DISS. ETH Nr. 14 974

Ursachen und Dynamik von Fäulen an Holzkonstruktionen im Wildbachverbau

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

KONRAD PHILIPP NOETZLI

Dipl. Forsting. ETH

geboren am 5.2.1972

von Zürich

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Ottmar Holdenrieder, Referent

Dipl. Forsting. Dipl. Bauing. Albert Böll, Korreferent

O. Univ. Prof. Dr. Florin Florineth, Korreferent

2002

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 1
Summary 3
1 Einleitung 5
1.1 Holz als Werkstoff im Wildbachverbau 5
1.2 Zielsetzungen und Forschungsfragen 8
1.3 Aufbau der Arbeit 9
2 Fäuleerreger an Holzkonstruktionen im Wildbachverbau: Identifikation dominierender Pilzarten und Analyse von Besiedlungsmustern 10
2.1 Einleitung 10
2.2 Material und Methoden 12
2.2.1 Untersuchungsobjekte 12
2.2.2 Kollektion von Fruchtkörpern und Holzproben 13
2.2.3 Isolierung der Fäuleerreger 15
2.2.4 Bestimmung und Häufigkeiten der Pilzarten 15
2.2.5 Besiedlungsmuster 17
2.3 Resultate 20
2.3.1 Häufigste Fäuleerreger an Wildbachsperren 20
2.3.2 Besiedlungsmuster 23
2.4 Diskussion 26
2.4.1 Artenspektrum von Basidiomyceten an Wildbachsperren aus Holz 26
2.4.2 Bedeutung der dominierenden Arten 27
2.4.3 Besiedlungsmuster 28
2.5 Schlussfolgerungen und Ausblick 32
3 Holzzustand an Wildbachsperren: Einfluss von Fäuleerregern, Konstruktionsmerkmalen sowie spezifischen Umweltbedingungen 34
3.1 Einleitung 34
3.2 Material und Methoden 36
3.2.1 Erfassung des Holzzustandes mittels Resistographie 36
3.2.2 Analyse der Bohrkurven 37
3.2.3 Einflussfaktoren auf den Holzzustand 39
3.2.4 Statistische Analyse 40
3.3 Resultate 42
3.4 Diskussion 46
3.4.1 Erfassung des Holzzustands 46
3.4.2 Analyse der Bohrkurven 47
3.4.3 Einflussfaktoren auf den Holzzustand 48
3.4.4 Statistische Auswertung 52
3.4.5 Nicht berücksichtigte Einflussfaktoren 53
3.5 Folgerungen und Ausblick 56
4 Wirkung wechselnder Feuchtebedingungen auf Fäuleerreger an Wildbachsperren aus Holz 57
4.1 Einleitung 57
4.2 Material und Methoden 58
4.2.1 Herkunft des Probematerials 58
4.2.2 Inokulationsmethode 58
4.2.3 Bestimmung von Masse- und Festigkeitsverlust 61
4.2.4 Statistische Auswertung 62

4.3 Resultate ... 63
4.4 Diskussion ... 66
4.5 Schlussfolgerungen und Ausblick ... 70
5 Wirkung von Eisen aus Verbindungsnägeln auf holzabbauende Pilze ... 72
5.1 Einleitung ... 72
5.2 Material und Methoden ... 74
5.2.1 Probenmaterial ... 74
5.2.2 Bestimmung des Eisengehalts im Holz ... 76
5.2.3 Holzabbau *in vitro* in Abhängigkeit vom Eisengehalt ... 77
5.3 Resultate ... 79
5.3.1 Eisengehalt im Holz in Funktion des Abstands zum Nagel ... 79
5.3.2 Holzabbau *in vitro* in Abhängigkeit vom Eisengehalt ... 80
5.4 Diskussion ... 82
5.4.1 Eisengehalt des Holzes im Bereich von Verbindungsnägeln ... 82
5.4.2 Wirkung von Eisen auf *Fomitopsis pinicola* ... 83
5.5 Folgerungen und Ausblick ... 85
6 Tragsicherheit von Holzkonstruktionen im Wildbachverbau ... 87
6.1 Einleitung ... 87
6.2 Material und Methoden ... 88
6.21 Untersuchungsobjekte ... 88
6.2.2 Nachweis der Tragsicherheit ... 89
6.2.3 Versuchsanordnung ... 90
6.2.4 Auswertung ... 91
6.3 Resultate ... 93
6.4 Diskussion ... 94
6.4.1 Probenmaterial ... 94
6.4.2 Statisches System ... 95
6.4.3 Versuchsanordnung ... 97
6.4.4 Ansatz der Auswertung ... 97
6.5 Schlussfolgerungen und Ausblick ... 97
6.6 Zusammenfassung ... 98
7 Synthese ... 99
7.1 Wichtigste Resultate ... 99
7.2 Überlegungen zur Verwendung von Holz im Wildbachverbau ... 100
7.3 Schlussbemerkungen ... 103
8 Literaturverzeichnis ... 105
Lebenslauf ... 127
Anhang ... 129
Anhang I ... A1
Anhang II ... A10
Anhang III ... A20
Anhang IV ... A22
Anhang V ... A32
Anhang VI ... A34
Anhang VII ... A38

Dank

Vorliegende Arbeit hätte ohne die Unterstützung vieler Personen und Institutionen nicht realisiert werden können. Speziell bedanken möchte ich mich bei folgenden Personen:

Prof. Dr. Ottmar Holdenrieder ermöglichte die Durchführung der Arbeit an der Professur Forstschutz und Dendrologie der ETH Zürich und unterstützte mich stets in allen Fachfragen. Dipl. Ing. Albert Böll, Leiter der Abteilung Wasser-, Erd- und Felsbewegungen der Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, übernahm das Korreferat und betreute mich ausgezeichnet in jeglichen Fragen im Zusammenhang mit Naturgefahren und Wildbachverbau sowie bei den mechanisch-technischen Fragestellungen. O. Univ. Prof. Dr. Florin Florineth vom Institut für Landschaftsplanung und Ingenieurbiologie der Universität für Bodenkultur, Wien, übernahm ebenfalls das Korreferat und lieferte wertvolle praxisnahe Anregungen und Anwendungsbeispiele.

Ein spezieller Dank gebührt Dr. Frank Graf für die Erarbeitung des Projektplanes, die sehr engagierte und unkomplizierte Begleitung der Arbeit sowie für seine tatkräftige Mithilfe im Feld und im Labor. Dr. Thomas Sieber danke ich für die grosse Hilfe bei der Bestimmung der Pilzarten und für die jederzeit verfügbare Beratung bei fachlichen und praktischen Fragen. Martin Frei führte im Rahmen seiner Diplomarbeit mit grossem Engagement die Bruchexperimente im Feld durch und trug wesentlich zum Gelingen des letzten Abschnittes der vorliegenden Arbeit bei.

Frau Grazyna Gantenbein, Dr. Peter Niemz und Dr. Mihaly Bariska danke ich für die Hilfe bei den Holzprüfungen und bei Fragen rund um die Rasterelektronenmikroskopie. Dr. Beat Frey betreute mich ausgezeichnet bei den EDX-Messungen am Rasterelektronenmikroskop.

Dr. Daniel Mandallaz leistete bei der statistischen Datenanalyse einen wesentlichen Beitrag. Prof. Dr. Hans Böhni und Dr. Thomas Suter begutachteten das Kapitel zur Eisenfreisetzung durch Verbindungsnägel. Prof. Dr. Mario Fontana, Dr. Adrian Mischler und Hanspeter Arm möchte ich für die gute Zusammenarbeit bei Fragen zur Statik von Rundhölzern sowie für die praktische Mithilfe bei den Holzprüfungen danken.

Ebenfalls danke ich verschiedenen Personen aus der Forstpraxis für wertvolle Hinweise auf Untersuchungsobjekte und für die gute Zusammenarbeit bei den Feldarbeiten. Namentlich sind dies Urs Braschler, Kantonsforstamt Nidwalden; Felix Cuny, Integralprojekt Wägital; Sepp Hess, Kantonsforstamt Obwalden; Jürg Trümpler, Kreisforstamt Werdenberg SG; Martin Winkler und Roland Wüthrich, Kantonsforstamt Zug; Fritz Ammann, Forstunternehmer, Bolligen; Kurt Ruhstaller, Revierförster Innerthal SZ; Pascal Heldner, Revierförster Engi GL; Robert Baumgartner, Revierförster Unterägeri ZG; Ruedi Fluri, Revierförster Horgenberg ZH; Otto Bär und Fredi Leuthold, Landwirte, Hirzel ZH. Ein herzliches Dankeschön für die Hilfe bei Feld- und Laborarbeiten sowie bei der Durchsicht der Arbeit geht auch an Prof. Dr. Fritz Hans Schweingruber, Werner Gerber, Christian Rickli, Sabine Brodbeck, Patricia Schneider, Karin Langenegger, Erwin Graf, Ivano Brunner, Jürg Stückelberger, Oliver Hitz, Marco Calderoni, Cornelia Egenter, Christian Gobbin, Christoph Grünig und Beat Müller. Markus Sieber danke ich für seine Hilfe bei der Übersetzung der Zusammenfassung ins Englische.

Ganz herzlich danke ich auch meiner Frau Anita und meiner Familie für die grosse Geduld, genaues Korrekturlesen und alle Ermunterungen im richtigen Moment!

Anstoss zur Durchführung der vorliegenden Arbeit gab der Herbstkurs 1997 der Forstlichen Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN) in Stalden OW zum Thema „Forstlicher Bachverbau". Dabei wurde das Bedürfnis deutlich, die Abbauprozesse von Holz im Wildbachverbau besser zu verstehen. Die vorliegende Arbeit wurde vom Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung des BUWAL unterstützt. In diesem Zusammenhang sei auch Dr. Peter Greminger von der Eidgenössischen Forstdirektion ganz herzlich gedankt.

Zusammenfassung

Erosionsprozesse gefährden Siedlungen und Infrastrukturen in intensiv genutzten Talräumen der Alpen. Eine der wichtigsten Ursachen der Erosion ist die Aktivität von Wildbächen, deren Verbau deshalb vielerorts notwendig ist. Häufig werden Wildbachsperren aus Holz erstellt, welches in frischem Zustand verbaut wird. Wechselnde Feuchte und Erdkontakt des Holzes schaffen besondere Bedingungen für den Holzabbau durch Pilze. Die Funktionsdauer dieser Holzkonstruktionen hängt neben Erosion und Geschiebeführung in den Gerinnen wesentlich von der Aktivität holzzerstörender Pilze ab. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das Artenspektrum, die Ausbreitungsdynamik und das Abbauverhalten von Fäuleerregern unter den spezifischen ökologischen Bedingungen an Bachverbauungen zu untersuchen. Zudem wurden verbautechnische Fragestellungen im Zusammenhang mit der Ökologie der häufigsten Fäuleerreger sowie der Funktionsdauer der Bauwerke bearbeitet.

An neun pilzbefallenen Wildbachsperren (Alter 5 bis 27 Jahre) in verschiedenen Gerinnen am zentralen Alpennordhang wurden sämtliche Fruchtkörper von Basidiomyceten kartiert und identifiziert. Zudem erfolgte eine systematische Isolierung von Pilzmycelien aus den verbauten Rundhölzern. Die räumliche Ausdehnung der Thalli der häufigsten Arten wurde mit Kompatibilitätstests (VC-Tests) erfasst. Bohrwiderstandsmessungen dienten zur Quantifizierung des Holzzustands der einzelnen Bauteile. Anschliessend wurde das Vorkommen von Fäuleerregern sowie verschiedene ökologische Parameter auf einen Zusammenhang mit dem Auftreten von Fäulen untersucht.

Als häufigste Fäuleerreger wurden in absteigender Reihenfolge *Fomitopsis pinicola* (Rotrandiger Baumschwamm), *Antrodia serialis* (Reihige Tramete), *Sistotrema brinkmannii* (Brinkmann's Rindenpilz), *Gloeophyllum sepiarium* (Zaunblättling), *Armillaria cepistipes* (Zwiebelfüssiger Hallimasch) und *Gloeophyllum odoratum* (Fencheltramete) nachgewiesen, welche zusammen 75% aller Basidiomyceten ausmachten. Innerhalb einer Art konnten bis zu 87 genetisch verschiedene „Individuen" (VC-Gruppen) der dominierenden Fäulerreger an einer einzelnen Bachsperre nachgewiesen werden. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, war die Ausdehnung der Thalli auf ein einzelnes Rundholz beschränkt.

Die Fäuleerreger traten an den Sperrenflügeln deutlich häufiger auf als an den seitlichen Einbindungen und an den ständig überflossenen Bauteilen der Sperren. Auch die Holzzerstörung war an den Flügeln wesentlich weiter fortgeschritten als an den übrigen Bauteilen. Allerdings waren auch die permanent von Wasser überströmten Bereiche von Fäuleerregern besiedelt, es kam aber dort nicht zur Ausbildung von Holzfäulen. Die Abhängigkeit des Abbaus von frischem Rundholz von der Dauer der Überflutung durch Wasser konnte für den häufigsten Fäuleerreger (*Fomitopsis pinicola*) in einem Laborexperiment nachgewiesen werden. Das Auftreten von Fäulen war mit der Höhenlage und der Exposition des Gerinnes korreliert. Zudem traten in der Nähe von Stirnflächen häufiger Fäulen auf als in den übrigen Bereichen der Rundhölzer. Die verbaute Holzart (Fichte oder Tanne), das Alter der Sperre sowie der Durchmesser der Rundhölzer waren nicht mit dem Auftreten von Fäulen korreliert.

Verbindungsnägel aus Stahl, wie sie an Wildbachsperren aus Holz eingesetzt werden, erhöhen den Eisengehalt im Holz. Eisen hat als Spurenelement einen Einfluss auf das Wachstum von Pilzen. In Holzproben wurden durch eine Tränkung mit $FeCl_3$-Lösungen vergleichbare Eisengehalte erzeugt, wie sie im Holz um Verbindungsnägel auftreten. Der Fäuleerreger *Fomitopsis pinicola* baute Proben mit erhöhtem Eisengehalt signifikant rascher ab als unbehandelte.

In einer Fallstudie wurde die Tragsicherheit von drei rund 60 Jahre alten Wildbachsperren in einem Feldexperiment untersucht. Dabei wurden die Rundhölzer der Sperren einzeln bis zum Bruch belastet. Gegenüber den bei einer Bemessung vorausgesetzten Festigkeitswerten auf dem Niveau der Bruchlasten wiesen die geprüften Rundhölzer im Mittel noch eine Sicherheitsreserve von 1.2 auf. Der Bemessungseinwirkung auf dem Niveau der zulässigen Spannung (Gebrauchslasten) hätten alle Rundhölzer noch widerstanden. Dieser Befund zeigt, dass an den untersuchten Sperren zumindest die Hölzer des Sperrenkörpers auch nach mehreren Jahrzehnten noch eine genügende Festigkeit aufwiesen. Dieses Ergebnis muss durch weitere Studien in anderen Gerinnen bestätigt werden.

