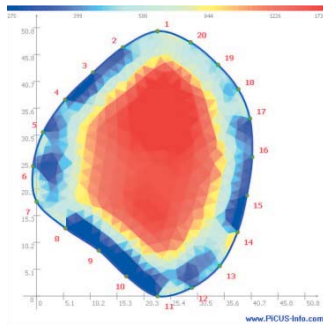
BHD: 42 cm

Baum 4.11



92 %

1 %

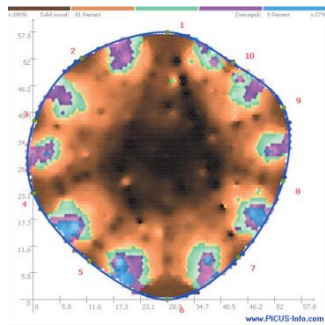


SG: 2.93 %

Rotfinder
27702
Förster
fehlt

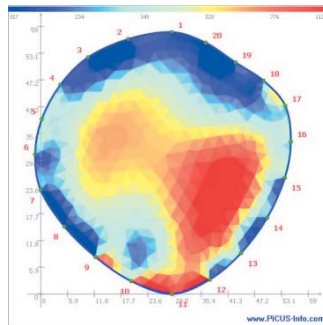
BHD: 42 cm

Baum 4.10



81 %

9 %

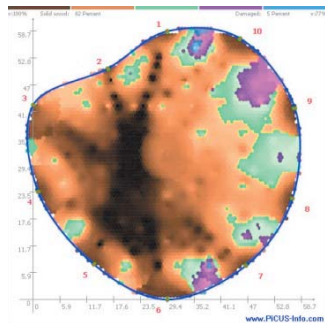


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
21915
Förster
fehlt

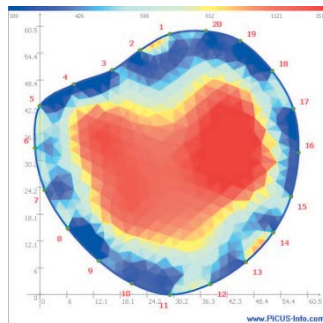
BHD: 53 cm

Baum 4.6



82 %

5 %

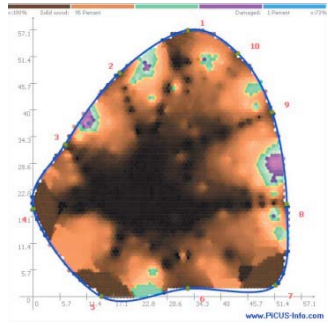


SG: 5.90 %

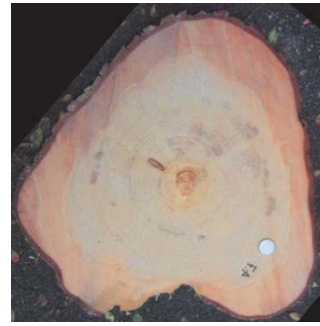
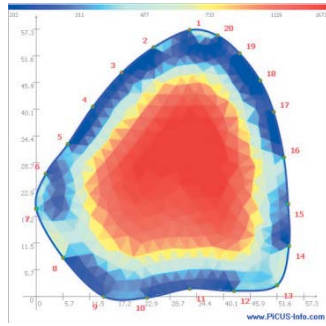
Rotfinder
30780
Förster
fehlt

BHD: 54 cm

Baum 4.7



95 % 1 %



Rotfinder

29795

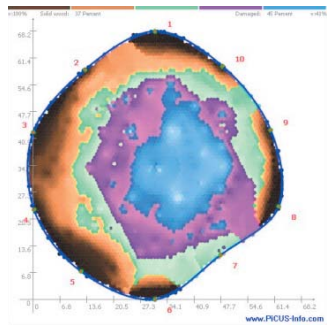
Förster

fehlt

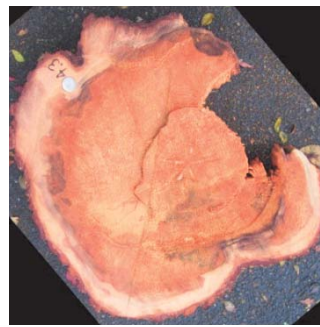
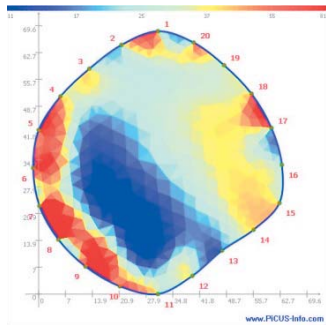
BHD: 54 cm

SG: 4.34 %

Baum 4.3



37 % 45 %



Rotfinder

2166

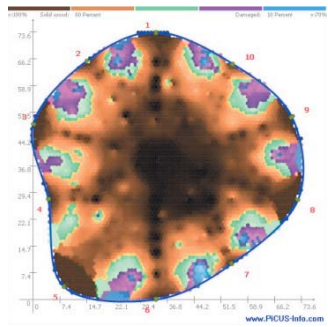
Förster

fehlt

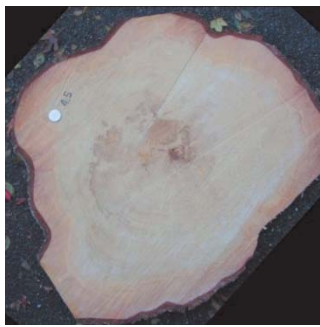
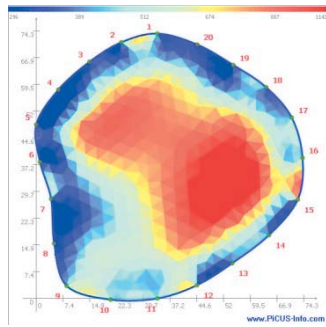
BHD: 60 cm

SG: 180.52 %

Baum 4.5



80 % 10 %



Rotfinder

30780

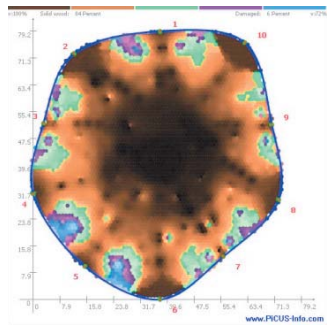
Förster

fehlt

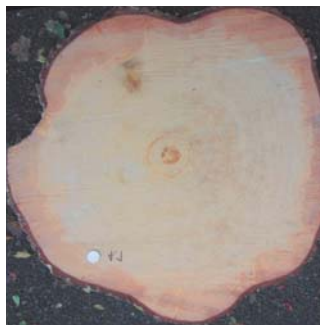
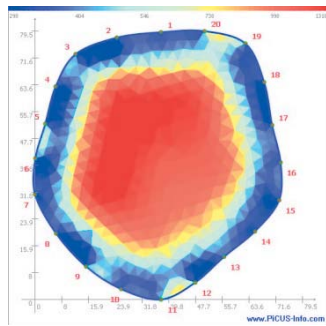
BHD: 67 cm

SG: 8.85 %

Baum 4.1



84 % 6 %



Rotfinder

30780

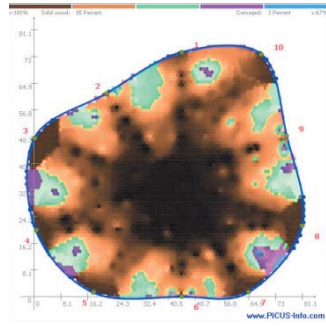
Förster

fehlt

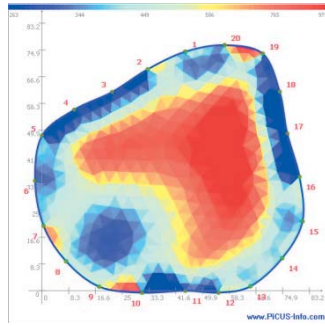
BHD: 69 cm

SG: 1.22 %

Baum 4.4



85 % 3 %



SG: 4.36 %

Rotfinder

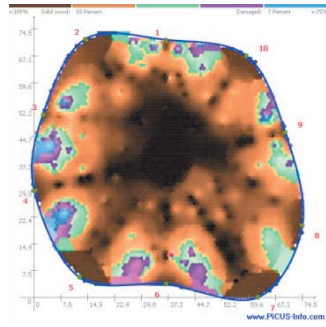
30780

Förster

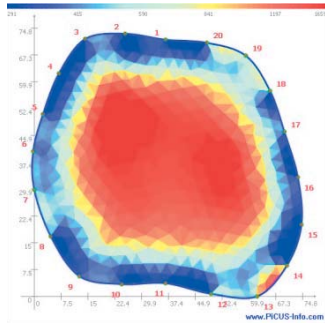
fehlt

BHD: 74 cm

Baum 4.2



83 % 7 %



SG: 0.00 %

Rotfinder

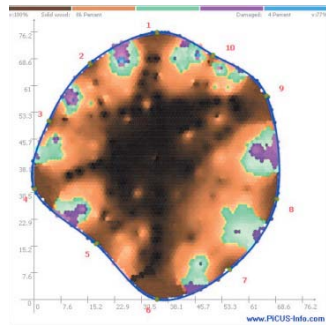
30780

Förster

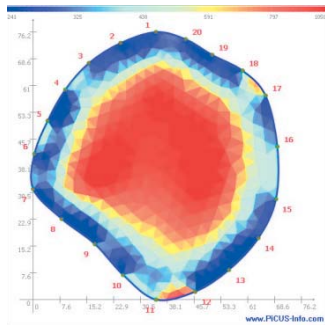
fehlt

BHD: 77 cm

Baum 4.8



86 % 4 %



SG: 0.79 %

Rotfinder

30780

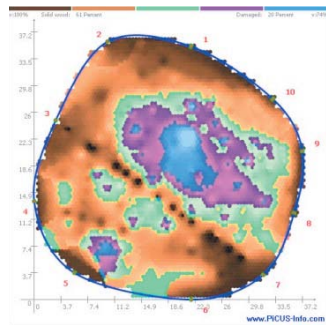
Förster

fehlt

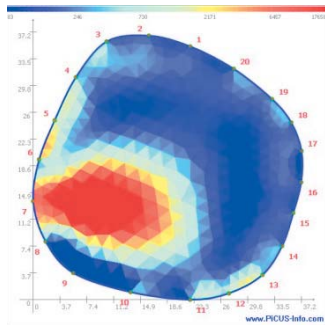
BHD: 88 cm

Trun – Sur Seivs (1650 m ü. M.)