Die Resultate der vorliegenden Arbeit zeigen, dass sich die spezifischen ökologischen Bedingungen an Wildbachsperren aus Holz stark auf die Abbauaktivität von Fäuleerregern und damit auch auf die Funktionsdauer der Bauwerke auswirken. Diesen Faktoren muss im Wildbachverbau sowohl beim Entscheid, ob Holz an einem gegebenen Standort als Baumaterial in Frage kommt, wie auch bei der Planung und der Ausführung der Werke vermehrt Beachtung geschenkt werden. Aufgrund der stark unterschiedlichen Abbaudynamik der einzelnen Bauteile ist eine Ersetzung einzelner Elemente der Sperren sinnvoll. Unterhalts- und Reparaturarbeiten sollten deshalb bei der Projektierung vorgesehen werden. Die Verwendung von Holz als technisch und ökologisch sinnvolles Material lässt sich auf dieser Basis optimieren.

Summary

In the Alps, human settlements and infrastructure are frequently endangered by the effects of erosion. One of the main causes of erosion is the activity of torrents, which are often controlled in order to minimise damage. In torrent control, the flow of water is regulated by check dams, frequently constructed of wood (crib dams). The life span of such wooden structures is limited by erosion and bed load dynamics, and also by the rate of decomposition of the wood by fungi. Due to fluctuating moisture content of the wood and its contact with the soil, the decay fungi grow under very specific conditions.

The goal of this project was to investigate the biology of fungi causing wood rot with reference to species composition, growth dynamics, and decomposition processes, under the specific ecological conditions occurring in crib dams. In addition, the ecology of the most common decay fungi was related to technical aspects and to the life span of the crib dams.

On the northern slopes of the Swiss Alps, nine 5- to 27-year-old crib dams infested by fungi were selected in various torrents. All carpophores of basidiomycetes occurring on the logs were mapped and identified. Furthermore, mycelia were isolated systematically from the respective logs. The spatial distribution of the thalli of the most frequent species was assessed by means of compatibility tests (vc-tests). The state of decomposition of the structural components was quantified with the help of drill-resistance measurements. Subsequently, the presence of rot fungi and a multitude of ecological parameters were related to the actual occurrence of wood rot.

The most abundant rot fungi were (in decreasing order) *Fomitopsis pinicola*, *Antrodia serialis*, *Sistotrema brinkmannii*, *Gloeophyllum sepiarium*, *Armillaria cepistipes* and *Gloeophyllum odoratum*, adding up to 75% of all basidiomycetes. Within one species, it was possible to identify up to 87 genetically different "individuals" (vc-groups) on one particular crib dam.

The decay fungi occurred more frequently on the wings of the dams than on the lateral abutments or on those parts, which were constantly covered by flowing water. Similarly, the degree of decomposition was distinctly greater in the wings than in the remaining parts of the crib dams. In those parts, which were covered by flowing water, there was no decomposition, yet rot fungi were present there. An *in vitro* experiment confirmed that the rate of decomposition of freshly cut wood by the most common rot-fungus (*Fomitopsis pinicola*) is negatively correlated to the duration of coverage by water. Both, the exposition and the height above sea level of the streambed had a significant influence on the occurrence of rot. In addition the rot was more prominent near log ends than in other parts of the logs. However, there was no correlation between the presence of rot and the wood species (Norway spruce or European fir), the diameter of the logs or the age of the crib dams.

In the vicinity of steel nails, which are commonly used to connect the logs in crib dams, the wood shows a distinctly higher iron content. Iron in turn promotes fungal growth. In an experiment, wood specimens were soaked in an aqueous solution of $FeCl_3$ in order to obtain an iron content comparable to that in wood near a steel nail. *Fomitopsis pinicola* decomposed the treated specimens significantly faster than the untreated ones.

In a case study the loading capacity of several 60-year-old crib dams was determined in the field. Single logs were subjected to bending tests. The results showed that all tested logs could have withstood the forces upon which the structural design is commonly based. Even if this result needs to be corroborated by further research, it could be shown that wood as building material of check dams can still meet the technical requirements after several decades of service.

The results of the project show that in crib dams the activity of wood-decomposing fungi is strongly influenced by the prevailing specific ecological factors. This activity has a strong influence on the life span of log crib dams. Consequently, both the choice of building material and the planning and construction of the dams have to be based on the relevant ecological factors. Since the marked differences in decomposition of the various structural components make replacement or repair feasible, the aspect of maintenance must also be included in the planning process. Provided that these factors are given careful attention, wood will continue to serve as a suitable building material in torrent control, combining its good technical properties with the undisputed ecological advantages such as relatively simple production and processing and a favourable ecobalance.

1 Einleitung

1.1 Holz als Werkstoff im Wildbachverbau

Der Lebensraum in Gebirgstälern wird von Wildbächen geprägt (Kotoulas 1972, Aulitzky *et al.* 1994, Braschler 1995). Überschwemmungen, Erosion und Murgänge stellen für die oft intensiv genutzten Talräume der Alpen eine ständige Gefahr dar. Verschiedene Ereignisse der letzten Jahre zeigen, dass die stetig wachsende Nutzung der Alpentäler das Schadenpotential erhöht und damit auch das Bedürfnis nach Schutzmassnahmen ansteigt (Gottschling 1998, Hess 1998, Noetzli 1999, Rickli 2001).

Wildbäche sind Gewässer, welche folgende Eigenschaften aufweisen (nach DIN 19663, 1985):

- Streckenweise grosses Gefälle,
- Rasch und stark wechselnder Abfluss,
- Zeitweise hohe Feststoffführung.

Wasser- und Geschiebehaushalt von Wildbächen unterliegen also einer grossen Dynamik, welche von den Faktoren Niederschlag, Geologie, Relief, Bodeneigenschaften und Vegetation beeinflusst wird (Kienholz *et al.* 1998). Die Komplexität sowie die Wechselwirkungen dieser Faktoren können plötzliche und heftige Reaktionen eines Wildbach-Systems im Bezug auf den Abfluss sowie den Geschiebetransport hervorrufen (Mani 1999). Die Folgen davon sind die eingangs genannten Ereignisse mit zerstörerischer Wirkung auf Siedlungen und Infrastruktur.

Abbildung 1.1: Wildbachverbauung aus Holz bei Stalden (OW). Eine Abtreppung des Gerinnes minimiert die Erosion im Bachbett und trägt so auch zur Stabilisierung der seitlichen Einhänge bei.

Der Zusammenhang zwischen Gerinneneigung, Abflussverhalten und Geschiebetransport in Wildbacheinzugsgebieten wurde schon früh erkannt und daraus die Notwendigkeit von Schutzmassnahmen zur Erhaltung des Lebensraums in den Alpentälern abgeleitet (Seckendorff 1886, Schindler 1888, Plattner 1974, Hess & Wüthrich 1997). Zentrales Element derartiger Massnahmen ist die stufige Ausgestaltung der Gerinnesohle zur Verringerung der Erosionskraft des Wassers. Dazu werden Querwerke in die Gerinne eingebaut (Abbildung 1.1). Zweck dieser Bauwerke ist die Verringerung des Gefälles zwischen den einzelnen Werken, um die Erosion an der Gerinnesohle zu minimieren und den Geschiebetransport auch bei Hochwasser einzuschränken (Müller 1943, Strele 1950, Hampel 1974). Als Folge davon werden auch die seitlichen Böschungen des Gerinnes stabilisiert, indem deren Hangfuss nicht mehr ständiger Erosion ausgesetzt ist. Insbesondere in Kombination mit Entwässerungs- und Hangsicherungsmassnahmen (Böll 1997, Florineth 2000) resultiert aus der Gerinneverbauung eine Reduktion des Feststoffeintrags ins Gerinne und damit eine wesentliche Verringerung des Gefahrenpotentials des Baches.

Als Baumaterialien für Wildbachsperren werden Stein, Holz, Beton und Stahlbeton verwendet. Die zu Beginn der Verbautätigkeit in Wildbachgerinnen am häufigsten eingesetzten Werkstoffe Stein und Holz wurden ab den 30er und 40er Jahren des 20. Jahrhunderts vermehrt durch Beton- und Stahlbeton ersetzt (Bock *et al.* 1949). In der Folge nahm die Bedeutung von Bachsperren aus Holz ab, und die handwerklichen Fertigkeiten zu deren Erstellung gingen teilweise verloren (Böll *et al.* 1999). Seit einigen Jahrzehnten wird Holz wieder vermehrt für Wildbachsperren in kleineren Gerinnen eingesetzt (Hirt 1990, Böll *et al.* 1999, Frei & Böll 2001). In Abbildung 1.2 sind die beiden häufigsten Konstruktionsweisen schematisch dargestellt.

Holz hat gegenüber den übrigen Baustoffen verschiedene Vorteile. Meist kann es vom lokalen Forstdienst bereitgestellt werden, oft sogar im zu verbauenden Gerinne, wodurch sich sehr kurze Transportdistanzen ergeben. Zudem weist Holz bei relativ geringem Gewicht eine hohe Festigkeit auf (Reinhardt 1973) und kann auch in setzungsempfindlichen Böden verwendet werden, wo

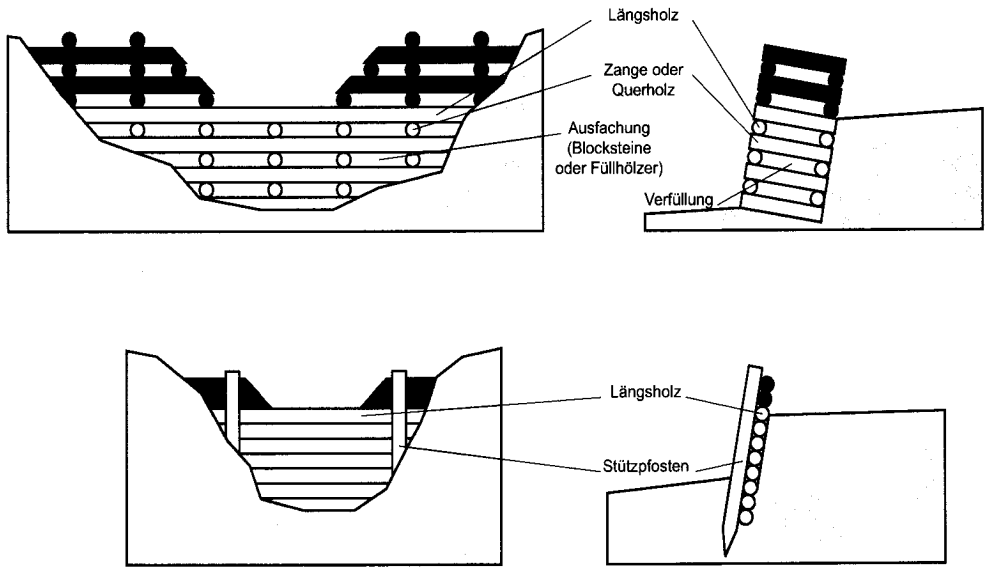


Abbildung 1.2: Querwerke aus Holz in Wildbachgerinnen. Schematische Darstellung der zwei häufigsten Holzkonstruktionen nach Böll *et al.* (1999), verändert. Oben: Holzkastensperre; Unten: Einwandige Wildbachsperre. Links: Talseitige Ansicht der Sperre; Rechts: Querschnitt (Fliessrichtung des Baches von rechts nach links). Die grau dargestellten Bauteile werden als Sperrenflügel, die weissen als Sperrenkörper bezeichnet.

der Einsatz von Beton oder Stahlbeton nicht möglich ist (Zeller & Röthlisberger 1987). Nicht zuletzt passen sich Holzverbauungen relativ gut ins Landschaftsbild ein (Marui 1996). Dadurch, und in seiner Eigenschaft als natürlicher, nachwachsender Rohstoff, entspricht Holz der Forderung aus dem Schweizer Waldgesetz[1] nach möglichst naturnahen Verbaumethoden am besten.

Die hauptsächlichen Nachteile von Holz im Bachverbau sind einerseits seine geringe mechanische Widerstandskraft gegenüber Abrasion durch Geschiebe sowie seine begrenzte Dauerhaftigkeit. Dem ersten dieser Punkte kann durch einen Einsatz von Holz in Gerinnen mit relativ geringem Geschiebetrieb oder durch einen mechanischen Schutz der exponierten Bauteile begegnet werden (Strele 1950, Zeller & Röthlisberger 1987, Böll *et al.* 1999). Der zweite Punkt – die beschränkte Dauerhaftigkeit – ergibt sich aus dem Umstand, dass unbehandeltes, im Freien verbautes Holz immer ein Teil des natürlichen Stoffkreislaufes bleibt. Damit ist es verschiedenen abiotischen und biotischen Einflussfaktoren ausgesetzt, welche seine mechanischen Festigkeitseigenschaften beeinträchtigen. Als Beispiele abiotischer Faktoren seien Temperatur- und Feuchteschwankungen, UV-Strahlung oder der genannte mechanische Abrieb durch Geschiebe angeführt. Viel rascher erfolgt jedoch der Abbau von Holz, wenn Organismen wie Nagetiere, Insekten, Pilze und Bakterien beteiligt sind (Grosser 1985, Schmidt 1994). Den holzzerstörenden Pilzen kommt dabei aus wirtschaftlicher Sicht die weitaus grösste Bedeutung zu (Rypácek & Jahn 1966, Graf 1997a). Das Auftreten von Pilzbefall ist denn auch für die Funktionsdauer von Holzkonstruktionen oft entscheidend (Willeitner 1981).

Die zu erwartende Funktionsdauer von Holzsperren wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich eingeschätzt. Die Angaben in der Literatur schwanken zwischen 20 – 30 Jahren (ohne Angabe der Holzart) (Hirt 1990, Länger 1999) und 40 – 60 Jahren (für Weisstanne) (Zeller 1987), wobei auch Fälle von bis zu 100 Jahre alten, funktionstüchtigen Sperren bekannt sind (Zeller & Röthlisberger 1987). In der zuletzt erwähnten Studie wird für einen Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Holzsperren gegenüber Betonsperren von einer mittleren Funktionsdauer von 50 Jahren ausgegangen.

Diese grosse Variation lässt vermuten, dass der Abbau des verbauten Holzes von verschiedenen standortsspezifischen Faktoren abhängt. Einmal sind dies je nach Gerinne unterschiedliche äussere Einflüsse wie Geschiebetrieb oder Murgänge. Vor allem aber können variierende ökologische Bedingungen die Aktivität holzzerstörender Organismen entscheidend beeinflussen (Cooke & Rayner 1984, Zabel & Morrell 1992). Um eine möglichst lange Funktionsdauer der Bauwerke zu erreichen, müssen deshalb Massnahmen getroffen werden, welche die Entwicklung dieser Organismen – insbesondere der holzabbauenden Pilze – möglichst stark hemmen.

Da chemischer Holzschutz im Bereich von Fliessgewässern in der Schweiz verboten ist[2], kommen an Bachsperren nur konstruktive Massnahmen in Frage, um den natürlichen Abbauprozess durch holzzerstörende Pilze zu verlangsamen oder zu verhindern. Diesbezüglich liegen aus der Praxis zahlreiche, zum Teil auch kontrovers diskutierte Empfehlungen und Erfahrungen vor (Rickli 1997, Böll *et al.* 1999). Schattige, nordexponierte Gerinne gelten als günstige Standorte für Holzkonstruktionen im Bachverbau. Zudem wird sowohl der verwendeten Holzart oder dem Jahrringbau der Rundhölzer als auch dem Zeitpunkt des Holzeinschlags (Jahreszeit, Mondphase) eine wichtige Rolle für die Dauerhaftigkeit der Sperren zugesprochen (Gäumann 1930, Briemle

[1] Art. 19, Bundesgesetz über den Wald, SR 921.0.
[2] Anhang 4.4, Art. 3 Abs. 2, Verordnung über umweltgefährdende Stoffe, SR 814.013.

1997). Verschiedene ausführungstechnische Details (z.B. Verbau in bzw. ohne Rinde, Art der verwendeten Nägel) werden ebenfalls als entscheidend für eine verlängerte Funktionsdauer betrachtet (Pagnoncini 1988, Ammann 1997).

Zur Ökologie der wichtigsten holzzerstörenden Organismen, der saproben Pilze, liegen zahlreiche Arbeiten an verschiedenen Holzkonstruktionen vor, so beispielsweise an Zaunpfählen oder Leitungsmasten (Käärik 1968, Highley 1984b, Morrell & Zabel 1985, Eslyn 1986, Sexton *et al.* 1992, Morrell *et al.* 1996), an Grubenhölzern (Levy & Lloyd 1960, Eslyn & Lombard 1983, Ritter 1990), oder an Lawinenverbauungen (Wälchli *et al.* 1986). Auch wurde der Holzabbau unter sehr feuchten Bedingungen verschiedentlich untersucht, so an Holzkonstruktionen in Kühltürmen (Udaiyan & Manian 1991, Van Acker & Stevens 1996, Schmidt *et al.* 1997) oder bei der Nasslagerung von Rundholz (Metzler 1994, Gross *et al.* 1996, Webber & Gibbs 1996).

Untersuchungen zur Pilzflora und zur Ökologie der Pilzarten an Wildbachsperren – wo das Holz im Unterschied zu den oben genannten Holzkonstruktionen in schlagfrischem Zustand verbaut wird – wurden bisher mit Ausnahme der Arbeit von Graf (1997b) nicht durchgeführt. Quantitative Angaben zum Holzzustand an Wildbachsperren liegen bisher nur aus der Studie von Zeller & Röthlisberger (1987) vor. Diese beschränkt sich auf eine optische Beurteilung des Holzes.

Verglichen mit der grossen ausführungstechnischen Erfahrung aus der Verbaupraxis sind zur eigentlichen Ursache einer reduzierten Funktionsdauer der Sperren – dem Holzabbau durch fäuleerregende Pilze – kaum Angaben vorhanden. Es fehlen also Grundlagenkenntnisse zu den beteiligten Pilzarten sowie deren Ansprüche an ihren Lebensraum. Dieses Wissen stellt jedoch die Basis zielgerichteter Massnahmen zur Verlängerung der Funktionsdauer der Werke dar.

1.2 Zielsetzungen und Forschungsfragen

Die Ziele der vorliegenden Arbeit ergeben sich aus dem Bedürfnis, den Holzabbau durch Pilze an Wildbachsperren besser zu verstehen. Da noch praktisch keine Daten über Fäuleerreger an Wildbachsperren vorliegen, wurden verschiedene, insbesondere technisch relevante Problemstellungen bezüglich der Holzzerstörung durch Pilze bearbeitet. Dadurch wird einerseits ein Beitrag zum Verständnis der Entwicklung des Holzzustandes von Bachsperren geleistet, andererseits werden aber auch Grundlagen für gezielte Massnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer der Holzkonstruktionen geschaffen. Zudem sollen die Ergebnisse Ansätze für weitere Forschungsarbeiten zur Funktionsdauer und zum Langzeitverhalten der Bauwerke liefern.

Folgende Forschungsfragen dienten als Ausgangspunkte für die vorliegende Arbeit:

- Welches sind die wichtigsten Fäuleerreger an Holzkonstruktionen im Wildbachverbau und wie breiten sie sich auf den Bauwerken aus?
- Welche Faktoren sind für die Entwicklung des Holzzustands an Bachsperren massgebend?
- Welchen Einfluss haben die spezifischen Feuchteverhältnisse an Wildbachsperren auf den Holzabbau durch Pilze?
- Wird die Holzzerstörung durch Pilze durch freigesetztes Eisen aus Verbindungsnägeln beeinflusst?
- Wie gross ist die Tragsicherheit von Wildbachsperren mehrere Jahrzehnte nach dem Bau?

1.3 Aufbau der Arbeit

Die oben genannten Forschungsfragen werden in fünf Kapiteln (2 bis 6) separat bearbeitet. Jedes Kapitel umfasst die detaillierte Fragestellung, eine Übersicht über den aktuellen Forschungsstand, Methodik und Resultate der eigenen Untersuchungen sowie eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse. Die wichtigsten Resultate werden im Schlusskapitel (7) zusammengefasst und ihre Konsequenzen für konstruktive Massnahmen in der Verbaupraxis diskutiert.

Nachfolgende Kurzbeschreibung zeigt die Schwerpunkte der Kapitel auf.

Kapitel 2: An neun ausgewählten Wildbachperren wurde die Pilzflora untersucht und die häufigsten Fäuleerreger bestimmt. Zudem wurden anhand der Besiedlungsmuster und Populationsstrukturen dieser Pilzarten bevorzugt besiedelte Bauteile und Infektionswege identifiziert.

Kapitel 3: An den Untersuchungsobjekten von Kapitel 2 wurde der Holzzustand mit einem nicht destruktiven Verfahren bestimmt. Anschliessend wurde der Einfluss verschiedener Umweltparameter auf den Holzzustand mit einem statistischen Modell analysiert.

Kapitel 4: Aufgrund der Ergebnisse der Studien in Kapitel 2 und 3 wurde die Hypothese aufgestellt, dass an frisch verbautem Holz von Wildbachsperren das Überflutungsregime die Aktivität von Fäuleerregern entscheidend beeinflusst. Diese Hypothese wurde experiementell überprüft.

Kapitel 5: Eisen hat als Spurenelement einen Einfluss auf den Stoffwechsel von Pilzen. Rundhölzer im Wildbachverbau werden mit Stahlnägeln verbunden. Daraus ergibt sich die Frage, welchen Einfluss die Nägel auf den Eisengehalt des Holzes haben und wie sich letzterer auf holzzerstörende Pilze auswirkt. Diese Fragestellung wurde in einer Laborstudie untersucht.

Kapitel 6: Die Tragsicherheit von Wildbachsperren nimmt mit fortschreitender Zersetzung des Holzes ab. Wie gross der Tragwiderstand der Rundhölzer von alten Werken noch sein kann, wurde in einer Fallstudie an drei 60-jährigen Sperren mit einer destruktiven Methode unter Feldbedingungen geprüft.

2 Fäuleerreger an Holzkonstruktionen im Wildbachverbau: Identifikation dominierender Pilzarten und Analyse von Besiedlungsmustern

2.1 Einleitung

Pilze spielen bei der Zersetzung und der Remineralisierung von Totholz in Waldökosystemen eine zentrale Rolle (Rayner & Boddy 1988). Auch verbautes Holz im Freien unterliegt grundsätzlich diesem Stoffkreislauf (Graf 1997a). Aus technischer Sicht kommt dabei jenen holzbewohnenden Pilzarten die grösste Bedeutung zu, welche im Holz eine Fäule verursachen. Unter einer Fäule wird nachfolgend im Sinne von Zabel & Morrel (1992) sowohl der physikalische Zustand des Holzes unter der Einwirkung holzzerstörender Pilze wie auch der Abbauprozess selbst verstanden. Die daran beteiligten Pilzarten werden als Fäuleerreger bezeichnet.

Holz besteht in erster Näherung zu 45% aus Zellulose, zu 20-30% aus Hemizellulosen sowie zu 20-30% aus Lignin (Fengel & Wegener 1984). Fäuleerreger können diese Komponenten je nach Art unterschiedlich verwerten. Generell werden drei Typen von Holzfäulen unterschieden: Braunfäulen, Weissfäulen und Moderfäulen. Die physiologischen und chemischen Grundlagen des Holzabbaus der genannten Fäuletypen sind in verschiedenen Arbeiten detailliert beschrieben (Kirk 1973, Käärik 1974, Eriksson *et al.* 1990, Zabel & Morrell 1992, Schwarze *et al.* 2000b). An diesen Arbeiten orientiert sich der folgende kurze Überblick über die Fäuletypen und die daran beteiligten Artengruppen.

Bei einer *Braunfäule* werden in erster Linie Zellulose sowie Hemizellulosen abgebaut. Das Lignin bleibt nahezu unverändert zurück oder wird teilweise chemisch verändert. Das Holz zerfällt im Endstadium würfelförmig und nimmt eine charakteristische braune Färbung an. Braunfäulen werden durch Basidiomyceten verursacht und treten vorwiegend an Nadelholz auf (Rayner & Todd 1979, Watling 1982, Gilbertson & Ryvarden 1986).

Bei *Weissfäulen* werden alle Holzkomponenten abgebaut. Nach der zeitlichen Abfolge des Abbaus dieser Komponenten werden Simultanfäulen oder selektive Weissfäulen unterschieden. Während bei einer Simultanfäule alle Komponenten des Holzes gleichzeitig und von Beginn an verwertet werden, kommt es bei selektiven Weissfäulen zunächst zu einem stärkeren Abbau des Lignins, wodurch die Holzsubstanz eine weissliche Farbe annimmt (Schmidt 1994). Weissfäulen werden zum grössten Teil von Basidiomyceten verursacht. Auch einzelne Ascomyceten (*Xylariaceae*) verursachen sehr ähnliche Fäulen (Sutherland & Crawford 1981, Abe 1989). Das Grundgerüst des Gewebes bleibt bei diesen Fäulen in Form der Mittellamellen erhalten, weshalb sie heute zu den Moderfäuleerregern gezählt werden (Schwarze et al. 2000b). Simultane Weissfäulen treten bevorzugt an Laubholz auf (Schwarze et al. 2000b). An Nadelholz kommen häufiger selektive Weissfäulen vor, verursacht z.B. durch *Heterobasidion annosum* (Greig 1998), *Physisporinus vitreus* (Schmidt *et al.* 1997, Schwarze & Landmesser 2000) oder *Phellinus pini* (Blanchette *et al.* 1994).

Die dritte Art von Fäulen, die *Moderfäulen*, bauen primär Kohlenhydrate ab. Lignin wird oft erst in einem späten Stadium der Fäule verwertet. Charakteristisch für Moderfäulen ist ein lokaler Zellwandabbau in der S2-Schicht (Savory 1954, Corbett 1965, Hale & Eaton 1985a, b). Generell wird zwischen Moderfäulen des Typs 1 und 2 differenziert. Beim Typ 1 werden kavernenartige

Vertiefungen in der S2-Schicht der Zellwand gebildet, während beim Typ 2 die Zellwand vom Lumen her nach aussen erodiert wird. Typ 2 tritt bei Nadelholz nur selten auf (Schwarze 1995, Schwarze *et al.* 2000b). Moderfäuleerreger befallen sowohl Laub- wie auch Nadelholz, wobei letzteres generell als weniger anfällig eingeschätzt wird (Duncan 1960, Eriksson *et al.* 1990). In älteren Studien werden primär Deuteromyceten (Liese 1964, Levy & Stevens 1965) sowie einige Ascomyceten (Takahashi 1978, Nilsson *et al.* 1989) als Verursacher von Moderfäuleerregern genannt. Neuere Untersuchungen stellten jedoch auch Basidiomyceten fest, welche neben Braun- auch Moderfäulen verursachen können (Daniel *et al.* 1992, Schwarze *et al.* 1995, Schwarze *et al.* 2000a).

Fäulen verändern die physikalischen Eigenschaften von Holz grundlegend (Richards 1954, Schwarze 1995). Neben verändertem Schwind- oder Sorpitonsverhalten werden insbesondere die Festigkeitseigenschaften durch die Auflösung der Mikrostrukturen der verholzten Zellwände reduziert (Armstrong & Savory 1959, Scheffer 1973). Holzkonstruktionen, an welchen Fäulnis auftritt, können somit früher oder später den Anforderungen bezüglich Funktionalität nicht mehr genügen. Die Funktionsdauer jeglicher Holzkonstruktionen im Freien ist deshalb massgeblich vom Auftreten holzzerstörender Pilze abhängig. Verschiedene Untersuchungen zeigen eine besondere Anfälligkeit von verbautem Holz in Erdkontakt oder im Bereich von Spritzwasser (Gersonde & Meyer 1964, Levy 1968, Highley 1984b, Schmitt 2000). An Holzkonstruktionen in Wildbachgerinnen, wo das Holz in frischem Zustand verbaut wird, stellen solche Bedingungen jedoch den Normalfall dar, weshalb holzzerstörende Pilze einen massgebenden Einflussfaktor für die Lebensdauer dieser Bauwerke darstellen können (Zeller & Röthlisberger 1987, Böll *et al.* 1999).

Die Zersetzung verbauter Rundhölzer durch Fäuleerreger kann sowohl die langfristige Sicherheit von Holzsperren als auch die Wirtschaftlichkeit von Holz gegenüber anderen Materialien in Frage stellen (Länger 1999). Da die Gesetzgebung in der Schweiz[1] den Einsatz chemischer Schutzmittel im Bereich von Gewässern verbietet, müssen andere Massnahmen getroffen werden, um einen frühzeitigen Zerfall der Bauwerke zu verhindern. Hierzu gehören die Methoden des konstruktiven Holzschutzes, welche grundsätzlich auf der Vermeidung von für Fäuleerreger günstigen ökologischen Bedingungen beruhen (Cartwright & Findlay 1958, Willeitner 1981, Janotta 1999).

Die Entwicklung der Holzfestigkeit verbauten Holzes bei Pilzbefall ist von den beteiligten Pilzarten (Fäuletyp) sowie von der Intenistät und der räumlichen Ausdehnung einer Fäule abhängig. Zudem haben Fäuleerreger artspezifische Ansprüche an das Substrat und die Umweltbedingungen (Rayner & Boddy 1988). Deshalb lässt sich die Wirksamkeit konstruktiver Holzschutzmassnahmen an Bachsperren letzlich nur dann beurteilen, wenn man die beteiligten Arten, deren Ökologie sowie Infektionswege und Ausbreitungsverhalten kennt. Über holzzerstörende Pilze im Wildbachverbau liegen bisher ausser der Arbeit von Graf (1997b) keine Daten vor. Das Ziel der vorliegenden Studie war es deshalb, zunächst grundlegende Informationen über die häufigsten Fäuleerreger an Bachsperren aus Holz zu gewinnen. Dabei wurden folgende Forschungsfragen gestellt:

- Welches sind die dominierenden Fäuleerreger an Wildbachsperren?
- Welche Bauteile der Sperren werden bevorzugt besiedelt?
- Wie viele Individuen einer Pilzart besiedeln eine Sperre und wie sind diese räumlich verteilt?

[1] Anhang 4.4, Art. 3 Abs. 2, Verordnung über umweltgefährdende Stoffe, SR 814.013.