Baum 5.5



61 % 20 %



SG: 95.14 %

Rotfinder

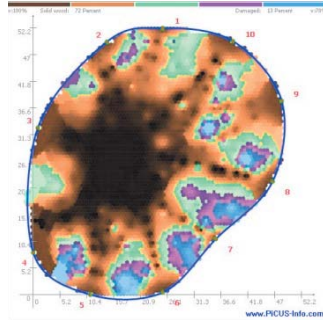
9740

Förster

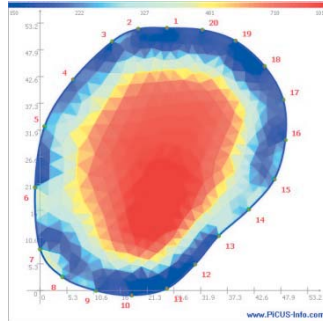
mittlere KF

BHD: 36 cm

Baum 5.10



72 % 13 %

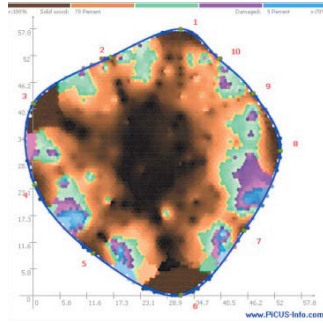


SG: 0.00 ‰

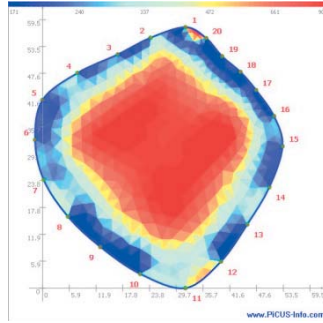
Rotfinder
12828
Förster
geringe KF

BHD: 48 cm

Baum 5.3



78 % 9 %

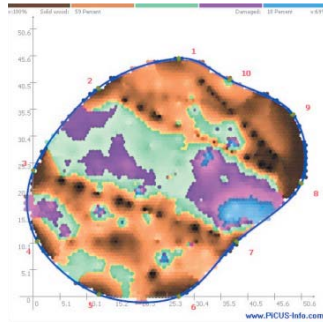


SG: 0.00 ‰

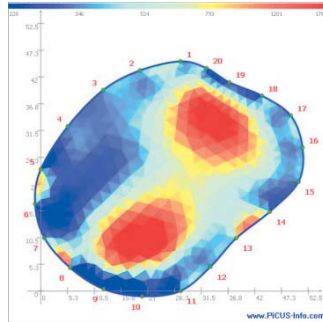
Rotfinder
19452
Förster
geringe KF

BHD: 49 cm

Baum 5.4



59 % 18 %

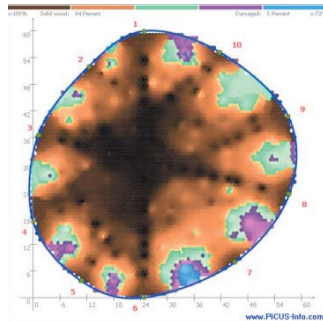


SG: 8.51 ‰

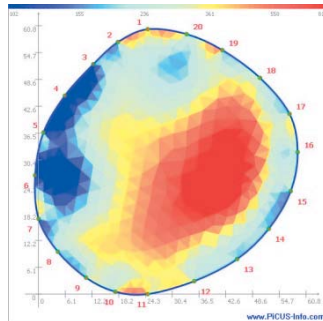
Rotfinder
27873
Förster
mittlere KF

BHD: 51 cm

Baum 5.2



84 % 5 %

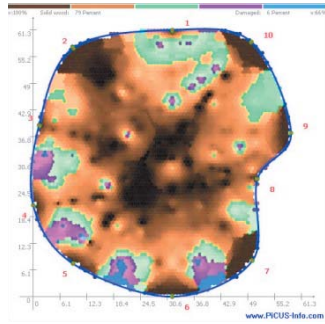


SG: 0.00 ‰

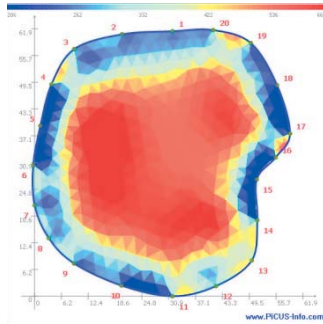
Rotfinder
13296
Förster
geringe KF

BHD: 56 cm

Baum 5.9



79 % 6 %



SG: 0.00 %

Rotfinder

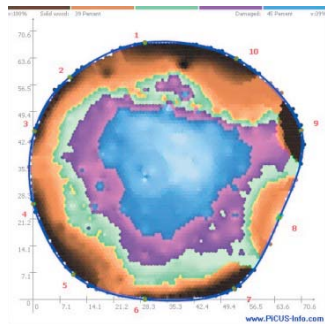
16472

Förster

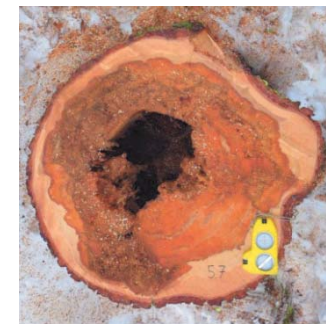
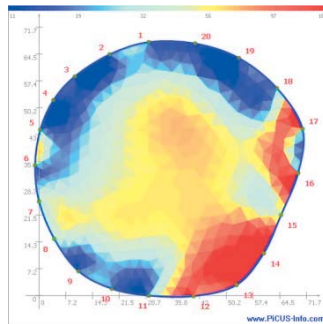
keine KF

BHD: 60 cm

Baum 5.7



39 % 45 %



SG: 608.62 %

Rotfinder

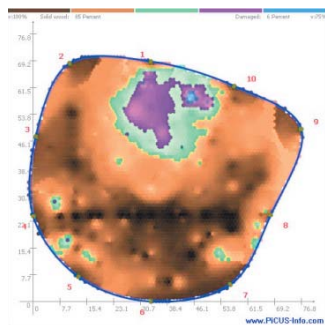
5386

Förster

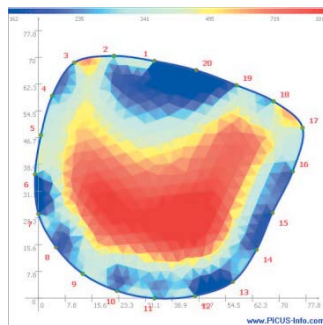
starke KF

BHD: 63 cm

Baum 5.6



85 % 6 %



SG: 13.93 %

Rotfinder

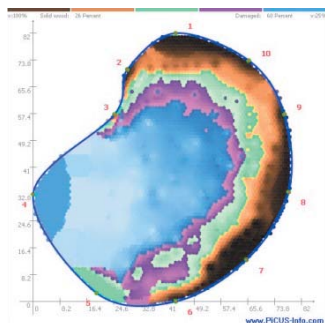
30780

Förster

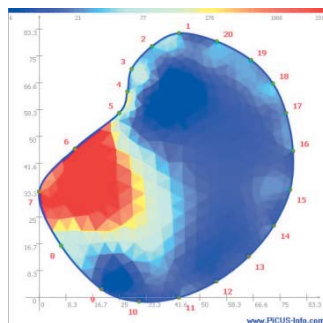
starke KF

BHD: 71 cm

Baum 5.8



26 % 60 %



SG: 469.24 %

Rotfinder

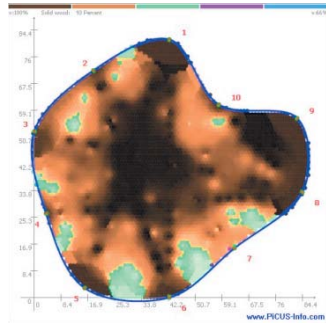
2079

Förster

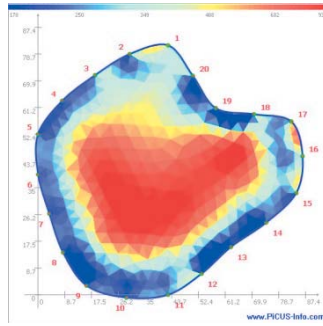
starke KF

BHD: 75 cm

Baum 5.1



93 % 0 %



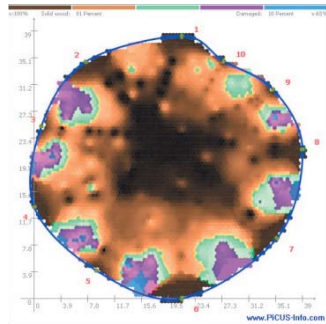
SG: 4.90 ‰

Rotfinder
23639
Förster
mittlere KF

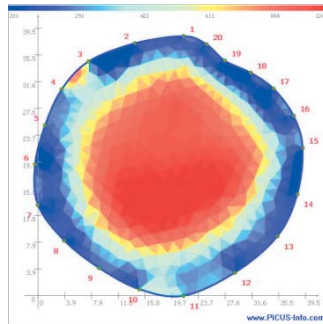
BHD: 78 cm

Trun - Preuls (1570 m ü. M.)

Baum 6.2



81 % 10 %

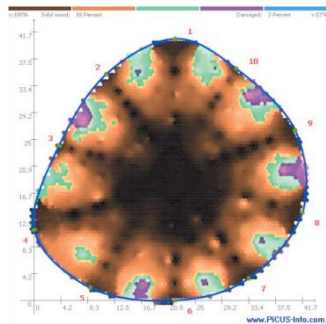


SG: 0.00 ‰

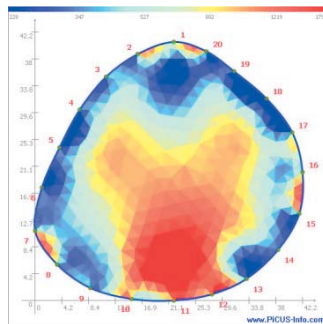
Rotfinder
13789
Förster
keine KF

BHD: 35 cm

Baum 6.8



88 % 3 %

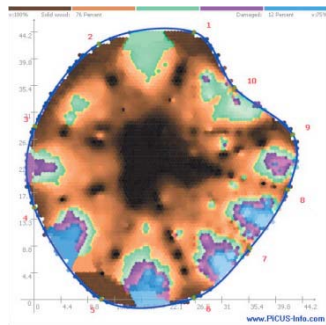


SG: 0.00 ‰

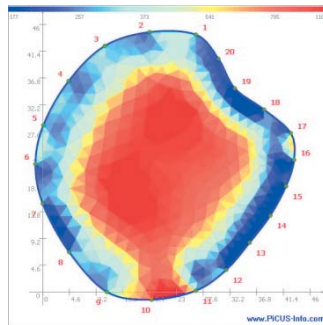
Rotfinder
21884
Förster
geringe KF

BHD: 38 cm

Baum 6.5



76 % 12 %

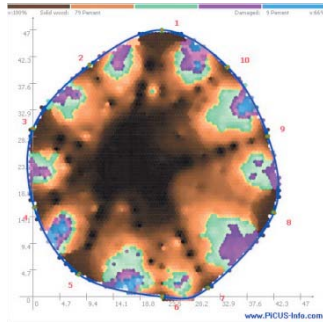


SG: 0.00 ‰

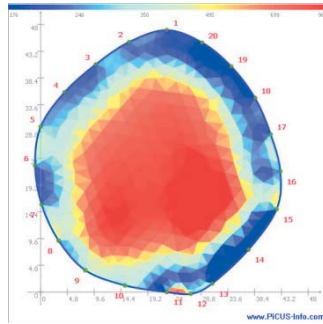
Rotfinder
21607
Förster
keine KF

BHD: 39 cm

Baum 6.6



79 % 9 %

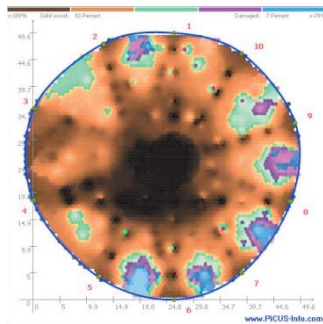


SG: 4.90 %

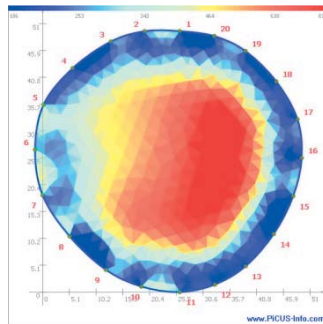
Rotfinder
14266
Förster
geringe KF

BHD: 41 cm

Baum 6.7



83 % 7 %

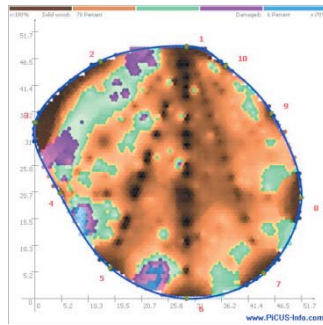


SG: 0.00 %

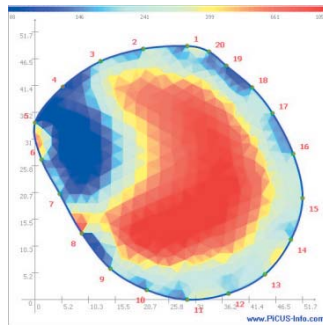
Rotfinder
23380
Förster
keine KF

BHD: 45 cm

Baum 6.1



78 % 6 %

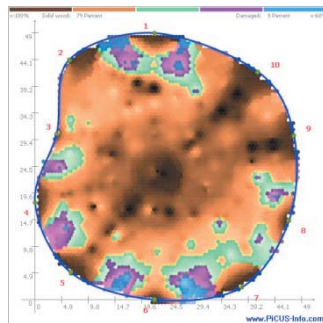


SG: 15.00 %

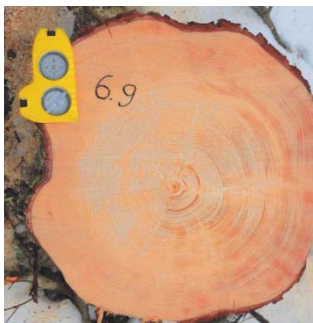
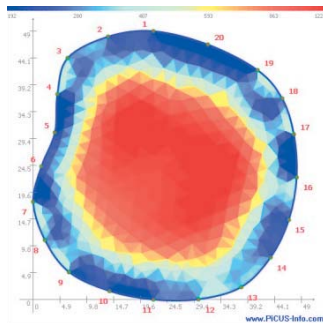
Rotfinder
6723
Förster
mittlere KF

BHD: 46 cm

Baum 6.9



79 % 9 %

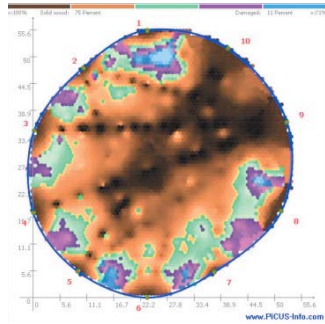


SG: 0.00 %

Rotfinder
19152
Förster
geringe KF

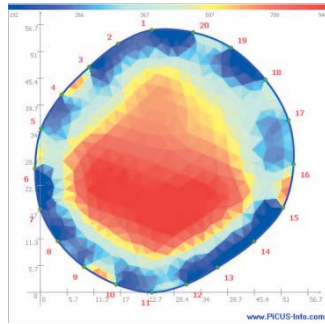
BHD: 47 cm

Baum 6.11



75 %

11 %

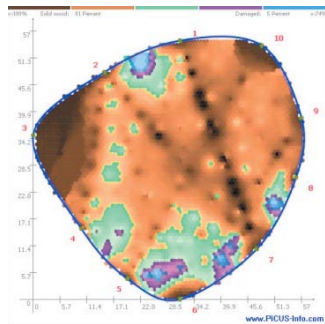


SG: 0.00 %

Rotfinder
14267
Förster
keine KF

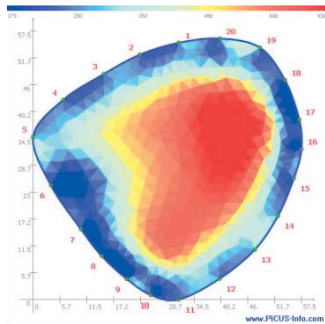
BHD: 50 cm

Baum 6.10



81 %

5 %

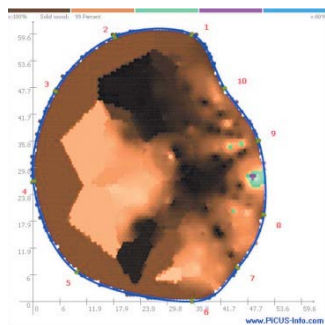


SG: 3.13 %

Rotfinder
25855
Förster
mittlere KF

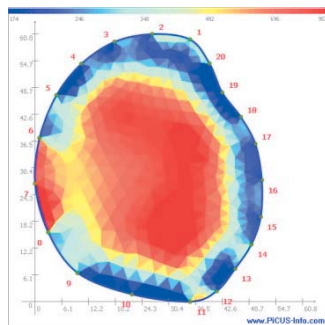
BHD: 51 cm

Baum 6.4



99 %

0 %

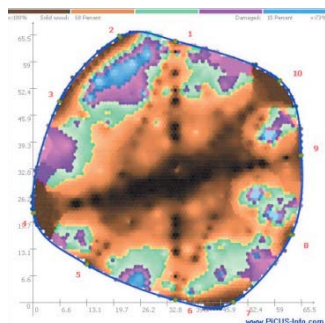


SG: 2.77 %

Rotfinder
25116
Förster
geringe KF

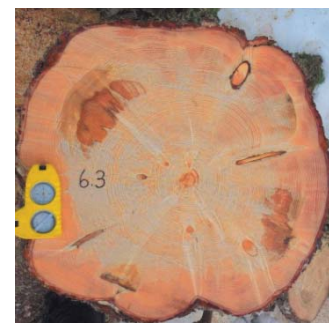
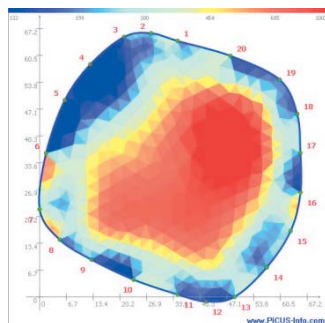
BHD: 53 cm

Baum 6.3



68 %

15 %



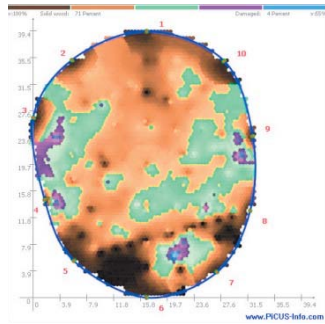
SG: 8.80 %

Rotfinder
17093
Förster
mittlere KF

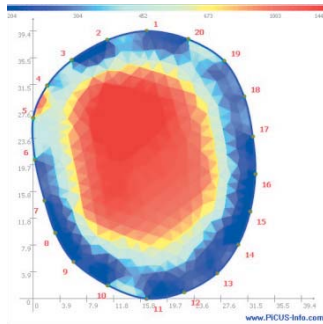
BHD: 60 cm

Vals – Grosscher (1560 m ü. M.)