2.2 Material und Methoden

2.2.1 Untersuchungsobjekte

Die Forstdienste der Kantone Glarus, Nidwalden, Obwalden und Schwyz gaben für die vorliegende Untersuchung Hinweise auf verbaute Wildbachgerinne, deren Sperren schon nach wenigen Jahren bis Jahrzehnten einen von Auge erkennbaren Pilzbefall (Fruchtkörper) aufwiesen. Aufgrund dieser Hinweise wurden in acht verschiedenen Gerinnen insgesamt neun Wildbachsperren ausgewählt (Tabelle 2.1 und Abbildung 2.1). In jedem Gerinne wurde eine repräsentative Sperre bestimmt, wobei sich die Sperren Nr. 1 und 2 im gleichen Gerinne befanden.

Tabelle 2.1: Untersuchungsobjekte (vergleiche auch Anhang II). Koordinaten aus der Schweizer Landeskarte 1:25'000. Blattnummern (Blatt Nr.):1132 Einsiedeln; 1133 Linthebene; 1171 Beckenried; 1174 Elm; 1190 Melchtal.

Nr.	Bezeichnung	Gemeinde, Kt.	Koordinaten	Blatt Nr.	Konstruktionsart	Baujahr
1	Trepsental, "Zufluss III", A	Vorderthal, SZ	713'225/221'150	1133	Holzkastensperren	1988
2	Trepsental, "Zufluss III", B					
3	Steingraben	Buochs, NW	674'675/200'700	1171	Einwandige Holzsperre	1992
4	Speichenrus	Engi, GL	731'000/205'150	1174	Holzkastensperre	1995
5	Chratzerlibach	Innerthal, SZ	708'600/219'325	1133	Holzkastensperre	1991
6	Dürrenbach	Beckenried, NW	677'400/201'075	1171	Einwandige Holzsperre	1993
7	Heitlibach	Altendorf, SZ	703'800/225'625	1132	Holzkastensperre	1993
8	Ebenmattgraben	Sarnen, OW	655'950/192'375	1190	Einwandige Holzsperre mit Längsverbau	1973
9	Seckigraben	Sachseln, OW	661'625/190'075	1190	Holzkastensperre mit Längsverbau	1973

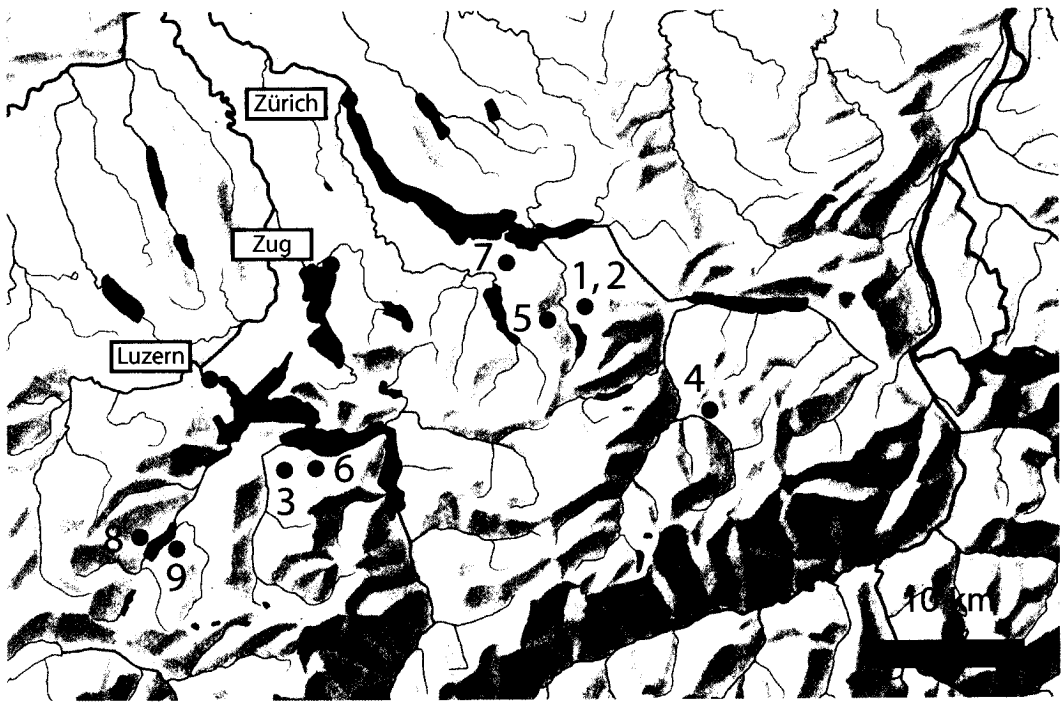


Abbildung 2.1: Geographische Lage der untersuchten Wildbachsperren. Die Nummern in der Karte entsprechen den Objektnummern in Tabelle 2.1.

Bei der Auswahl der Untersuchungsobjekte wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Alter der Sperre kleiner als 30 Jahre (Baujahr nach 1970).
- Funktionstüchtigkeit aufgrund visueller Beurteilung gegeben; mit Ausnahme von Abrasionserscheinungen der Abflussektion keine Beschädigung durch Murgang, Geschiebe oder Bodenbewegungen.
- Gemäss Angaben der Forstdienste verbaute Holzarten: Fichte (*Picea abies* L. Karst) oder Tanne (*Abies alba* Mill.).
- Fruchtkörper von Basidiomyceten vorhanden, ohne Berücksichtigung von Arten und Anzahl.
- Konstruktionsart der Sperre: Holzkasten oder einwandige Wildbachsperren (siehe Abbildung 1.2, S. 6)

Jede Sperre wurde zunächst im Massstab 1:50 skizziert. An den verbauten Rundhölzern wurden Probestellen im Abstand von rund 60 cm markiert (Abbildung 2.2). An den Enden der Rundhölzer – z.B. bei Füllhölzern der Ausfachungen oder bei Zangen (vergl. Abbildung 1.2, S. 6) – betrug der Abstand zur Stirnseite jeweils rund 10 cm. Die Probestellen an den Zangen befanden sich jeweils auf der Oberseite. An der Sperre Nr. 7 konnte aufgrund ihrer Grösse nur die eine Hälfte beprobt werden.

2.2.2 Kollektion von Fruchtkörpern und Holzproben

Der grösste Teil der Fäuleerreger an Nadelholz (Fichte, Tanne) gehört zu den Basidiomyceten (vergl. Kapitel 2.1). Die vorliegende Studie beschränkte sich dementsprechend auf die Vertreter dieser Pilzgruppe. Im Zeitraum zwischen November 1999 und September 2001 wurde jede Sperre einmal nach Pilzfruchtkörpern abgesucht. Alle am Holz der Sperren von Auge sichtbaren Fruchtkörper von Basidiomyceten wurden gesammelt und ihre Position auf der Skizze der Sperre eingetragen. Bei einfach bestimmbaren Arten mit grossen Fruchtkörpern (z.B. *Fomitopsis pinicola* (Sw.: Fr.) P. Karst[1]) wurde lediglich ein Stück mit dem Messer entnommen. Die gesammelten Fruchtkörper bzw. –stücke wurden in Papierbeuteln ins Labor gebracht und bis zur Weiterverarbeitung innert maximal 72 Stunden bei 4°C im Kühlschrank gelagert.

Um das Vorkommen von Myzelien im Holz zu erfassen, wurden den verbauten Stämmen an den markierten Probestellen in Anlehnung an Bazzigher *et al.* (1985) Bohrkerne von 10 cm Länge in horizontaler Richtung entnommen. Dazu kam ein Kernbohrer der Marke SUUNTO mit einem Innendurchmesser von 5 mm zum Einsatz, wie er auch für Zuwachsmessungen an stehenden Bäumen eingesetzt wird (Kramer & Akça 1995). Vor jeder Bohrung wurde der Bohrer in Ethanol (96%) eingetaucht und abgeflammt. Die Holzoberfläche der Bohrstelle wurde mit dem Messer gereinigt, mit Ethanol besprüht und ebenfalls abgeflammt. Wenn stark zersetztes Holz das Bohren verunmöglichte, diente ein Hohlbeitel zur Entnahme von Holzspänen aus ca. 5 cm Tiefe. Sämtliche Holzproben wurden in γ-sterilisierte Kunststoffröhrchen (Becton Dickinson, Le Pont de Claix F) verpackt und bis zur Weiterverarbeitung innert drei Tagen bei 4°C aufbewahrt.

[1] Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Nomenklatur entspricht, wenn nicht anders erwähnt, dem Ainsworth & Bisby's Dictionary of the Fungi (Kirk et al. 2001).

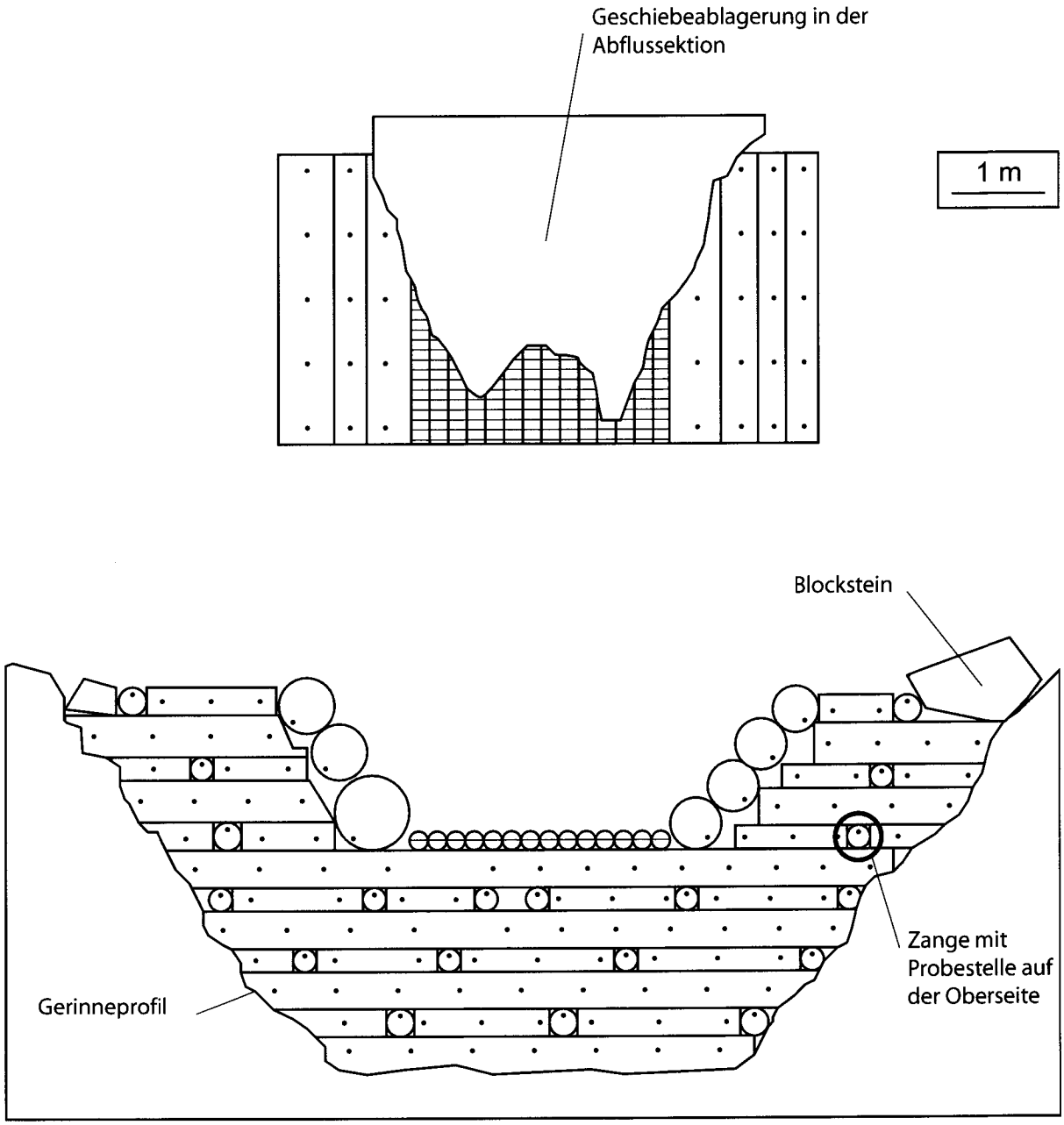


Abbildung 2.2: Schematische Sperrenskizze mit Aufnahmeraster (Sperre Nr. 2). Oben: Aufsicht der Flügel bzw. der Abflussektion. Unten: Frontalansicht der Sperre und Gerinneprofil. Die Untersuchungspunkte wurden in einem Abstand von 60 cm in der Mitte der verbauten Rundhölzern markiert. Die Probestellen an den Zangen befanden sich auf deren Oberseite, ca. 10 cm von der Stirnseite entfernt. In der Skizze sind sie an den Stirnseiten eingezeichnet. Schraffierte Rundhölzer: Nicht ausgewertet (Prügelrost als Abdeckung der Abflussektion).

2.2.3 Isolierung der Fäuleerreger

Zur Isolierung von Fäuleerregern aus dem Holz wurden die gesammelten Bohrkerne in zwei Teile geschnitten und in Petrischalen (Durchmesser 94 mm) auf Thiabendazol-Malzagar bei 20°C im Dunkeln inkubiert (Abbildung 2.3). Dieses selektive Kulturmedium lässt nur das Wachstum von Basidiomyceten und einigen Zygomyceten bzw. Hyphomyceten zu (Holdenrieder *et al.* 1994, Sieber 1995). Die Zusammensetzung aller verwendeten Kulturmedien ist in Tabelle 2.2 angegeben. Von den gesammelten Fruchtkörpern wurden kleine Stücke von rund 1·1·1 mm aus der Trama herausgeschnitten und unter denselben Bedingungen wie die Bohrkerne auf Thiabendazol-Malzagar inkubiert.

Nach 10 Tagen wurden alle Petrischalen kontrolliert. In den Agar auswachsende Myzelien wurden auf 2% (g/l) Malzagar-Platten überimpft und Reinkulturen der vorhandenen Basidiomyceten hergestellt (Abbildung 2.4). Wo aus einem Bohrkern morphologisch verschiedene Myzelien herauswuchsen, wurde pro Myzel eine Reinkultur hergestellt. Analog wurde vorgegangen, wenn sich mehrere Myzelien gleicher Morphologie voneinander abgrenzten (Abbildung 2.5). Wenn ein Myzel ein anderes innerhalb von 10 Tagen vollständig überwuchs, konnte nur noch das dominierende der beiden für die weiteren Untersuchungen verwendet werden. Dies war jedoch in weniger als 1% aller Petrischalen der Fall.