Baum 8.9



71 % 4 %

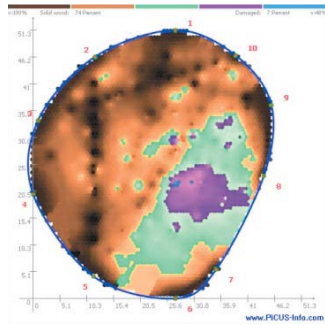


SG: 0.00 %

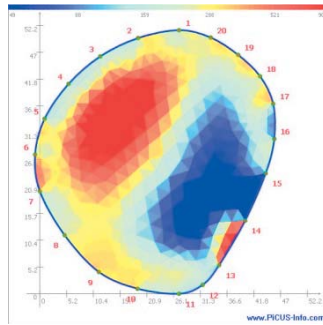
Rotfinder
18057
Förster
keine KF

BHD: 35 cm

Baum 8.11



74 % 4 %

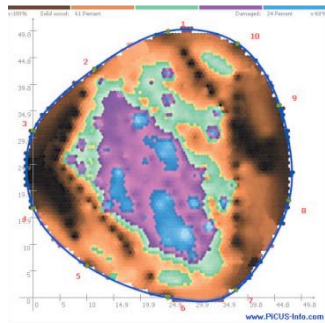


SG: 48.49 %

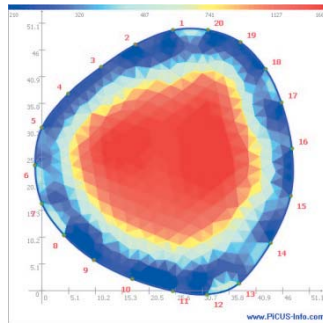
Rotfinder
14364
Förster
starke KF

BHD: 46 cm

Baum 8.10



61 % 24 %

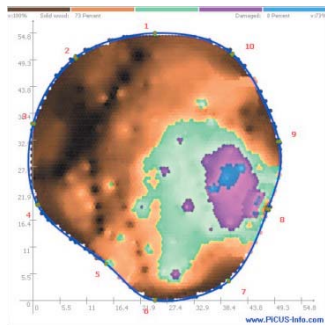


SG: 0.00 %

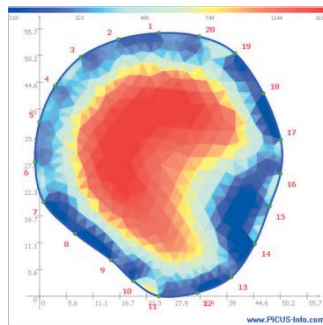
Rotfinder
18810
Förster
keine KF

BHD: 48 cm

Baum 8.7



73 % 8 %

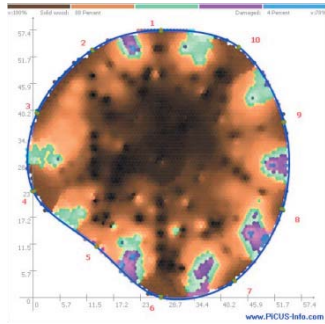


SG: 111.71 %

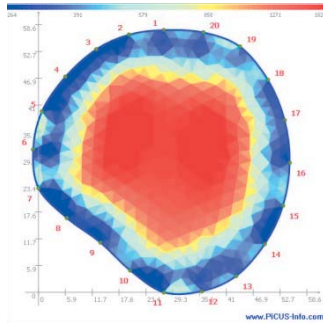
Rotfinder
27519
Förster
geringe KF

BHD: 50 cm

Baum 8.6



88 % 4 %

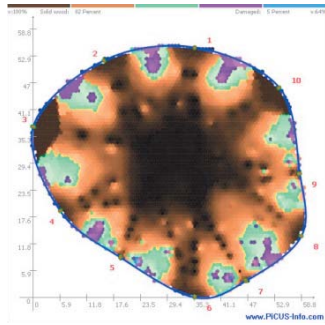


SG: 0.00 %

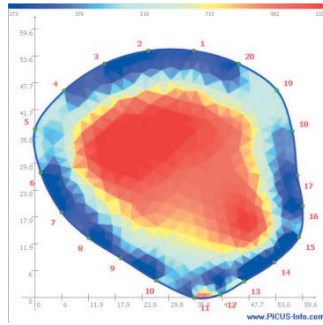
Rotfinder
30780
Förster
keine KF

BHD: 52 cm

Baum 8.3



82 % 5 %

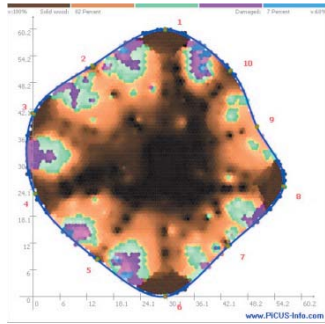


SG: 0.00 %

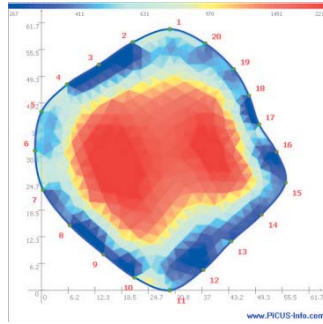
Rotfinder
30780
Förster
geringe KF

BHD: 53 cm

Baum 8.4



82 % 7 %

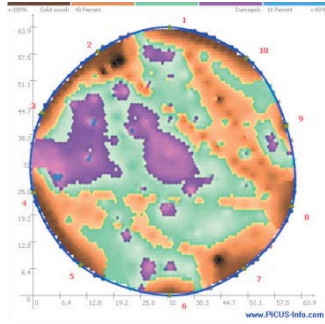


SG: 0.00 %

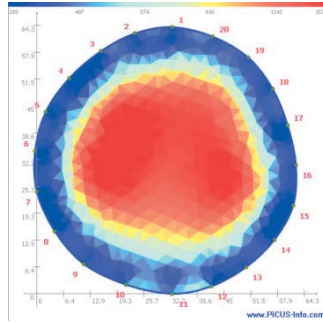
Rotfinder
29302
Förster
geringe KF

BHD: 54 cm

Baum 8.1



43 % 18 %

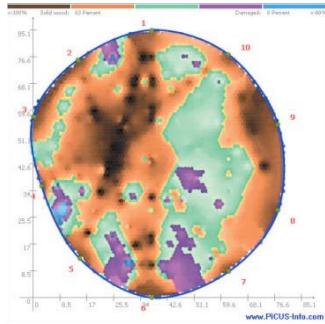


SG: 0.75 %

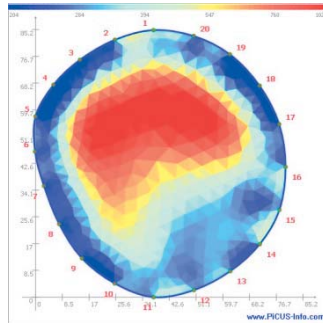
Rotfinder
30780
Förster
keine KF

BHD: 57 cm

Baum 8.8



63 % 8 %

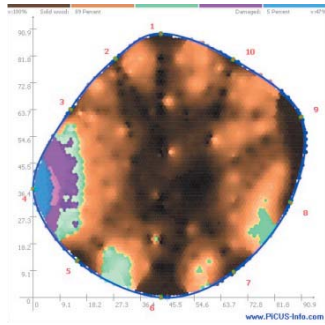


SG: 4.97 ‰

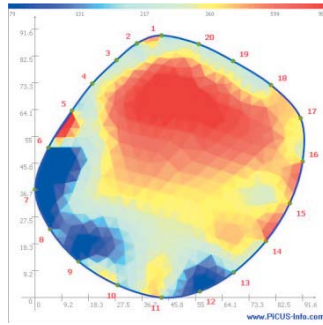
Rotfinder
27578
Förster
geringe KF

BHD: 79 cm

Baum 8.2



89 % 5 %

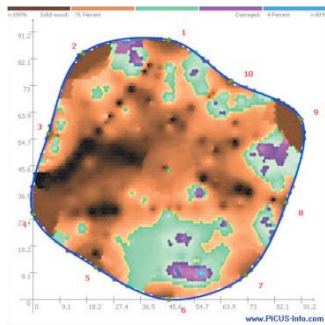


SG: 51.57 ‰

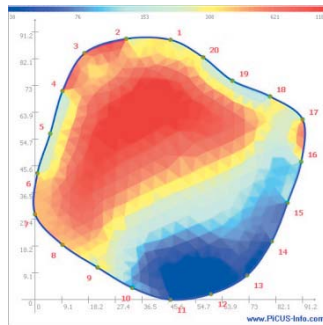
Rotfinder
30780
Förster
mittlere KF

BHD: 89 cm

Baum 8.5



76 % 4 %



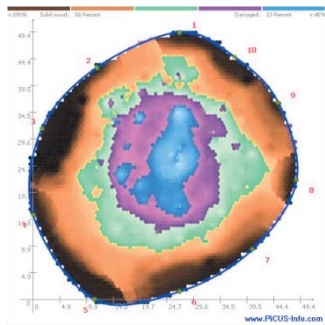
SG: 85.58 ‰

Rotfinder
7004
Förster
keine KF

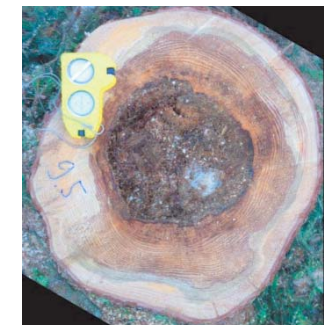
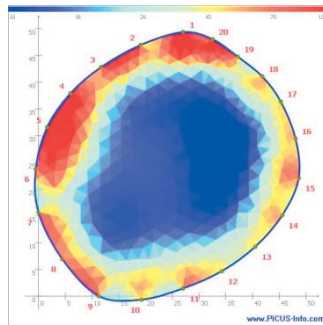
BHD: 91 cm

Safiental – Birchegga (1130 m ü. M.)

Baum 9.5



58 % 23 %

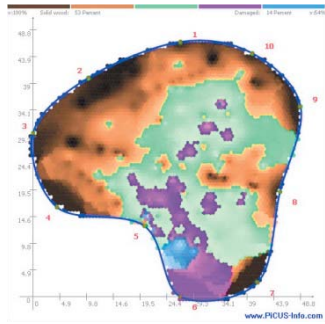


SG: 340.00 ‰

Rotfinder
3505
Förster
keine KF

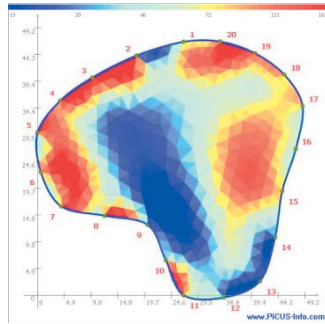
BHD: 42 cm

Baum 9.10



53 %

14 %

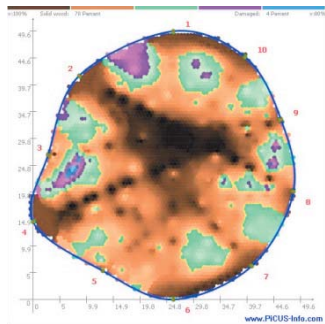


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
2522
Förster
mittlere KF

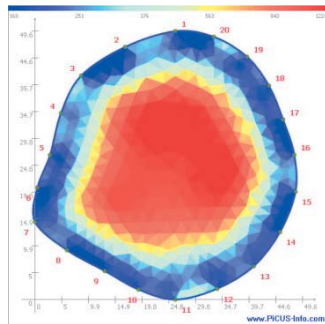
BHD: 44 cm

Baum 9.9



78 %

4 %

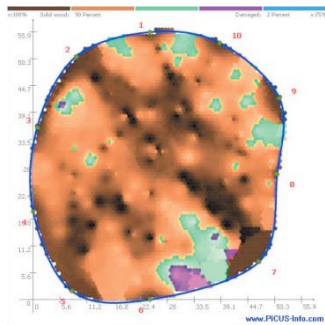


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
15048
Förster
geringe KF

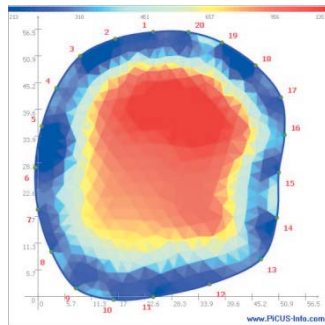
BHD: 46 cm

Baum 9.6



90 %

4 %

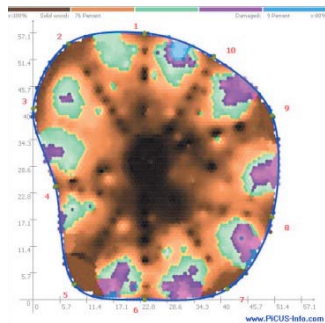


SG: 0.00 %

Rotfinder
27332
Förster
mittlere KF

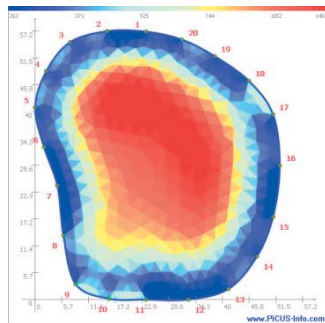
BHD: 52 cm

Baum 9.3



76 %

9 %

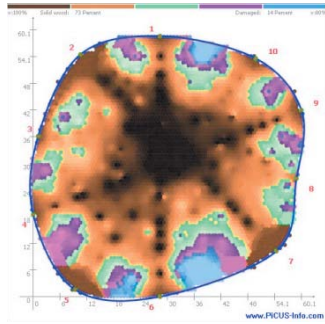


SG: 0.00 %

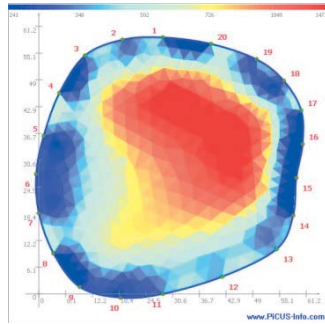
Rotfinder
30780
Förster
geringe KF

BHD: 53 cm

Baum 9.7



73 % 14 %

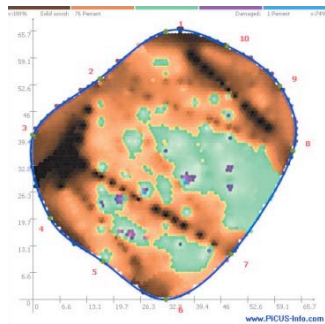


SG: 0.00 %

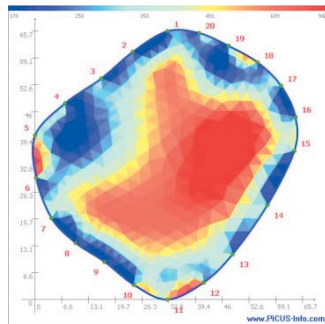
Rotfinder
29187
Förster
geringe KF

BHD: 54 cm

Baum 9.2



76 % 1 %

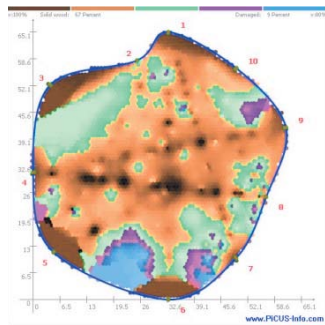


SG: 2.96 %

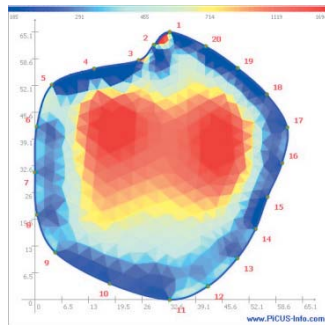
Rotfinder
30054
Förster
starke KF

BHD: 55 cm

Baum 9.4



67 % 9 %

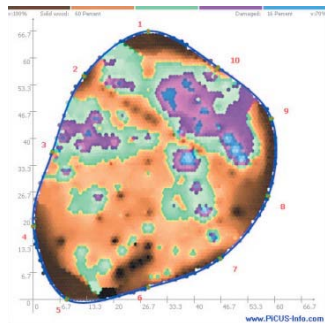


SG: 1.36 %

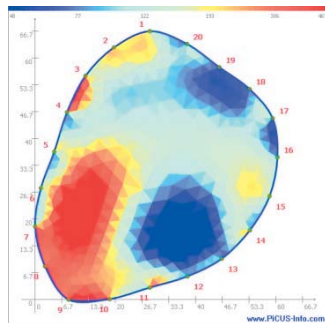
Rotfinder
27165
Förster
mittlere KF

BHD: 55 cm

Baum 9.11



60 % 16 %

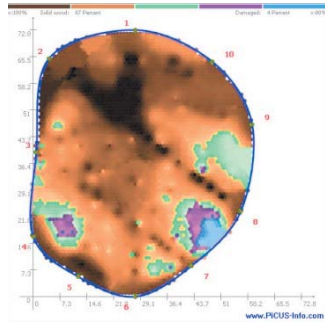


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
20437
Förster
mittlere KF

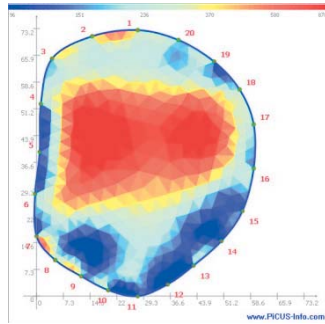
BHD: 58 cm

Baum 9.8



87 %

4 %



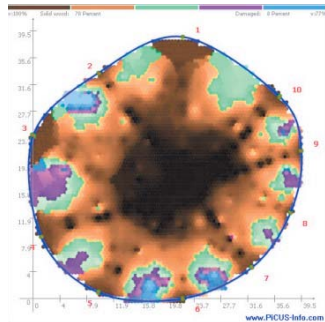
SG: 46.05 ‰

Rotfinder
18768
Förster
mittlere KF

BHD: 62 cm

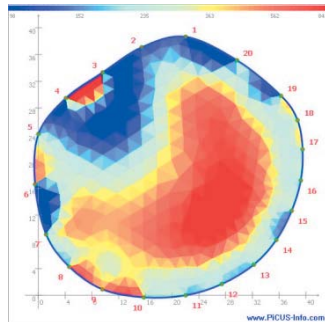
Laax – Uaul dils Runs (1230 m ü. M.)

Baum 1.3



78 %

8 %

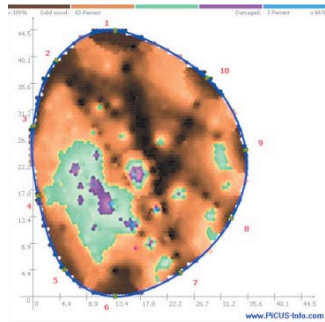


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
13461
Förster
starke KF

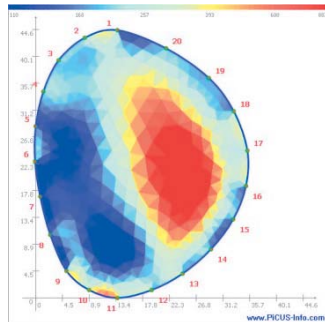
BHD: 36 cm

Baum 1.2



83 %

3 %

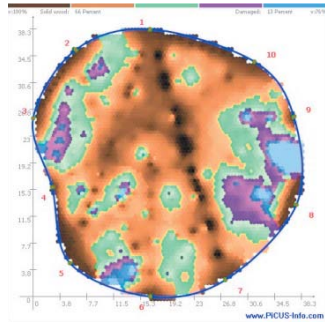


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
6128
Förster
starke KF

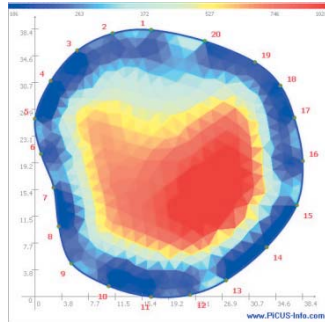
BHD: 37 cm

Baum 1.10



66 %

13 %

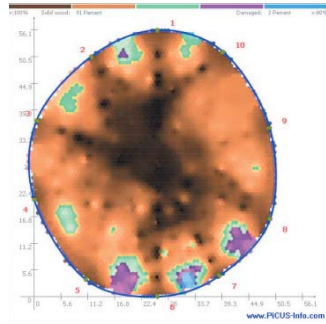


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
10287
Förster
keine KF

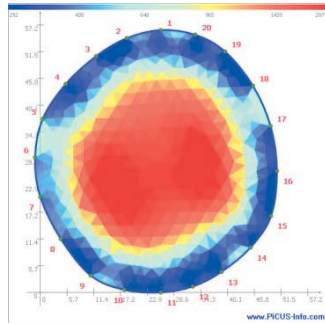
BHD: 37 cm

Baum 1.8



91 %

3 %

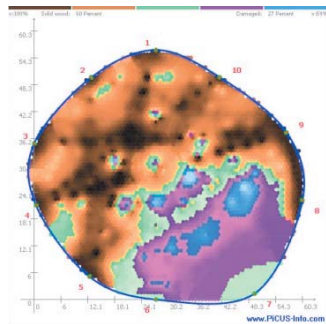


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
30780
Förster
keine KF

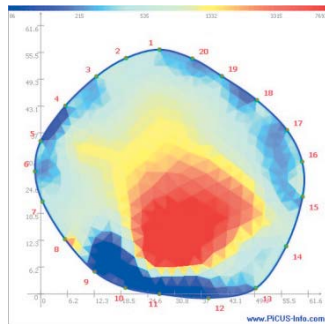
BHD: 51 cm

Baum 1.7



60 %

27 %

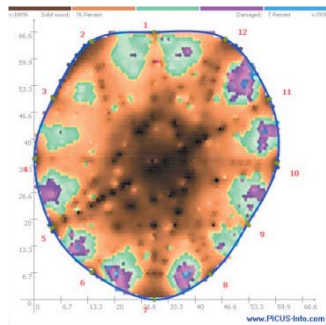


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
30780
Förster
geringe KF

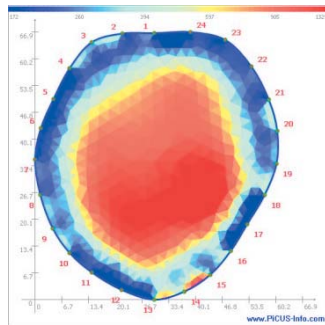
BHD: 59 cm

Baum 1.1



76 %

7 %

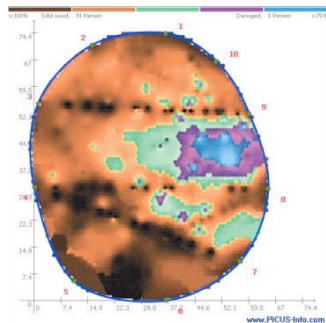


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
30780
Förster
mittlere KF

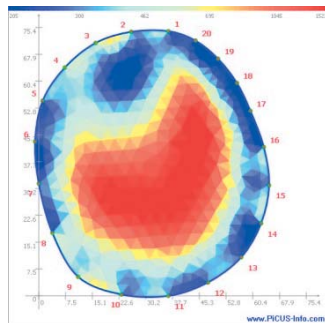
BHD: 61 cm

Baum 1.5



81 %

8 %

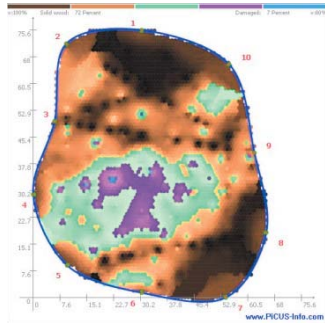


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
30780
Förster
keine KF

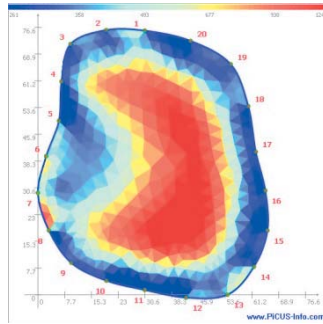
BHD: 69 cm

Baum 1.6



72 %

7 %

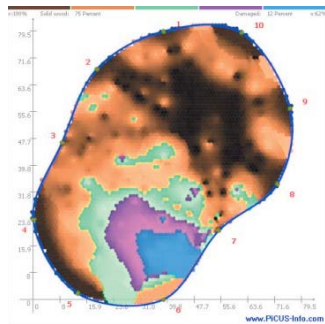


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
30780
Förster
starke KF

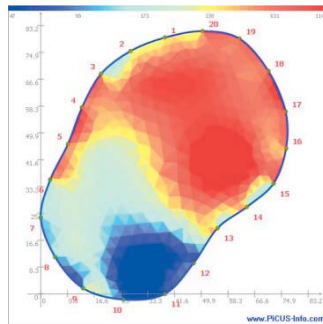
BHD: 71 cm

Baum 1.9



75 %

12 %



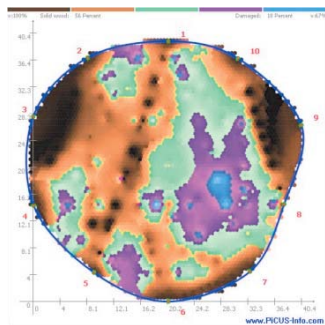
Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
30780
Förster
geringe KF

BHD: 92 cm

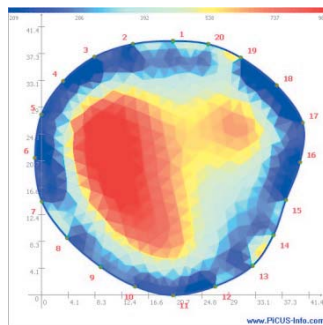
Ruschein – Sut Alp Dado (1520 m ü. M.)