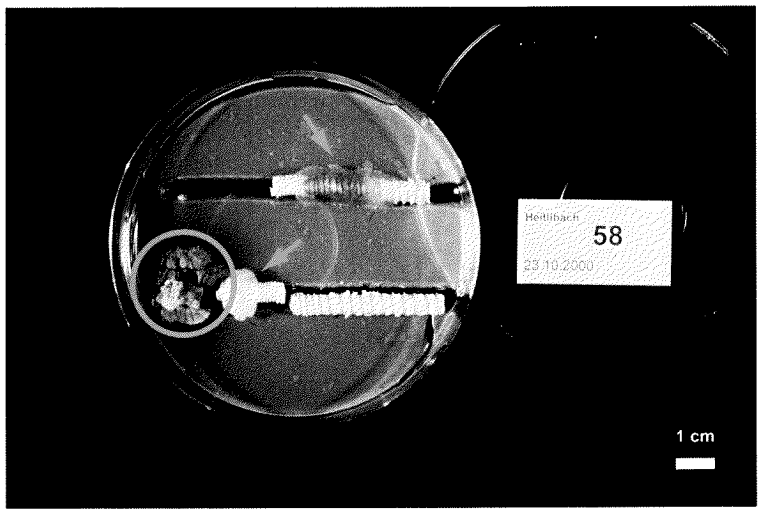


Abbildung 2.3: Bohrkern auf Thiabendazol-Agar. Der ca. 10 cm lange Bohrkern wurde aufgrund des Durchmessers der Petrischale (94 mm) zweigeteilt. Um eine grössere Kontaktfläche zwischen Holz und Medium zu erreichen, wurden die Bohrkerne in hierzu in den Agar geschnittene Kerben gelegt. Beim Myzel links in der Petrischale (O) handelt es sich um ein Isolat eines Basidiomyceten (*Armillaria cepistipes*). Im Gegensatz zu den übrigen Myzelien von Ascomyceten (Pfeilspitzen), welche sich nur auf dem Holz entwickelten, kann der Basidiomycet im Selektivmedium wachsen.

Tabelle 2.2: Zusammensetzung der verwendeten Kulturmedien und Verwendungszwecke in vorliegener Studie.

Thiabendazol-Malzagar (Sieber 1995)	
Zusammensetzung: - 20 g/l Malz Malzextrakt Diamalt „trocken", Hindelbank, CH - 15 g/l Agar, Typ 2521, Behrens & Co., Hamburg, D - 230 mg/l Thiabendazol (2-(1,3 thiazol-4-yl)benzimidazol) gelöst in 1 ml konz. Milchsäure, Zugabe nach Autoklavierung - 1 l Leitungswasser	**Verwendung:** - Isolation von Basidiomyceten aus Bohrkernen und Fruchtkörpern
2%-Malzagar	
Zusammensetzung: - 20 g/l Malz Malzextrakt - 15 g/l Agar - 1 l Leitungswasser	**Verwendung:** - Herstellung von Reinkulturen zur Bestimmung der Myzelien - Kompatibilitäts-Tests

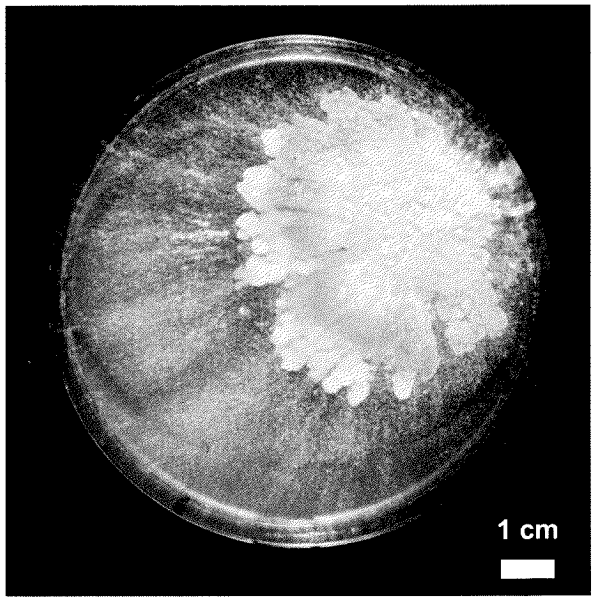


Abbildung 2.4: Reinkultur eines Fäuleerregers (*Gloeophyllum sepiarium*) auf 2% Malzagar.

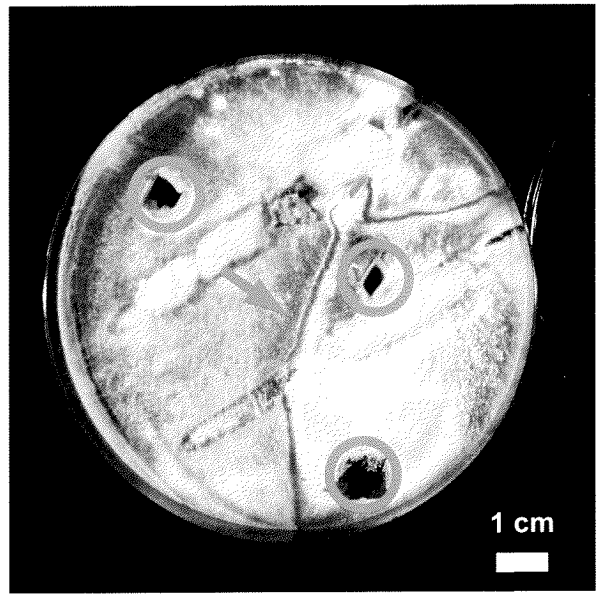


Abbildung 2.5: Beispiel für einen Bohrkern, welcher mehrere Myzelien derselben Pilzart (*Fomitopsis pinicola*) aufwies. In diesem Fall begannen sich die Myzelien bereits auf dem Thiabendazol-Agar voneinander abzugrenzen (Pfeil). Schale nach einem Monat Inkubationszeit. Die Kreise bezeichnen Stellen, wo ein Inokulum zur Herstellung einer Reinkultur entnommen wurde.

2.2.4 Bestimmung und Häufigkeiten der Pilzarten

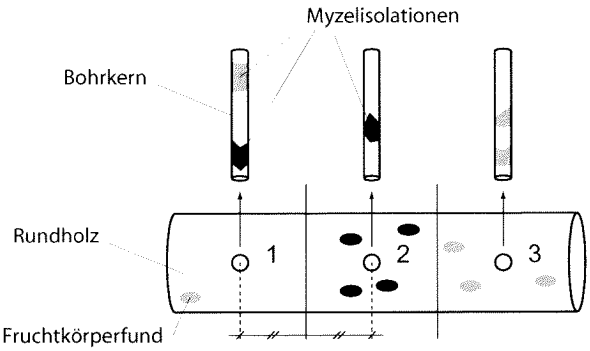
Zur Bestimmung der Pilzarten wurden die Reinkulturen zunächst anhand der Myzelmorphologie gruppiert. Anschliessend erfolgte eine Bestimmung der Myzelien anhand mikroskopischer Merkmale mit dem Identifikationsschlüssel für holzbewohnende Basidiomyceten von Stalpers (1978). Gruppierungen von weniger als 30 Isolaten (< 4% aller Isolate aus Bohrkernen) wurden in der Regel nicht identifiziert und nur mit einer Nummer versehen. Einige selten vorkommende Arten mit auffälligen Merkmalen konnten aber ebenfalls bestimmt werden. Die Artbestimmung innerhalb der Gattung *Armillaria* erfolgte nach dem Verfahren von Buller (1958) durch die Paarung der gefundenen diploiden Myzelien mit haploiden Testisolaten auf 2% Malzagar (Korhonen 1978). Die Myzelien wurden mit je drei haploiden Testern von *Armillaria borealis* Marxm. & Korhonen , *A. cepistipes* Velen, *A. gallica* Marxm. & Romagn, *A. mellea* (Vahl.: Fr.) P. Kumm. und *A. ostoye* (Romagn.) Herink konfrontiert (vergl. Legrand & Guillaumin 1993). Die speziell für diese Zwecke selektierten Tester wurden von J.J. Guillaumin (INRA, Clermont-Ferrand Cedex) zur Verfügung gestellt.

Die Bestimmung der Fruchtkörper erfolgte mittels verschiedener Schlüssel und Bestimmungsbücher (Carmichael *et al.* 1980, Jülich 1984, Breitenbach & Kränzlin 1986a, b, Hjortstam *et al.* 1988, Ryvarden & Gilbertson 1993). Die Ergebnisse wurden anhand der aus den Fruchtkörpern gewonnenen Reinkulturen verifiziert. Nach erfolgreicher Isolierung und Bestimmung wurden die Fruchtkörper getrocknet und archiviert.

Der Fund von mindestens einem Fruchtkörper oder Myzel an einer Probestelle wurde als Nachweis der betreffenden Art definiert. Die gesammelten Fruchtkörper wurden dabei der am nächsten liegenden Probestelle zugeordnet (Abbildung 2.6). Die Vernachlässigung der Anzahl der gefundenen Fruchtkörper oder Myzelien pro Art an derselben Probestelle verhinderte eine zu starke Gewichtung von Arten mit vielen kleinen Fruchtkörpern. Zur Definition der relativen Häufigkeit einer bestimmten Art diente die Anzahl Nachweise gemessen an der Gesamtzahl der Probestellen.

2.2.5 Besiedlungsmuster

Erfahrungen aus der Verbaupraxis wiesen bisher auf eine besondere Gefährdung der Einbindungen und der Flügel hin (Wenzel 1990, Frei & Böll 2001). Eigene Beobachtungen zeigten, dass Fruchtkörper vor allem an den Sperrenflügeln vorkamen. Da in dieser Studie zusätzlich zur Beobachtung von Fruchtkörpern eine umfangreiche Sammlung von Pilzmyzelien aus dem Holz vorlag, konnte geprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Basidiomyceten und dem Bauteil vorliegt. Dazu wurden alle Probestellen einem der drei Bauteile „Flügel", „Einbindung" und „Wasserbereich" zugeordnet (Abbildung 2.7). Die Flügel umfassten dabei alle Rundhölzer oberhalb der Überfallkante des Wassers mit Ausnahme der untersten Lage längs dem Wasserfluss, welche dem Bauteil Wasserbereich zugeordnet wurde. Die Abgrenzung zwischen Einbindung und Wasserbereich wurde ausgehend von den Eckpunkten der Abflussektion in einem Winkel von 15° von der Vertikalen festgelegt (vergl. Abbildung 2.7), was ungefähr der



	Probestellen			
Arten	1	2	3	Total
A	1	0	1	2
B	1	1	0	2

Abbildung 2.6: Zählmethode zur Bestimmung der Häufigkeit der Pilzarten. Oben: Schematische Darstellung eines Rundholzes mit Funden zweier Arten (A und B). Die Fruchtkörper wurden der am nächsten liegenden Probestelle zugeordnet. Unten: Unabhängig von der Anzahl Funde (Fruchtkörper und Myzelien) wurde für jede Probestelle ermittelt, ob eine Art vorkam oder nicht (= Nachweis). Im Beispiel resultieren also für die Arten A und B je zwei Nachweise an diesem Rundholz.

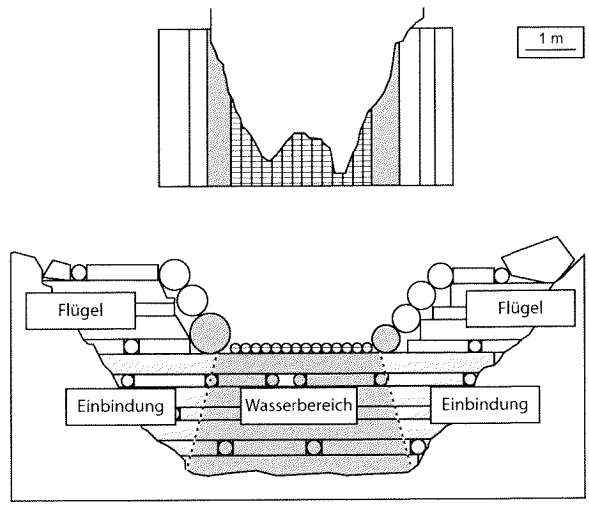


Abbildung 2.7: Zuordnung der Untersuchungspunkte zu den Bauteilen „Flügel", „Einbindung" sowie „Wasserbereich" (Sperre Nr. 2). Schraffierte Rundhölzer: Nicht untersucht.

Ausbreitung des Wasserstrahls unterhalb der Überfallkante entspricht (Böll 1997). Anschliessend wurde geprüft, ob sich diese drei Bereiche in der Häufigkeit des Auftretens von Basidiomyceten unterscheiden. Die Nullhypothese lautet dabei H_0: *Basidiomyceten treten an allen Bauteilen gleich häufig auf.* Die Überprüfung dieser Hypothese erfolgte mit einer Mehrfeldertafel (X^2-Test, $p < 0.05$).

Die Besiedlungsmuster der häufigsten Fäuleerreger wurden anhand der Ausdehnung ihrer Thalli im Holz der Sperren untersucht. Hierzu wurden die Isolate der vier häufigsten Arten auf somatische (vegetative) Kompatibilität getestet (VC-Test). Anhand dieser Tests kann geprüft werden, ob sich heterokaryotische Isolate von Basidiomyceten innerhalb einer Art genetisch unterscheiden (Malik & Vilgalys 1999). Dabei werden zwei bis drei Isolate auf einem Nährmedium inokuliert und nach einigen Wochen die Kontaktzone der Kulturen auf Abgrenzungsreaktionen untersucht (Abbildung 2.8). Inkompatible bzw. genetisch verschiedene Isolate zeigen Reaktionen in der Kontaktzone. Kompatible Myzelien hingegen verschmelzen ohne deutliche Reaktion (Mounce 1929, Carroll & Wicklow 1992, Luschka 1993). Die räumliche Ausdehnung von Pilzthalli im Substrat lässt sich anschliessend anhand der kompatiblen Isolate einer Art – unter Berücksichtigung ihrer Fundstellen – abschätzen (Worrall 1997).

Zu Beginn der Studie wurden nach dem Verfahren von Mounce (1929) pro Petrischale zwei Inokuli (Ø ca. 4 mm) von Isolaten derselben Art im Abstand von ca. 1.0 cm im Zentrum der Schale plaziert. Nach Vorversuchen wurden jedoch in der Folge jeweils drei Isolate in derselben Petrischale gegeneinander getestet (vergl. Abbildung 2.8), wodurch sich der Materialaufwand im Vergleich zur Kombination von zwei Isolaten pro Schale um rund zwei Drittel reduzierte. Nach einer Inkubation während 20 Tagen bei Raumtemperatur (23°C) in Dunkelheit erfolgte die Prüfung der Kulturen auf Abgrenzungsreaktionen.