Baum 7.2



56 %

18 %

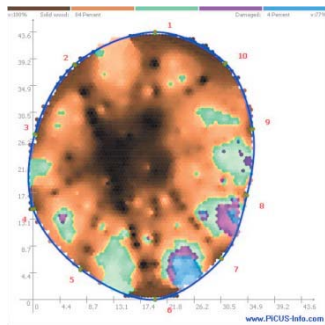


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
12695
Förster
fehlt

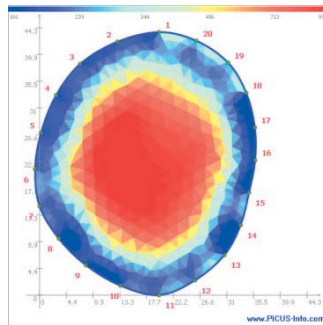
BHD: 36 cm

Baum 7.5



84 %

4 %

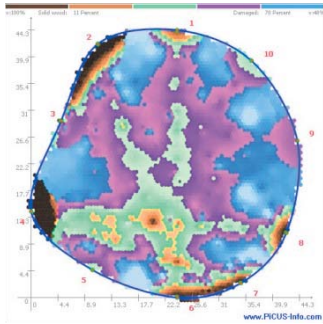


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
12604
Förster
fehlt

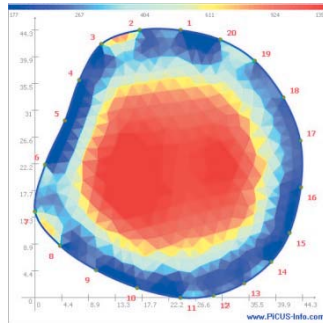
BHD: 37 cm

Baum 7.1



11 %

70 %

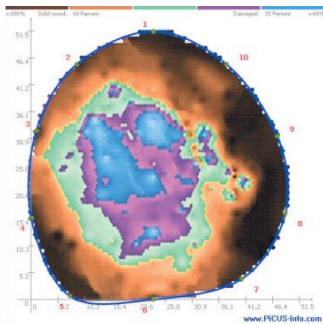


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
22401
Förster
fehlt

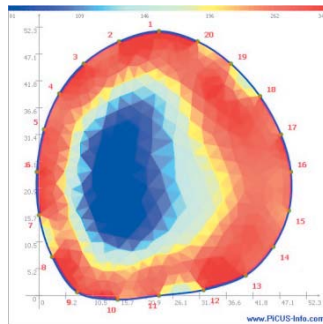
BHD: 40 cm

Baum 7.7



60 %

25 %

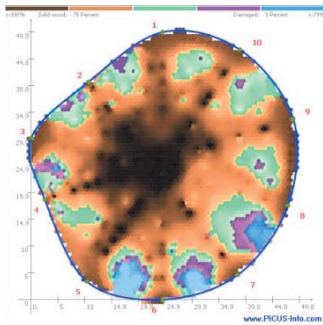


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
11173
Förster
fehlt

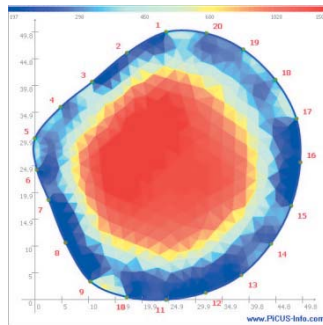
BHD: 47 cm

Baum 7.3



75 %

9 %

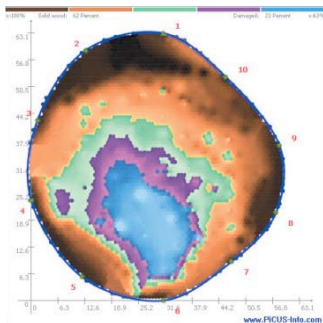


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
15390
Förster
fehlt

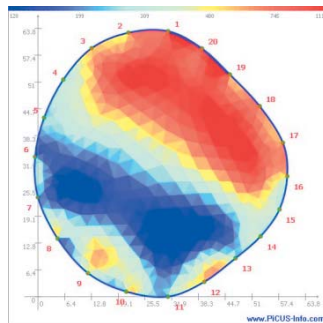
BHD: 48 cm

Baum 7.8



62 %

23 %

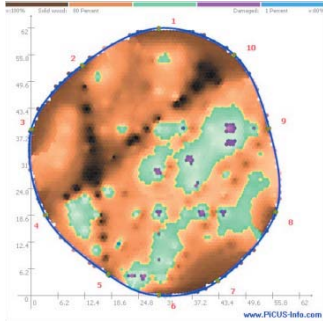


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
15894
Förster
fehlt

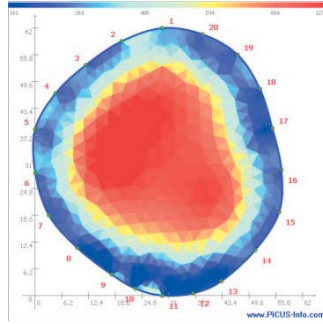
BHD: 53 cm

Baum 7.4



80 %

1 %

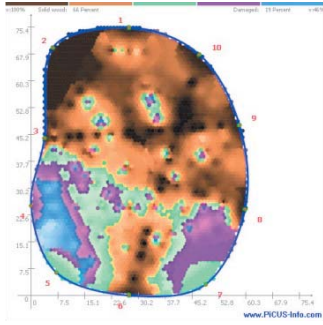


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
21096
Förster
fehlt

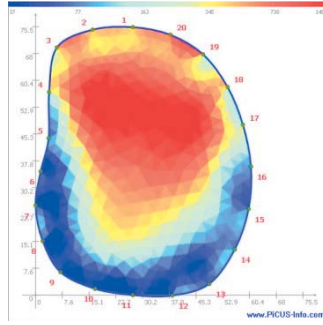
BHD: 59 cm

Baum 7.6



66 %

19 %

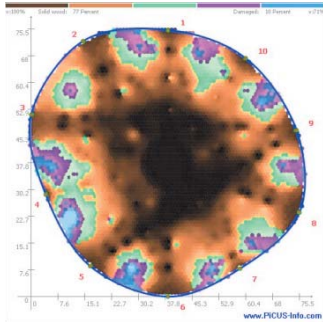


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
30780
Förster
fehlt

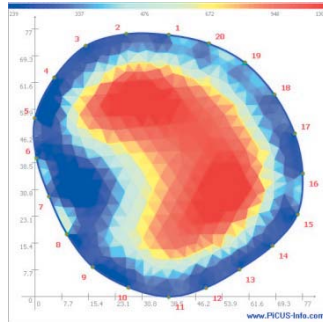
BHD: 65 cm

Baum 7.9



77 %

10 %

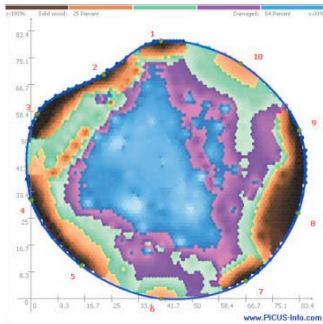


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
30780
Förster
fehlt

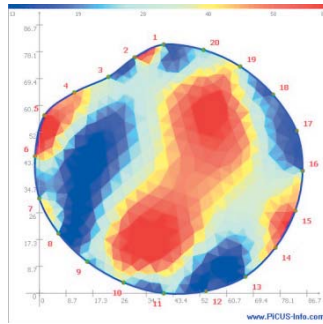
BHD: 72 cm

Baum 7.10



25 %

54 %



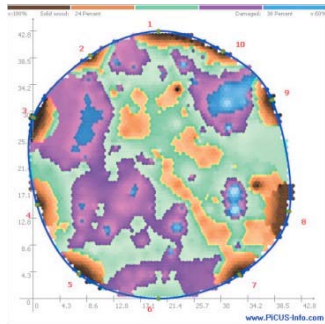
Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
3720
Förster
fehlt

BHD: 74 cm

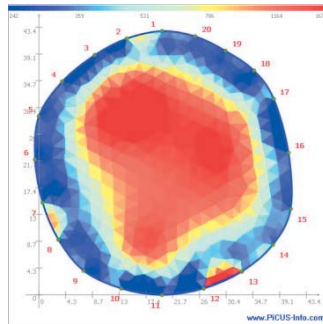
Riein – Plaunca (1790 m ü. M.)

Baum 10.3



24 %

38 %

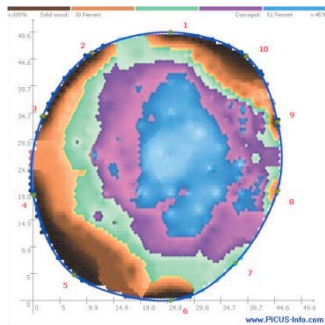


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
27702
Förster
mittlere KF

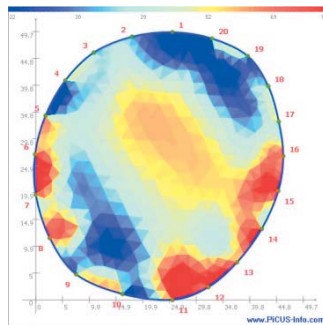
BHD: 41 cm

Baum 10.9



30 %

51 %

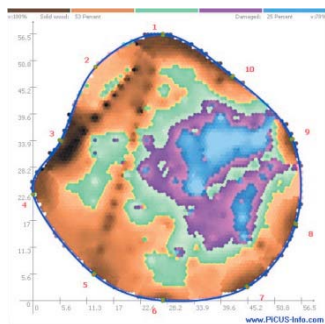


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
4189
Förster
starke KF

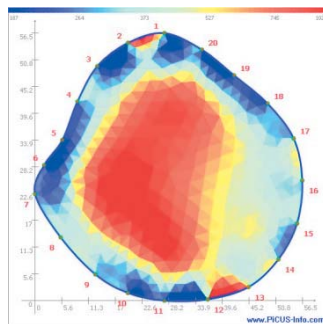
BHD: 45 cm

Baum 10.7



53 %

25 %

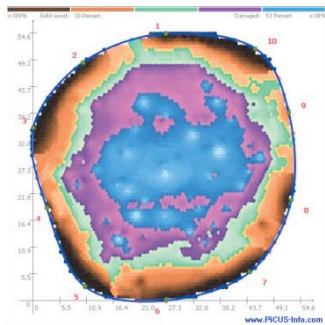


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
23639
Förster
mittlere KF

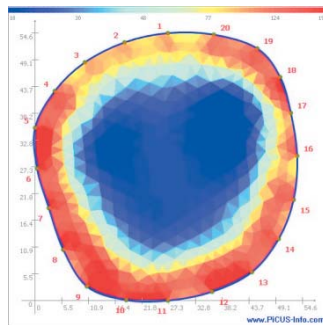
BHD: 49 cm

Baum 10.2



33 %

51 %

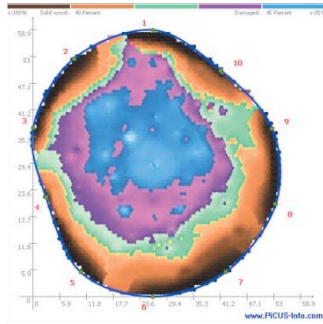


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
12127
Förster
starke KF

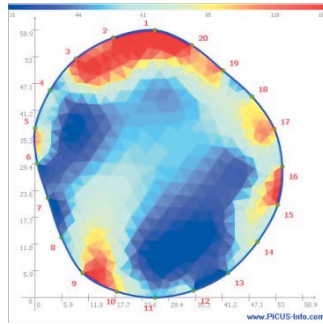
BHD: 51 cm

Baum 10.10



40 %

45 %

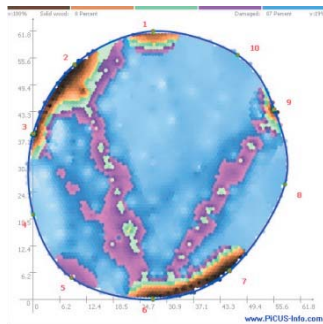


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
7325
Förster
starke KF

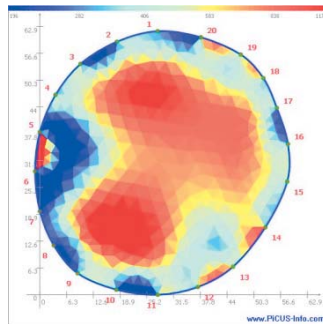
BHD: 51 cm

Baum 10.4



8 %

87 %

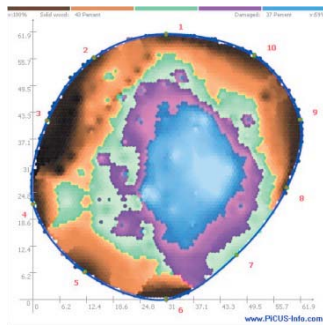


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
29476
Förster
keine KF

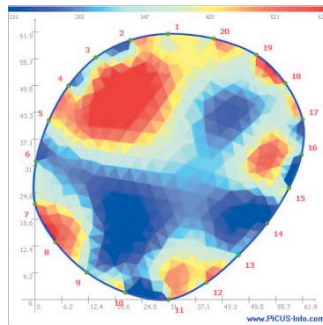
BHD: 55 cm

Baum 10.1



43 %

37 %

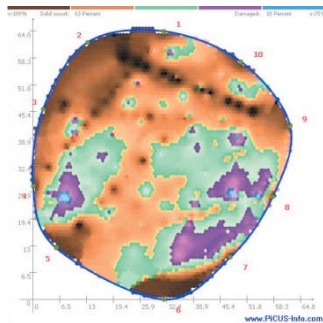


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
11265
Förster
starke KF

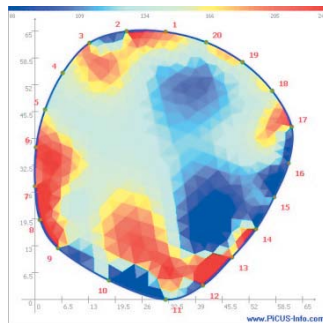
BHD: 59 cm

Baum 10.5



63 %

10 %

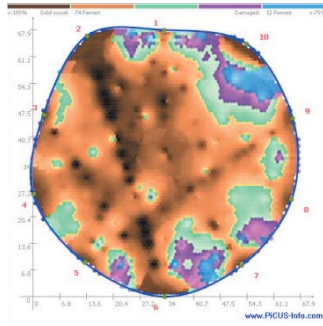


Stammscheibe
fehlt

Rotfinder
13044
Förster
geringe KF

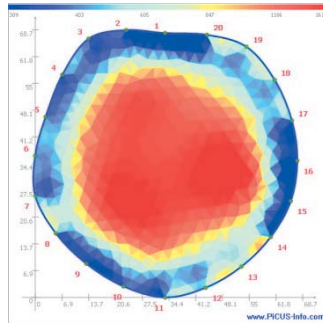
BHD: 62 cm

Baum 10.6



74 %

12 %



Stammscheibe
fehlt

Rotfinder

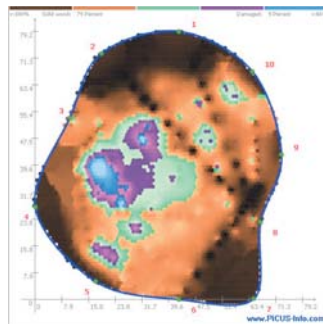
30780

Förster

keine KF

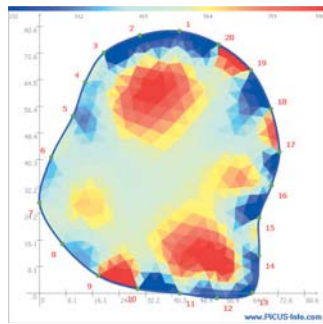
BHD: 65 cm

Baum 10.8



79 %

9 %



Stammscheibe
fehlt

Rotfinder

30780

Förster

mittlere KF

BHD: 75 cm

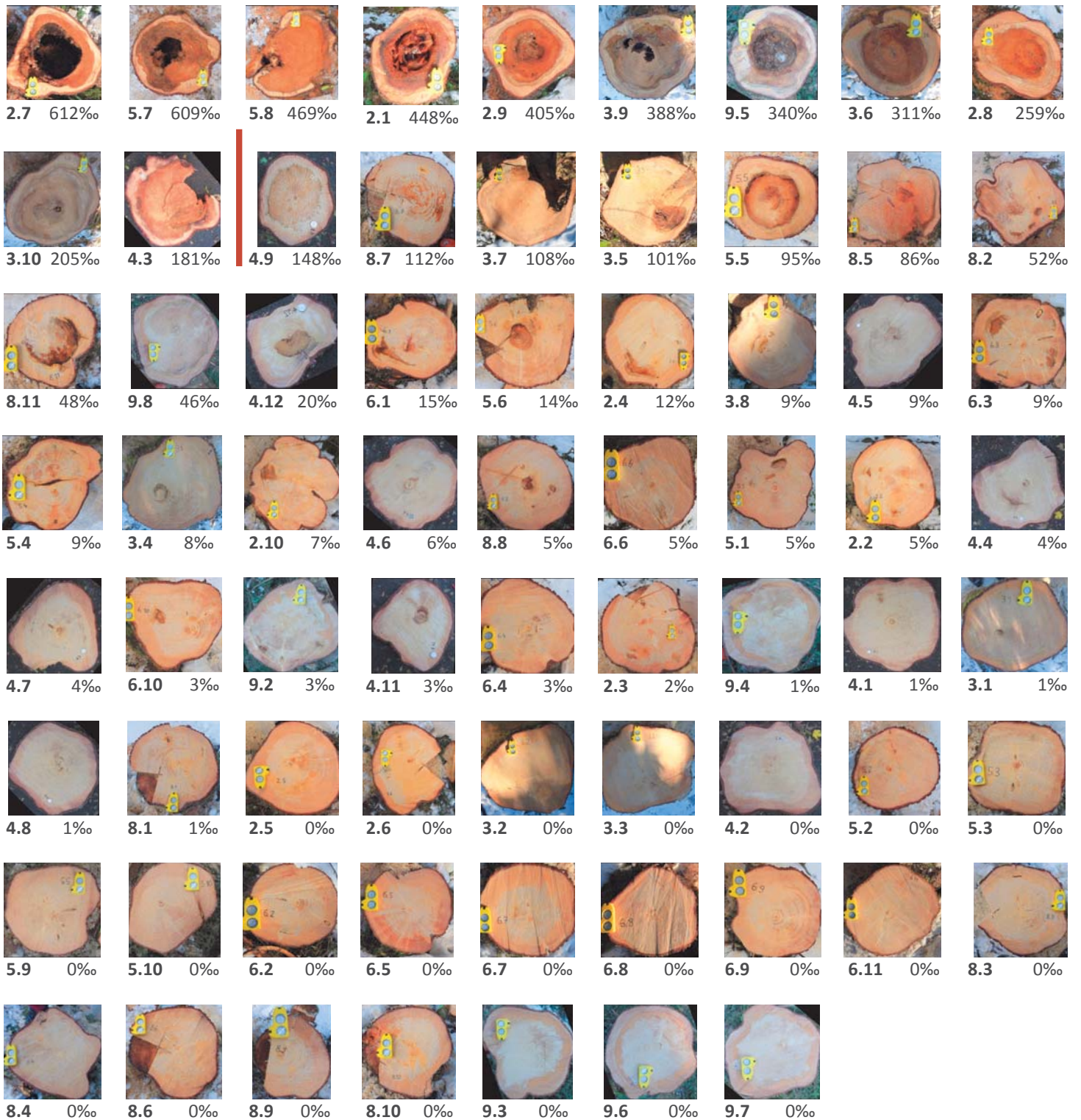


Abb. I: Darstellung der Stammscheiben aller gefällten Fichten, geordnet nach abnehmendem Schadegrad. Zahl links unter dem Bild: Identifikationsnummer. Zahl rechts unter dem Bild: Schadegrad nach Graber. Rote Linie: Schwellenwert 150 ‰ Schadegrad.



Abb. II: Darstellung der PiCUS Widerstandstomogramme aller gefällten Fichten, geordnet nach abnehmendem Schadengrad. Hohe relative Widerstandswerte sind rot, niedrige relative Widerstandswerte blau dargestellt. Zahl links unter dem Bild: Identifikationsnummer. Rote Linie: Schwellenwert 150 % Schadengrad.

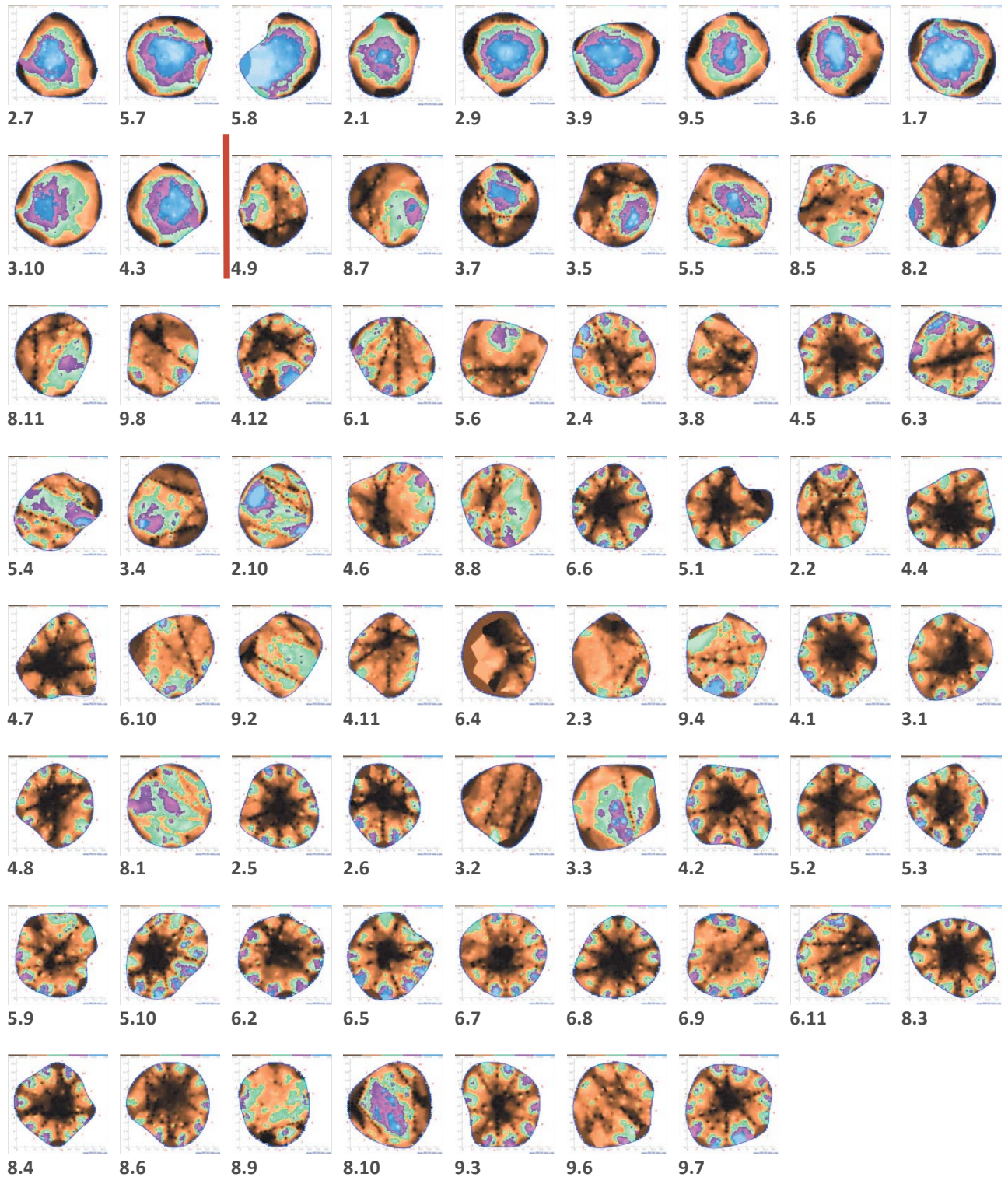


Abb. III: Darstellung der PicUS Schalltomogramme aller gefällten Fichten, geordnet nach abnehmendem Schadengrad. Hohe Schallgeschwindigkeitswerte sind braun, niedrige Schallgeschwindigkeitswerte violett und blau dargestellt. Zahl links unter dem Bild: Identifikationsnummer. Rote Linie: Schwellenwert 150 % Schadengrad.

Anhang II

Fragenbogen zum Projekt (versendet im Aug. 2013)

„Stabilitätsabschätzung von Schweizer Schutzwäldern mit neuartigen bildgebenden Verfahren“

Projektleitung: Wunder Consulting

Projektpartner: AWN Chur, WSL Birmensdorf, ETH Zürich

Im Rahmen unseres Projektes wurden in Ihrem/Deinem Revier an den vereinbarten Standorten 10 bis 12 Bäume mit verschiedenen Tomographen (Schalltomograph, Widerstandstomograph, punktuelle Widerstandsmessung = „Schnelltest“) auf Kernfäule untersucht. In den Revieren Brigels und Trun wurden je 2 Standorte aufgenommen, in allen anderen Revieren je ein Standort (siehe Tab.1).

Tab. 1: Lage der 10 untersuchten Standorte mit der Anzahl der vermessenen Bäume. Insgesamt wurden 107 Bäume mit allen drei Tomographen vermessen (105 Fichten, 1 Tanne und 1 Buche). Die Baumnummern sind jeweils am Stammfuss mit Farbspray angebracht.