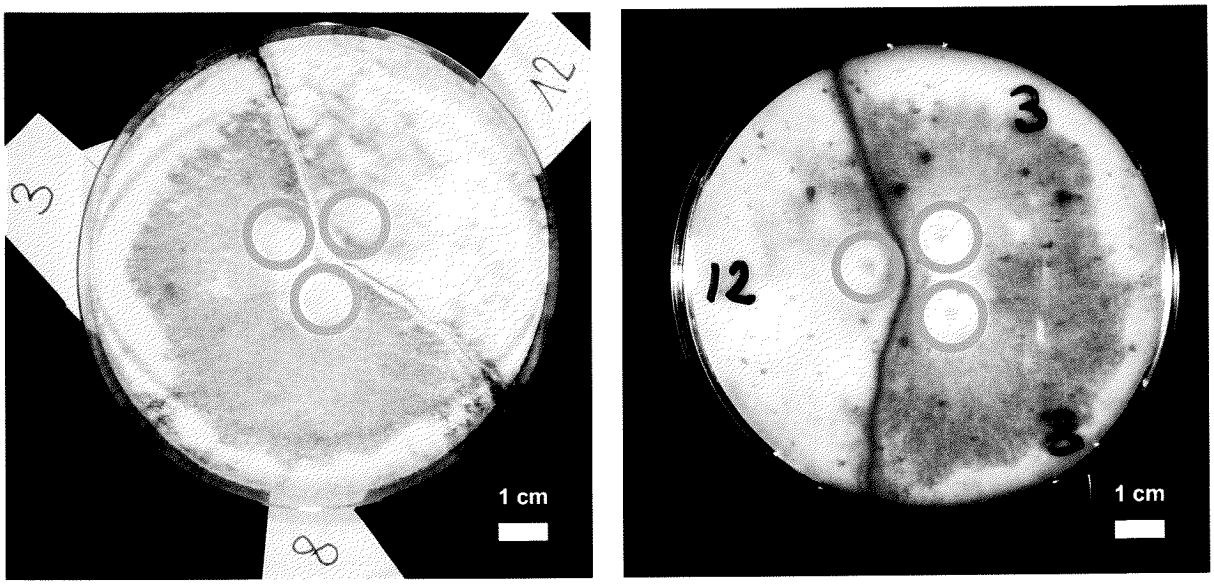


Abbildung 2.8: Nachweis somatischer Kompatibilität bei *Fomitopsis pinicola* mit drei Inokuli (Kreise) in einer Schale. Links die Aufsicht, rechts die Unterseite derselben Petrischale. Das Myzel Nr. 12 grenzt sich deutlich von Nr. 8 und Nr. 3 ab, letztere wachsen ohne sichtbare Reaktion ineinander. Dies lässt darauf schliessen, dass Nr. 8 und Nr. 3 nicht zum selben Individuum gehören wie Nr. 12. Im Nährmedium werden bei einer Abgrenzung im Bereich der Kontaktzone der Myzelien Pigmente gebildet, so dass die Grenze auf der Unterseite der Petrischale braun erscheint (unten).

Von zwei Sperren (Nr. 2 und 3) wurden zunächst sämtliche Isolate einer Art in allen möglichen Paarungen auf somatische Kompatibilität getestet. Nur in Einzelfällen waren Myzelien aus benachbarten, direkt in Kontakt stehenden Rundhölzern kompatibel. Myzelien aus weiter voneinander entfernten Balken gehörten immer verschiedenen VC-Gruppen an. Deshalb wurden bei den übrigen Sperren zunächst Kompatibilitätstest zwischen Isolaten aus demselben Bohrkern und anschliessend jene aus demselben Rundholz durchgeführt. Die bis dahin gefundenen VC-Gruppen wurden nachfolgend mit jenen aus benachbarten Rundhölzern getestet (Abbildung 2.9). Dadurch liess sich der Aufwand gegenüber Tests aller Isolate einer Sperre gegeneinander stark reduzieren. Bei der Art *Armillaria cepistipes* erfolgte eine Prüfung aller Isolate einer Sperre gegeneinander. Diese Pilzart ist in der Lage, sich durch Rhizomorphen auszubreiten (Rayner *et al.* 1999), wodurch auch Übertritte eines Individuums auf nicht benachbarte Balken zu erwarten sind.

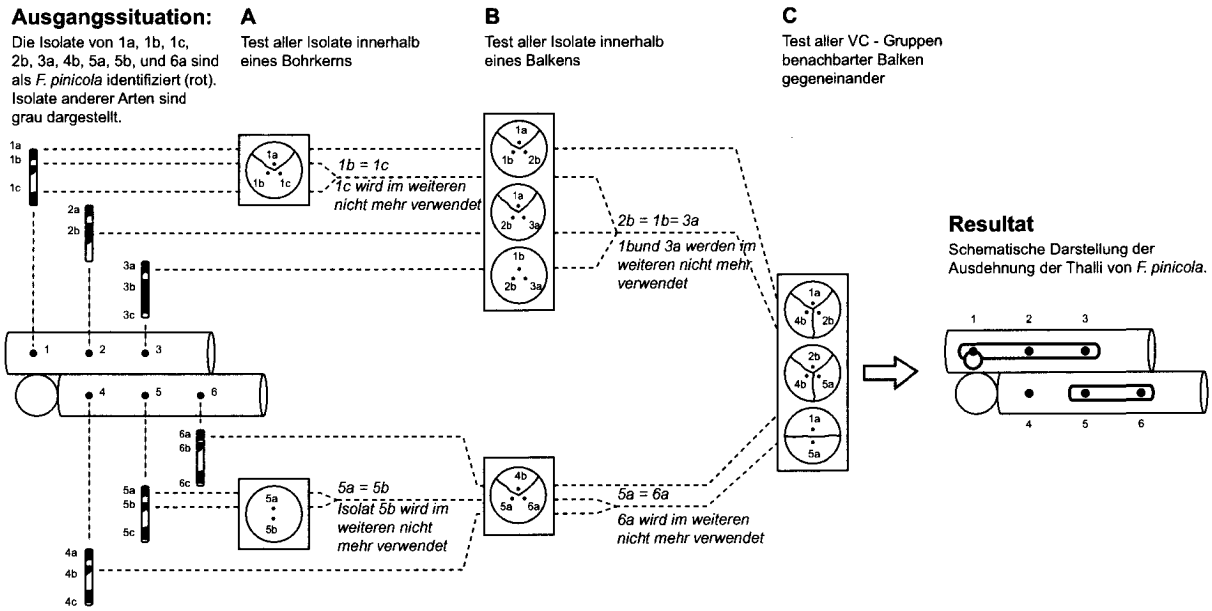


Abbildung 2.9: Strategie der VC-Tests zur Abschätzung der Grösse der Individuen einzelner Pilzarten. Beispiel zweier Balken mit Funden von *Fomitopsis pinicola* (schematisiert). Lagen aus einem Bohrkern mehrere Isolate derselben Art vor, wurden diese zunächst untereinander getestet (A). Anschliessend wurden alle Isolate vom selben Balken gegeneinander getestet (B). Der letzte Test umfasste die bis dahin ermittelten VC-Gruppen aus Balken, welche in der Sperre benachbart eingebaut waren (C).

Die so identifizierten VC-Gruppen sowie ihre Ausdehnung auf den Sperren wurden in den Sperrenplänen eingetragen. Die Ermittlung von Anzahl und Grösse der VC-Gruppen erfolgte anhand folgender zwei Kennwerte. Erstens wurde die Anzahl VC-Gruppen einer Pilzart pro Sperre bestimmt und durch die Anzahl Probestellen dividiert, an welcher die entsprechende Art nachgewiesen werden konnte. Dadurch konnte gezeigt werden, wie viele Individuen einer Art an der Besiedlung der Sperren beteiligt waren. Zweitens wurden die einzelnen VC-Gruppen entsprechend der Anzahl Probestellen, an welcher sie gefunden wurden, in eine Grössenklasse eingeteilt (Abbildung 2.10). Im Falle von nicht benachbarten Probestellen mit derselben VC-Gruppe einer Art wurden die dazwischen liegenden Probestellen ebenfalls mitgezählt (vergl. Abbildung 2.10). Dieses Vorgehen ermöglichte es, die räumliche Ausdehnung der VC-Gruppen näherungsweise zu quantifizieren sowie Hinweise auf artspezifische Unterschiede in der Besiedlungsweise zu gewinnen.

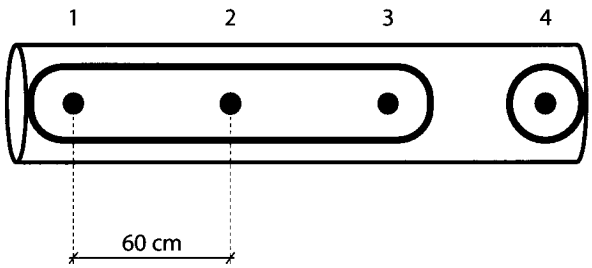


Abbildung 2.10: Grössenklassen von Pilzthalli im Holz. Entsprechend der Anzahl Probestellen wurden die gefundenen VC-Gruppen einer Art in Grössenklassen eingeteilt. Die VC-Gruppe links entspricht – obschon an der Probestelle 2 kein Nachweis vorlag – der Grössenklasse 3. Rechts ein Individuum der Grössenklasse 1.

2.3 Resultate

2.3.1 Häufigste Fäuleerreger an Wildbachsperren

An den neun Sperren wurden an insgesamt 979 Probestellen Bohrkerne entnommen sowie 655 Fruchtkörper gesammelt. Aus diesem Probenmaterial wurden 1378 Funde von Basidiomyceten (Fruchtkörper und Myzelien) registriert. Darin sind auch Fruchtkörper enthalten, von welchen die Herstellung einer Reinkultur nicht möglich war, sei es aufgrund einer Parasitierung durch andere Pilzarten oder weil sie bereits abgestorben waren. Eine Liste aller Isolate findet sich in Anhang I. Die Fundstellen der einzelnen Arten wurden in den Sperrenskizzen eingetragen (Abbildung 2.11). In Anhang II sind sämtliche Funde sowie die identifizierten Arten auf allen Sperren zusammengestellt.

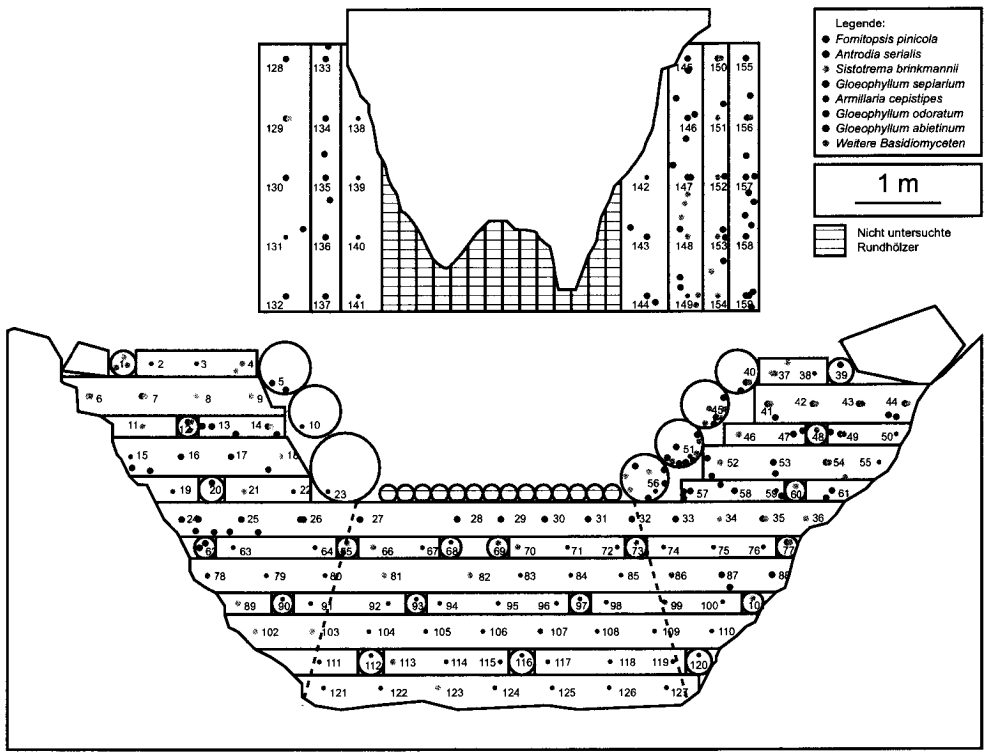


Abbildung 2.11: Darstellung der Fundstellen am Beispiel der Sperre Nr. 2. Isolationen aus Bohrkernen sowie Fruchtkörperfunde wurden in der entsprechenden Farbe markiert. Die Nummern bezeichnen die Probestellen (Anhang I). Auf die Darstellung der Fruchtkörpernumerierung wurde übersichtshalber verzichtet. Alle Fruchtkörper an den Querhölzern (Zangen) sind an den Stirnseiten eingetragen. (- - -): Abgrenzung der Bauteile „Einbindungen" und „Wasserbereich".

An 59% (582) der Probestellen wurde mindestens ein Basidiomycet nachgewiesen. Die am häufigsten auftretenden Arten waren *Fomitopsis pinicola* (rotrandiger Baumschwamm), *Antrodia serialis* (Fr.) Donk. (Reihige Tramete), *Sistotrema brinkmannii*[1] (Bres.) J. Erikss. (Brinkmann's Rindenpilz), *Gloeophyllum sepiarium* (Wulf.) P. Karst. (Zaunblättling), *Armillaria cepistipes* (Zwiebelfüssiger Hallimasch) sowie *Gloeophyllum odoratum* (Wulf.: Fr.) Imazeki (Fencheltramete).

Bezogen auf die Gesamtzahl der Funde (1378) machten diese sechs Arten rund 74% (1026) aus. Die Zuordnung der Funde zu den Probestellen ergab für die oben erwähnten Arten die in Tabelle 2.3 angeführten Anzahl Nachweise im Sinne der Definition in Kapitel 2.2.4. Die relativen Häufigkeiten dieser Arten sind in Abbildung 2.12 dargestellt. An 79% (461) jener Probestellen, an welchen mindestens ein Basidiomycet nachgewiesen wurde (582), kam auch mindestens

Tabelle 2.3: Häufigste Basidiomyceten auf den untersuchten Sperren. Die angegebenen Werte entsprechen der Anzahl Nachweise (Probestellen mit mindestens einem Fund). Dargestellt sind Arten mit mindestens 30 Nachweisen. In der letzten Zeile ist die Anzahl Probestellen angegeben, an welchen mindestens ein nicht bestimmter Basidiomycet gefunden wurde. (–): Kein Nachweis der entsprechenden Art.

	Sperre Nr.									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**Total**
Total Probestellen pro Sperre	148	159	51	141	117	69	130	66	98	979
Pilzart										
Fomitopsis pinicola	64	27	12	9	33	3	22	1	18	189
Antrodia serialis	31	37	–	23	2	12	3	9	7	124
Sistotrema brinkmannii	17	27	2	16	10	10	3	10	4	99
Gloeophyllum sepiarium	13	18	–	23	8	2	8	9	–	81
Armillaria cepistipes	1	2	1	–	3	2	24	7	8	48
Gloeophyllum odoratum	1	2	–	13	–	–	4	3	7	30
*Verschiedene Basidiomyceten**	28	28	8	30	6	17	34	23	8	182

*): Nicht sporulierende Isolate (filamentös), welche aufgrund ihres Wachstums auf dem Selektivmedium (Thiabendazol-Agar) mit hoher Wahrscheinlichkeit den Basidiomyceten zugerechnet werden können.

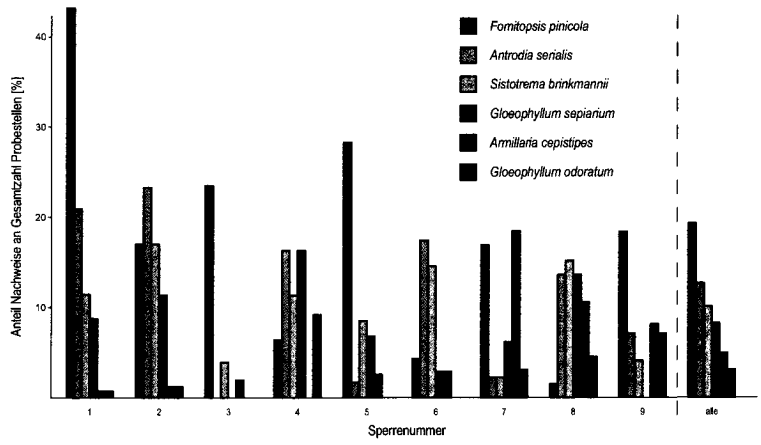


Abbildung 2.12: Relative Häufigkeiten (Anzahl Nachweise gemessen an der Anzahl Probestellen) der dominierenden Fäuleerreger [%]. Bei der Gesamtbetrachtung auf allen Sperren (ganz rechts) dominiert *Fomitopsis pinicola* deutlich. Zwischen den einzelnen Sperren bestehen grosse Unterschiede.