Revier	Standort-Nr.	Lage (CH-Koordinaten)	Höhe ü.M. (m)	Anzahl der vermessenen Bäume
Laax	1	738250 / 186200	1230	10
Brigels	2	723400 / 182400	1550	10
Brigels	3	725800 / 180250	970	10
Obersaxen	4	721350 / 176500	1610	12
Trun	5	720400 / 180600	1650	10
Trun	6	720650 / 180500	1570	11
Ilanz	7	732350 / 185450	1520	10
Vals	8	732950 / 162900	1560	11
Safien	9	745850 / 182050	1130	12 (davon 1 Ta und 1 Bu)
Riein	10	738800 / 179450	1790	11

Ich wäre Euch sehr dankbar, wenn Ihr für alle Mess-Bäume in Eurem Revier den Kernfäulebefall gemäss Eurer Erfahrung abschätzt – und diese Expertenbasierte Information in den Fragebogen auf der Rückseite einträgt. Ganz herzlichen Dank im voraus und beste Grüsse,

Jan

Dr. Jan Wunder
Wunder Consulting
Heferenstr. 7
8636 Wald ZH

055 410 15 81
079 927 90 34

jan@wunder.co.nz
www.wunder.co.nz

ANHANG III

Rotfinder-Zusatzuntersuchung an schwachem und mittlerem Baumholz

Die meisten der bisher untersuchten Fichten gehören zum starken Baumholz (BHD>50 cm). Die Leistungsfähigkeit des Rotfinders für Fichten des schwachen und mittleren Baumholzes (BHD 21-50 cm) konnte daher nur unzureichend beurteilt werden. Daher wurden am letzten Tag der Tomographie-Feldarbeiten (17.7.2013) in einer kleinen Zusatzstudie im Uaul Bacun (Forstrevier Breil) 21 weitere Fichten untersucht, die vorrangig zum schwachen und mittleren Baumholz zu rechnen sind (Durchmesser auf Messhöhe (ca. 1 m): 36.4 ± 10.7 cm). Diese Fichten wurden im November 2013 gefällt und der Fäulegrad grob in 4 Stufen erfasst (stark, mittel, wenig und nicht faul). Die Ergebnisse sind ebenfalls vielversprechend, da unterhalb eines Rotfinder-Schwellenwertes von 4400 alle Fichten (5 von 5) mittlere oder starke Kernfäule aufwiesen, oberhalb dieses Schwellenwertes wurden 14 von 16 Fichten korrekt als wenig oder nicht faul klassifiziert (Abb. IV).

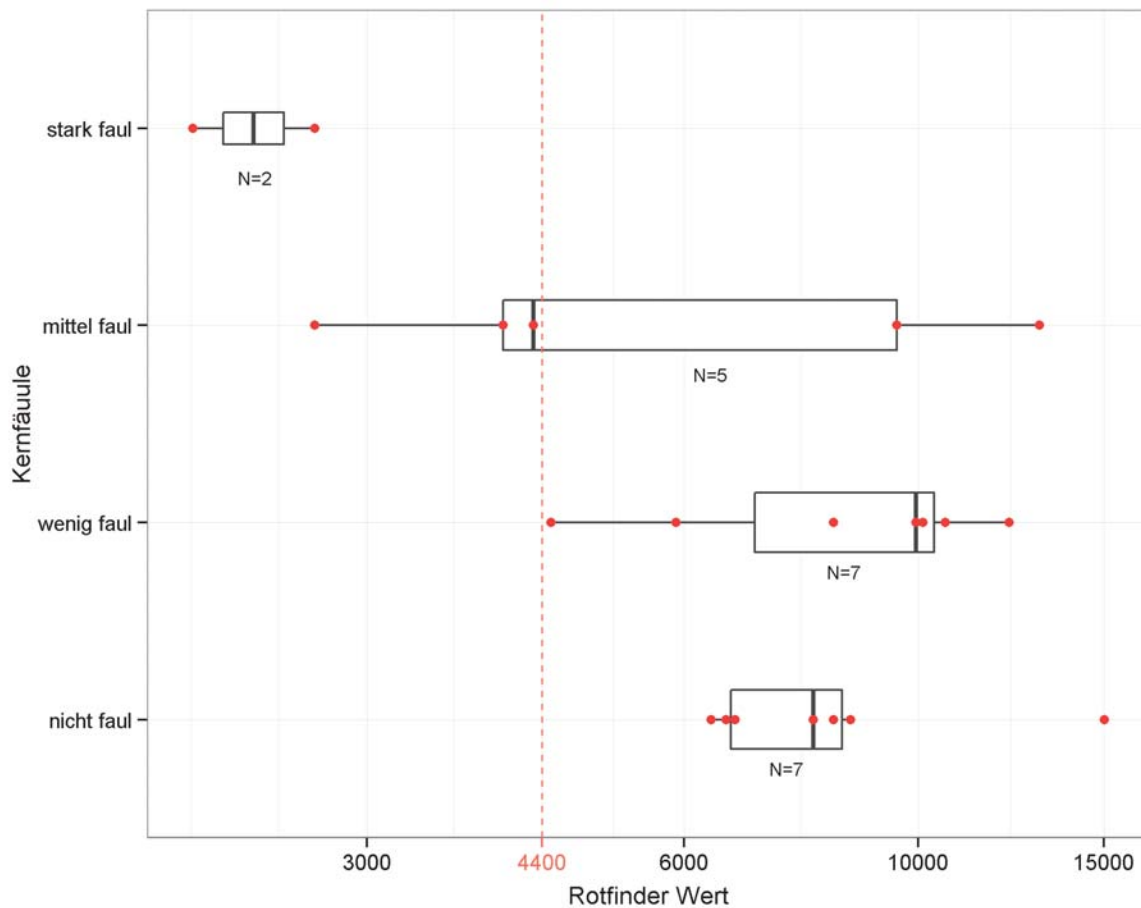


Abb. IV: Zusatzstudie: Boxplots von Rotfinder-Messungen und tatsächlich vorhandenen Fäulen (klassifiziert in vier „Schadensgruppen“).

ANHANG IV

Molekulare Identifikation der Kernfäule-Erreger

IV.A Methodik

Von den erstellten Reinkulturen wurde unter sterilen Bedingungen je ein Mycelstück als Inokulum in flüssiges Diamalt-Medium (20 g l⁻¹ Diamalt, Hefefabriken AG, CH-3324 Hindelbank) gegeben und im Dunkeln bei Raumtemperatur für 5-10 Tage (je nach Pilzwachstum) inkubiert. Anschliessend wurde das Mycel durch Vakuumfiltration separiert. Pro Isolat wurde ein etwa 10x10 mm grosses Stück in ein Röhrchen einer „96-well collection plate“ gegeben und sofort bei -20°C eingefroren. Um DNA zu extrahieren, wurden die gefrorenen Mycelproben über Nacht lyophilisiert. Danach wurde je eine 5 mm grosse Stahlkugel zugegeben und die Proben wurden für 3 min bei 30 Hz in einer Retschmühle (MM30) zerkleinert. Anschliessend wurde die DNA Extraktion mit dem Quiagen 96er Kit (DNeasy Plant Kit, Qiagen, Valencia, CA) gemäss den Angaben des Herstellers durchgeführt. Die so extrahierte DNA wurde bei 4°C aufbewahrt und innerhalb von 2 Wochen weiterverwendet.

Die DNA-Konzentration der Proben wurde photometrisch mit dem Bio Photometer (Eppendorf) gemessen. Um die Identität der Isolate zu bestimmen, wurde anschliessend bei den unbekanntem Pilzen die ribosomale ITS (internal transcribed spacer) Region sequenziert. Für die Artbestimmung der *Heterobasidion* sp. Isolate wurde gemäss Dalman et al. (2010) die DNA Sequenz des Genfragments EF-1 α (elongation factor-1 α) bestimmt. Die Artbestimmung der *Armillaria* sp. Isolate wurde ebenfalls durch die Sequenzierung der EF-1 α Region durchgeführt (Maphosa et al. 2006). Für die dazu nötige PCR (Polymerase-Kettenreaktion) wurde ein Volumen von 20 μ l bestehend aus je 1 μ l 10-fach verdünnter DNA, 0.5 μ M (*Armillaria*) bzw. 12.5 μ M jedes spezifischen Primers (Tab. 2), 7.2 μ l (*Armillaria*) bzw. 7.6 μ l JumpStart REDTaq (PCR-Reaktionsmix, Sigma-Aldrich) und 9.8 μ l (*Armillaria*) bzw. 9.4 μ l steriles destilliertes Wasser verwendet. Das für die Amplifikation gebrauchte PCR-Programm wurde mit einem Veriti 96-Well Thermal Cycler (Applied Biosystems) durchgeführt und begann mit einer Denaturierung für 2 min bei 95°C, gefolgt von 35 Zyklen bei 95°C für 30 s, 55°C für 30s, 72°C für 2 min und einer anschliessenden Elongation bei 72°C für 10 min. Die PCR Produkte wurden mittels Gelelektrophorese auf einem 1.5 % Agarose-Gel überprüft und mit dem Illustra Exo Star 1-Step PCR Clean up Kit (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA) aufgereinigt. Das BigDye Terminator v. 3.1. Cycle Sequencing Kit und das Big Dye x- Terminator Purification Kit (Applied Biosystems, Carlsbad, CA) wurden gemäss dem Protokoll des Herstellers für die Sequenzierungsreaktion verwendet. Die DNA Sequenzen wurden dann mit einem 3130xl DNA Analyzer (Applied Biosystems) im Genetic Diversity Center (ETH, Zürich) bestimmt. Die erhaltenen Sequenzen wurden mit der Software DNA Dynamo (<http://www.bluetractorsoftware.co.uk/>) manuell überprüft und editiert und mit NCBI-BLAST mit vorhandenen Sequenzen einer Nukleotidsequenzdatenbank verglichen.

Tab II: In der PCR verwendete Primer.

Organismus	Gen	Primer	Primer Sequenz 5'-3'	Quelle
Unbekannte Pilze	ITS	ITS-1	TCCGTAGGTGAACCTGCGG	White <i>et al.</i> (1990)
		ITS-4	TCCTCCGCTTATTGATATGC	White <i>et al.</i> (1990)
<i>Heterobasidion</i>	EFA-1 α	Forward	TCAACGTGGTCCGGTGAGCAGGTA	Johannesson & Stenlid (2003)
		Reverse	AAGTCACGATGTCCAGGAGCATC	Johannesson & Stenlid (2003)
<i>Armillaria</i>	EFA-1 α	EF595F	CGTGACTTCATCAAGAACATG	Maphosa <i>et al.</i> (2006)
		Arm EF1- α -REV	AGACGGAGAGGCTTGTCGGAG	Mulholland <i>et al.</i> (2012)

IV.B Literaturverzeichnis

Dalman, K., Olson, A., Stenlid, J. (2010): Evolutionary history of the conifer root rot fungus *Heterobasidion annosum sensu lato*. *Molecular ecology* 19: 4979-4993.

Johannesson, H., Stenlid, J. (2003): Molecular markers reveal genetic isolation and phylogeography of the S and F intersterility groups of the wood-decay fungus *Heterobasidion annosum*. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 29: 94-101.

Maphosa, L., Wingfield, B. D., Coetzee, M. P. A., Mwenje, E., Wingfield, M. J. (2006): Phylogenetic relationships among *Armillaria* species inferred from partial elongation factor 1-alpha DNA sequence data. *Australasian Plant Pathology* 35: 513-520.

Mulholland, V., MacAskill, G. A., Laue, B. E., Steele, H., Kenyon, D., Green, S. (2012): Development and verification of a diagnostic assay based on EF-1 α for the identification of *Armillaria* species in Northern Europe. *Forest Pathology* 42: 229-238.

White, T. J., Bruns, T., Lee, S., Taylor, J. (1990): Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications* (eds Innis M., Gelfand D.H., Sninsky J.J., White T.J.), pp. 315–322, San Diego, California.