[1] In vorliegender Arbeit wurde nicht zwischen einzelnen Arten innerhalb des *S. brinkmannii*-Komplexes unterschieden (Hallenberg 1984). Nach Stalpers (1978) konnten die Isolate eindeutig der Art *S.brinkmannii* zugeordnet werden, wobei der Schlüssel nur diese Art berücksichtigt.

eine der in Tabelle 2.3 zusammengestellten Arten vor. Die Arten und Häufigkeiten der übrigen identifizierten Basidiomyceten sind in Tabelle 2.4 aufgelistet. An 182 Probestellen wurden insgesamt 241 Myzelien und Fruchtkörper von nicht bestimmten Basidiomyceten gefunden. Davon liessen sich 121 durch den Vergleich der Kulturen nach morphologischen Kriterien in 28 Gruppierungen zusammenfassen. Die grösste dieser Gruppen umfasste 17 Isolate. Die übrigen 120 Isolate wurden als Einzelisolate betrachtet.

Tabelle 2.4: Weitere bestimmte Basidiomyceten mit geringer Häufigkeit auf den untersuchten Sperren. Die angegebenen Werte entsprechen der Anzahl Nachweise auf allen Sperren.

Pilzart	**Anzahl Nachweise auf allen Sperren**
Heterobasidion annosum (Fr.) Bref.	19
Gloeophyllum abietinum Fr.: Fr.	15
Postia caesia (Schrad.: Fr.) Karst	8
Trichaptum abietinum (Fr.) Ryv.	8
Goeophyllum trabeum (Pers.: Fr.) Murrill	6
Bulbillomyces farinosus Bres. (Jül.)*	5
Coprinus sp.	4
Flammulina velutipes (Curt.: Fr.) Sing.	1
Riessia semiophora Fresen.	1

*): Beobachtete Form: Anamorph, Aegertia-Stadium

2.3.2 Besiedlungsmuster

Die Anzahl Nachweise (Probestellen mit mindestens einem Fruchtkörper bzw. Isolat) der häufigsten Basidiomyceten ist in Tabelle 2.5 nach den Bauteilen Flügel, Einbindungen und Wasserbereich aufgelistet. Die statistische Auswertung der Mehrfeldertafeln ergab sowohl unter Berücksichtigung aller Basidiomyceten (Tabelle 2.5A) als auch für jede einzelne der häufigsten Arten (Tabelle 2.5B) signifikante Unterschiede bezüglich des Vorkommens an den Bauteilen (X^2-Test, $p < 0.05$). Mit Ausnahme von *Armillaria cepistipes* kamen alle geprüften Arten auf den Sperrenflügeln deutlich häufiger vor, während sich die Bereiche Einbindung und Wasserbereich wenig unterschieden (Abbildung 2.13).

Tabelle 2.5: Häufigkeiten von Basidiomyceten auf den Bauteilen „Flügel", „Einbindung" und „Wasserbereich". A) Alle Basidiomyceten; B) Häufigste Arten. PS: Probestellen.

A)	**PS mit min. einem Basidiomyceten**	**PS ohne Basidiomyceten**	**Total PS**
Flügel	388	124	512
Einbindung	69	91	160
Wasserbereich	125	182	307
Total	**582**	**397**	**979**

B)	**PS mit Nachweis**	**PS ohne Nachweis**	**PS mit Nachweis**	**PS ohne Nachweis**	**PS mit Nachweis**	**PS ohne Nachweis**
	F. pinicola		*A. serialis*		*S. brinkmannii*	
Flügel	144	368	92	420	76	436
Einbindung	11	149	13	147	13	147
Wasserbereich	34	273	19	288	10	297
Total	**189**	**790**	**124**	**855**	**99**	**880**
	G. sepiarium		*A. cepistipes*		*G. odoratum*	
Flügel	72	440	27	485	24	488
Einbindung	7	153	14	146	4	156
Wasserbereich	2	305	7	300	2	305
Total	**81**	**898**	**48**	**931**	**30**	**949**

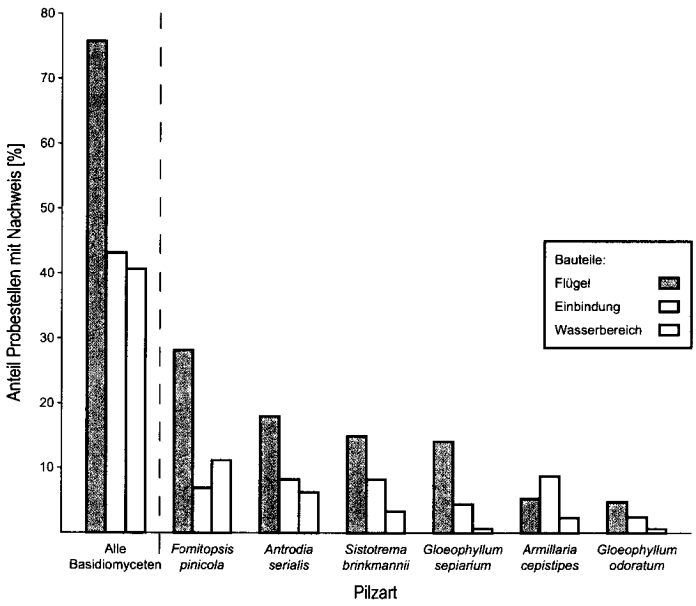


Abbildung 2.13: Relative Häufigkeiten der dominierenden Fäuleerreger auf allen Sperren nach Bauteilen gegliedert. Mit Ausnahme von *Armillaria cepistipes* treten alle Arten deutlich häufiger an den Sperrenflügeln auf als an den übrigen Bauteilen.

Für die Konfrontationstests (VC-Tests) wurden die Reinkulturen von *Fomitopsis pinicola*, *Antrodia serialis*, *Gloeophyllum sepiarium* sowie *Armillaria cepistipes* verwendet. Von diesen Arten lagen total 836 Fruchtkörperfunde und Myzelisolationen vor. Davon konnten 691 Isolate (83%) für die VC-Tests verwendet werden. Bei 129 Funden handelte es sich um abgestorbene Fruchtkörper, 16 der Reinkulturen mussten im Lauf der Verarbeitung wegen Kontaminationen ausgeschieden werden.

Die Ausdehnung der VC-Gruppen wurde anhand der kompatiblen Isolate einer Art in den Sperrenskizzen markiert (Abbildung 2.14). In der Tabelle 2.6 ist die Anzahl VC-Gruppen pro Art zusammengestellt, welche an den einzelnen Sperren ermittelt wurde. Die Darstellung der Ergebnisse aller Sperren findet sich in Anhang II. Die meisten VC-Gruppen der untersuchten Arten fielen in die Grössenklasse 1, das heisst ihre Ausdehnung war auf eine Probestelle beschränkt (Tabelle 2.7). Die grössten VC-Gruppen waren meist durch die Rundhölzer begrenzt. Nur in insgesamt sechs Fällen waren Isolate von *Fomitopsis pinicola* aus zwei benachbarten Rundhölzern kompatibel. Bei den Arten *Gloeophyllum sepiarium* sowie *Antrodia serialis* traten keine derartigen Fälle auf. Die VC-Gruppen von *Armillaria cepistipes* erstreckten sich teilweise über die ganze Sperre, wobei die Fundstellen der Isolate zum Teil mehrere Meter voneinander entfernt waren (vergl. Anhang II, Sperren Nr. 7 und Nr. 9).

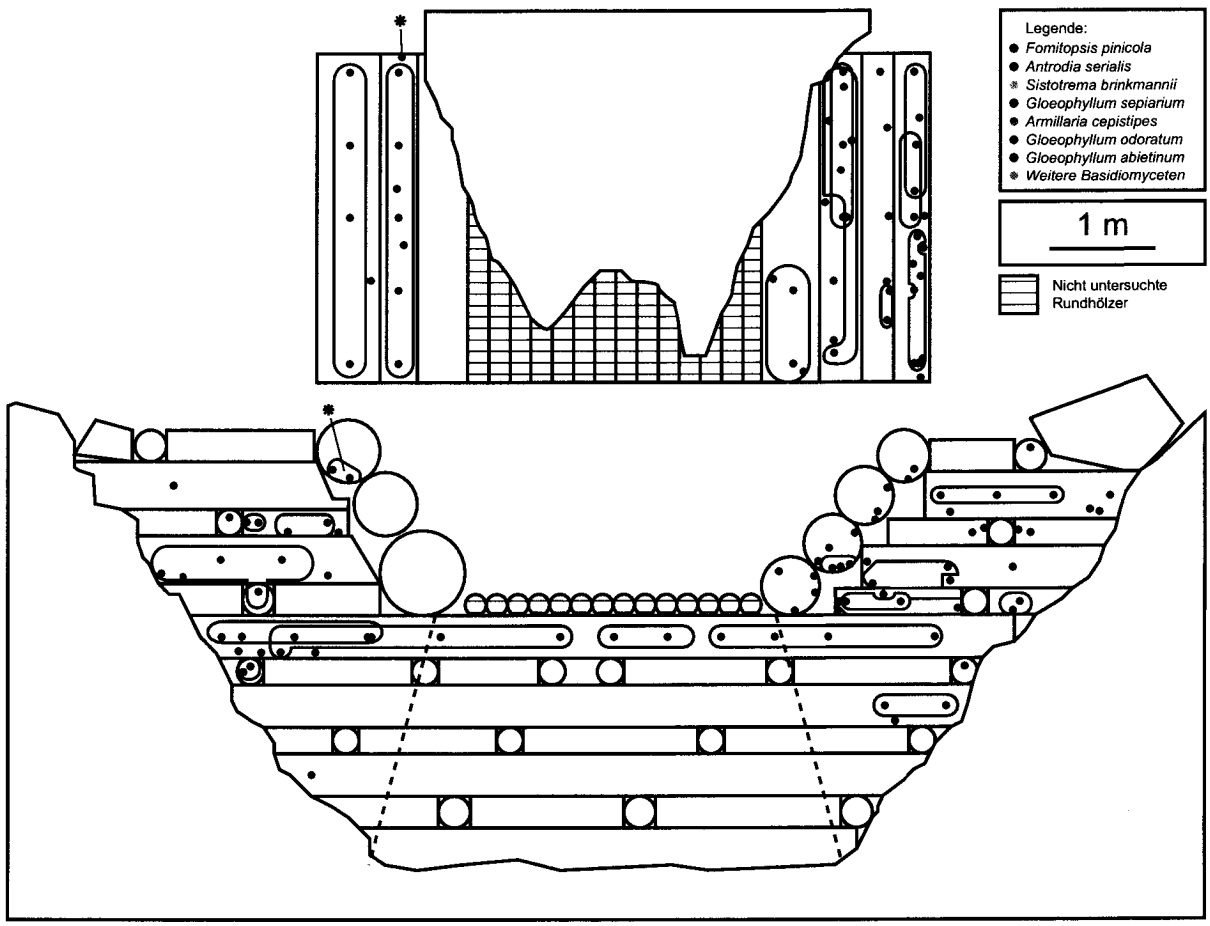


Abbildung 2.14: Ausdehnung der VC-Gruppen der häufigsten Fäuleerreger auf der Sperre Nr. 2. Die beiden mit * gekennzeichneten Nachweise gehören zur selben VC-Gruppe. (- - -): Abgrenzung der Bauteile „Einbindungen" und „Wasserbereich".

Tabelle 2.6: Anzahl VC-Gruppen, welche für die vier häufigsten Fäuleerreger an den einzelnen Sperren ermittelt wurden. In Klammern jeweils die Anzahl Probestellen, an welchen die Arten nachgewiesen wurden. (–): Kein Nachweis der entsprechenden Art bzw. kein VC-Test durchgeführt.

		Pilzart							
Sperre	**Total Probestellen**	*F. pinicola*		*A. serialis*		*G. sepiarium*		*A. cepistipes*	
1	148	87	(64)	41	(31)	16	(13)	1	(1)
2	159	13	(27)	36	(37)	14	(18)	–	(2)
3	51	4	(12)	20	(23)	–	–	1	(1)
4	141	6	(9)	–	–	65	(23)	–	–
5	117	21	(33)	2	(2)	7	(8)	2	(3)
6	69	1	(3)	10	(12)	2	(2)	1	(2)
7	130	20	(22)	2	(3)	6	(8)	6	(24)
8	66	1	(1)	8	(9)	5	(9)	1	(7)
9	98	10	(18)	6	(7)	–	–	4	(8)
Total	**979**	**163**	**(189)**	**125**	**(124)**	**115**	**(81)**	**16**	**(48)**

Tabelle 2.7: Grössen der VC-Gruppen auf allen Sperren. Die Grössenklasse in der ersten Spalte bezeichnet die Anzahl Probestellen, an welcher dieselbe VC-Gruppe gefunden wurde. Die übrigen Werte geben den Anteil der VC-Gruppen einer Grössenklasse an allen VC-Gruppen der entsprechenden Art an.

	Pilzart			
	Gloeophyllum sepiarium	*Fomitopsis pinicola*	*Antrodia serialis*	*Armillaria cepistipes*
Anzahl VC-Gruppen	115	163	125	16
Grösse	[%]	[%]	[%]	[%]
1	81	72	84	31
2	13	13	8	6
3	3	7	3	25
4	2	3	4	
5	1	2	1	
6		1		6
7		1		13
11				13
18				6

2.4 Diskussion

2.4.1 Artenspektrum von Basidiomyceten an Wildbachsperren aus Holz

Nur wenige Arten dominieren die Basidiomycetenflora der untersuchten Sperren. Rund drei Viertel aller Funde (Fruchtkörper und Isolationen aus dem Holz) setzen sich aus lediglich sechs Arten zusammen, ein Viertel aller Funde stammt von einer Art (*Fomitopsis pinicola*). Daneben kommen aber vermutlich über 100 weitere verschiedene Basidiomyceten-Arten an den Holzsperren vor (vergl. Tabelle 2.3 bzw. Kapitel 2.3.1). Eine ähnliche Diversität wurde auch auf Totholz in naturbelassenen Waldflächen gefunden (Luschka 1993, Honold *et al.* 1994, Edman & Jonnsson 2001). Analoge Resultate erhielten auch Wilcox & Dietz (1997), welche an Holzkonstruktionen (im Innen- und Aussenbau) in Kalifornien wenige Fäuleerreger mit grosser Häufigkeit feststellten.

Bei diesem Befund gilt es zu berücksichtigen, dass die Artenzusammensetzung saprober Basidiomyceten auf Totholz einer ausgeprägten Sukzession unterliegt (Rypácek & Jahn 1966, Rayner & Boddy 1988). Diese lässt sich generell in drei Phasen einteilen, welche durch spezifische Arten sowie fortschreitenden Holzabbau charakterisiert werden (Meredith 1960). Jahn (1979) nennt diese Phasen Initital-, Optimal- und Finalphase, wobei er mit der Optimalphase den intensivsten Holzabbau assoziiert. Nach diesem Konzept gehören sämtliche der sechs häufigsten Arten an den untersuchten Sperren zu den charakteristischen Arten der Optimalphase auf Nadelholz. In verschiedenen Studien zur Pilzsukzession auf Windwurfflächen gehörten *Fomitopsis pinicola, Antrodia serialis*, und *Gloeophyllum sepiarium* rund acht bis zehn Jahre nach dem Sturm zu den häufigsten Basidiomyceten an Nadelholz (Luschka 1993, Honold & Oberwinkler 1999, Egenter 2000).

Der Vergleich zeigt, dass sich an den untersuchten Sperren eine ähnliche Sukzession entwickelt, wie sie an totem Nadelholz unter natürlichen Bedingungen generell zu erwarten ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die relative Häufigkeit der dominanten Basidiomyceten zwischen den einzelnen Sperren stark variiert. Als Gründe dafür sind folgende Punkte zu nennen. Zunächst wird die Besiedlung von Holz durch Pilze grundsätzlich vom Infektionsdruck bestimmt, indem die Verfügbarkeit eines Inokulums (Myzelien oder Sporen) das Auftreten einer Art bestimmt (Holmer & Stenlid 1993). Zweitens hängt die Etablierung von Myzelien im Substrat von den ökologischen Bedingungen im Substrat ab. Schliesslich wird die Sukzession der Pilzarten – und die aktuell festgestellte Artzusammensetzung als zeitlicher Ausschnitt derselben – durch inter- sowie intraspezifische Konkurrenzverhältnisse massgebend beeinflusst (Shearer 1994). Eine genauere Untersuchung des Ablaufs der Pilzsukzession auf Bachsperren müsste wiederholte Probenahmen umfassen, womit die zeitliche Dynamik der Populationsentwicklung erfasst werden könnte. Ebenso müssten unter der Verwendung von nicht-selektiven Kulturmedien auch Ascomyceten sowie *fungi imperfecti* berücksichtigt werden, da diese ebenso zur Gesamtheit der Pilzpopulation gehören und auch die Artenzusammensetzung der Basidiomyceten beeinflussen (Honold & Oberwinkler 1999). Eine verbesserte Bestimmung bzw. vereinfachte Gruppierung der isolierten Myzelien könnte durch molekularbiologische Methoden erreicht werden (Johannesson & Stenlid 1999).

Bei den dominierenden Fäuleerregern an den Sperren handelt es sich also nicht um spezialisierte Arten, welche das Holz von Bachsperren als ökologische Nischen nutzen. Vielmehr sind es häufige Basidiomyceten mit einer grossen ökologischen Amplitude, welche die Bauwerke besiedeln. Die Anzahl nicht bestimmter, einzelner Myzelien ist jedoch ein Hinweis auf eine grosse Vielfalt innerhalb der Basidiomyceten an Holzkonstruktionen im Bachverbau. Es konnten auch einige seltene Pilzarten identifiziert werden. So wurde an den Sperren Nr. 1, 2 und 8 die Art *Bulbillomyces farinosus* (Bres.) Jül. isoliert, welche als Besiedler von Laub- und Nadelholz in zeitweise überfluteten Habitaten beschrieben wird (Jülich 1984, Breitenbach & Kränzlin 1986a). An einer nicht untersuchten Sperre im Gerinne von Sperre Nr. 8 trat ein Fruchtkörper der Art *Hericium coralloides* s.l. auf, welche in der Schweiz als gefährdet gilt (Senn-Irlet *et al.* 1997). An der Sperre Nr. 7 wurde zudem der Hyphomycet *Riessia semiophora* Fresen. isoliert, welcher in der Schweiz vermutlich erstmals nachgewiesen wurde (vergl. Goos & Tubaki 1973).

Trotz der offensichtlichen Dominanz weniger Arten beherbergt das verbaute Holz von Wildbachsperren also eine reiche Mykoflora. Dies kann aus ökologischer Sicht als positiver Beitrag der Verwendung von Holz als Baumaterial von Bachsperren gewertet werden. Der Verbau eines Fliessgewässers stellt jedoch für viele andere Organismen eine starke Beeinträchtigung des Habitats dar (vergl. Marui 1996, Ward 1998). Die Wahl des Baumaterials kann diesen Effekt letzlich nur sehr begrenzt ausgleichen.

2.4.2 Bedeutung der dominierenden Arten

Bei den Arten *Fomitopsis pinicola, Antrodia serialis, Gloeophyllum sepiarium* sowie *Gloeophyllum odoratum* handelt es sich um bekannte Braunfäuleerreger (Rypácek & Jahn 1966, Jahn 1979, Breitenbach & Kränzlin 1986a). Durch den effizienten Abbau von Zellulose und Hemizellulosen (vergl. Kapitel 2.1) verursachen diese Arten schon bei geringem Masseverlust des Substrates eine grosse Reduktion verschiedener Festigkeitseigenschaften (Cartwright *et al.* 1931, Mizumoto 1966, Wilcox 1978, Kim *et al.* 1994). Die Art *Armillaria cepistipes* verursacht eine Weissfäule (Morrison *et al.* 1991). Selektive Weissfäulen reduzieren zumindest im Frühstadium die Festigkeit weniger stark, da die Zellulose langsamer abgebaut wird (Cowling 1961, Schwarze 1995).

Die ebenfalls häufig isolierte Art *Sistotrema brinkmannii* gilt als Wundparasit an *Picea*-Arten (Roll-Hansen & Roll-Hansen 1980, Gregory 1984), wo sie auch als Verursacher einer Wurzelfäule auftreten kann (Rizzo & Harrington 1988). Andere Autoren beschreiben die Art als häufigen Besiedler von Wurzelstöcken (Capretti & Mugnai 1989) sowie als saprobe Art an abgestorbenen Pilzfruchtkörpern, Totholz oder Pflanzenresten (Breitenbach & Kränzlin 1986a). Kallio & Hallaksela (1979) stellten zudem eine Häufung in der Besiedlung von Fichtenstrünken bei hoher Luftfeuchtigkeit fest. In Laborexperimenten wurde der Holzabbau durch *S. brinkmannii* bisher kaum untersucht. An Fichtenholz verursachte *S. brinkmannii* keine Masseverluste (Danninger 1980), wobei in dieser Studie nur ein Isolat getestet wurde. Die Bedeutung dieser Art ist anhand der Literatur nicht abschliessend zu beurteilen. Aufgrund der Häufigkeit von *S. brinkmannii* an den untersuchten Sperren sollten jedoch weitere Studien zum Abbauverhalten dieser Art (insbesondere auch verschiedener Stämme) durchgeführt werden.

Die Verwendung eines Selektivmediums für Basidiomyceten verunmöglichte die Erfassung von Weiss- und Moderfäuleerregern aus der Klasse der Ascomyceten. Auch Moderfäuleerreger können

durch den Abbau der Zellulose die Festigkeitseigenschaften von Holz erheblich reduzieren (Liese & von Pechmann 1959, Wang *et al.* 1977, Morrell & Zabel 1985). Dies insbesondere auch unter extremen ökologischen Bedingungen, bei welchen Basidiomyceten nur bedingt lebensfähig sind (Liese 1963, Liese & Ammer 1964, Schmidt 1994). Bisherige Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Festigkeit von Holz in Anwesenheit von Braunfäuleerregern meist schneller reduziert wird, als wenn nur Moderfäuleerreger am Abbau beteiligt sind (Liese & von Pechmann 1959, Levy 1982, Schwarze 1995, Edlund 1998). Für die untersuchten, relativ neuen Sperren ist es deshalb plausibel, dass Moderfäuleerreger eine untergeordnete Bedeutung haben. Auch bei einer Fokussierung auf Basidiomyceten konnten die zumindest aus technischer Sicht wichtigsten Pilzarten erfasst werden. In Anbetracht des Alters der Sperren von zum Teil weniger als 10 Jahren, erscheinen Braunfäuleerreger als besonders problematisch, da sie einen raschen Zerfall einzelner Bauteile herbeiführen können und dadurch die Stabilität ganzer Bauwerke lange vor einer geplanten Erneuerung (vergl. Kapitel 1.1) in Frage stellen.

2.4.3 Besiedlungsmuster

Die Vermutung, dass die Sperrenflügel häufiger von Basidiomyceten besiedelt werden, konnte durch die vorliegende Studie quantitativ belegt werden. An den Bauteilen oberhalb der Überfallkante des Wassers kamen beinahe an doppelt so vielen Probestellen Basidiomyceten vor als an den übrigen Bauteilen. Offensichtlich sind die ökologischen Bedingungen für die Etablierung von Fäuleerregern an den Sperrenflügeln besser. Damit sind die Sperrenflügel allein durch das vermehrte Auftreten holzzerstörender Pilze stärker gefährdet als die übrigen Bauteile. Ein ähnliches Resultat fand auch Käärik (1968) an kurzen Pfählen im Boden, wo Basidiomyceten am häufigsten am oberen Ende auftraten.

Der Anteil der Probestellen mit mindestens einem Nachweis eines Basidiomyceten waren im Wasserbereich und an den Einbindungen nahezu gleich gross (vergl. Abbildung 2.13, S. 23). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Grenze zwischen diesen beiden Bauteilen aufgrund der theoretischen Ausbreitung des Wasserstrahls festgelegt wurde. Diese Ausbreitung ist jedoch nur bei Abfluss auf der ganzen Breite der Abflussektion gegeben. Die Wasserführung von Wildbachgerinnen kann stark variieren und die Abflussektion muss nicht dauernd auf der ganzen Breite von Wasser überflossen sein. Dadurch wird nur ein Teil des Wasserbereichs ständig benetzt. Der Randbereich des Wasserflusses bildet demnach eine Übergangszone zwischen ständiger und temporärer Benetzung durch das Wasser im Gerinne, wodurch sich auch die Effekte im Bezug auf die Häufigkeit der Nachweise von Basidiomyceten verwischen können.

Die vorliegenden Daten der untersuchten Sperren weisen darauf hin, dass Rundhölzer im Einbindungsbereich nicht zum bevorzugt besiedelten Substrat der dominanten Fäuleerreger gehören. Dies steht im Gegensatz zur Vermutung, das teilweise in der Erde eingelassene Holz der Einbindung stelle zusammen mit den Sperrenflügeln den am schnellsten besiedelten Bereich an Wildbachsperren dar (Rickli 1997). Ob andere Pilzarten (z.B. Moderfäuleerreger) das Holz im Einbindungsbereich älterer Sperren besiedeln und hier für einen Stabilitätsverlust massgebend werden, lässt sich aus dieser Studie nicht ableiten. Zumindest im Bezug auf Basidiomyceten sind die Einbindungsbereiche jedoch einer deutlich geringeren Besiedlungsgefahr ausgesetzt als die Sperrenflügel.

Die Isolate aus Fruchtkörpern und Holzproben der Fäuleerreger *F. pinicola*, *A. serialis* und *G. sepiarium* von verschiedenen Probestellen gehörten selten zur selben VC-Gruppe. Rund 80% der VC-Gruppen wurden nur an einer Probestelle gefunden (vergl. Tabelle 2.7, S. 25). Hingegen liessen sich – unter der in Kapitel 2.2.4 beschriebenen Zuordnung der Fruchtkörper – an einer Probestelle von *Gloeophyllum sepiarium* bis maximal acht, von *Fomitopsis pinicola* bis zu sechs und von *Antrodia serialis* bis fünf verschiedene VC-Gruppen abgrenzen. Die grösste VC-Gruppe von *F. pinicola* erstreckte sich über sieben Probestellen (ca. 3.2 m). Das überwiegend kleinräumige Nebeneinander von VC-Gruppen stellten schon verschiedene Autoren bei anderen Fäuleerregern fest, so beispielsweise für *Coriolus versicolor* (Rayner & Todd 1979, Todd & Rayner 1981), *Stereum hirsutum* (Coates *et al.* 1981) oder *Phellinus tremulae* (Holmer *et al.* 1994). Die von Luschka (1993) genannten Mindestabstände von 0.3 m für *G. sepiarium* bzw. 1 m für *F. pinicola* zwischen zwei Fruchtkörpern verschiedener VC-Gruppen können nicht bestätigt werden.

Die grössten Individuen von *F. pinicola* oder *G. sepiarium* befanden sich an den Sperrenflügeln (vergl. Anhang II, z.B. Sperren Nr. 1, 2 oder 9). Dies könnte darauf hinweisen, dass die Besiedlung an diesen Bauteilen zuerst erfolgte. Eine Studie an einem Baumstrunk von *Picea abies* zeigte, dass sich bei *Heterobasidion annosum*, ausgehend von 27 VC-Gruppen an der Schnittfläche des Baumstrunks nur 12 in die Wurzeln vorgestossen sind (Swedjemark & Stenlid 2001). Ein ähnliches Phänomen ist auch bei den oben genannten Fäuleerregern möglich, indem innerhalb einer Art die Anzahl Individuen im Laufe der Zeit reduziert wird.

Bei Basidiomyceten wird aus den Resultaten von VC-Tests oft die Grösse von Individuen oder Klonen abgeleitet und daraus wiederum Schlüsse über Strategien der Habitatsbesiedlung gezogen (Dowson *et al.* 1989, Kile *et al.* 1991). Die Grösse eines Individuums bzw. eines Klons wird dahingehend interpretiert, dass eine grosse Zahl kleiner Individuen auf eine Ausbreitung durch Sporen hindeutet, grosse Individuen jedoch auf eine solche durch vegetatives Wachstum des Myzels zurückgehen (Cooke & Rayner 1984). Bei der Interpretation von VC-Tests stellt sich jedoch die Frage, ob Isolate einer VC-Gruppe tatsächlich zum selben Individuum bzw. zum selben Klon gehören und ob daraus die vegetative Ausbreitung des Myzels abgeleitet werden kann. Hierzu müssen zunächst die genetischen Ursachen des Phänomens der somatischen Kompatibilität betrachtet werden.

Somatische Kompatibilität bzw. Inkompatibilität bei Basidiomyceten wird meist durch verschiedene Gen-Loci gesteuert (Meijer *et al.* 1994, Worrall 1997). Wahrscheinlich sind zudem oft multiple Allele am selben Locus für die vegetative Kompatiblität verantwortlich. Für *Heterobasidion annosum* wurden beispielsweise drei bis vier Loci gefunden, von welchen mindestens einer mehrfache Allele aufwies (Hansen *et al.* 1993). Die Qualität von VC-Tests hängt von der Anzahl Loci bzw. multipler Allele ab, welche an der Abgrenzungsreaktion beteiligt sind (Stenlid & Vasiliauskas 1998). Je grösser die Anzahl dieser Loci, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass kompatible Isolate auch tatsächlich genetisch identisch sind. Schon ein einzelnes verschiedenes Allel an einem der beteiligten Loci führt zu einer Abgrenzungsreaktion, weshalb letztere eindeutige auf unterschiedliche Genotypen der getesteten Isolate hinweist (Worral 1997). Umgekehrt muss jedoch bei vegetativ kompatiblen Isolaten das übrige Genom, welches nicht an der Abgrenzungsreaktion beteiligt ist, nicht *a priori* identisch sein. Daraus folgt, dass sich in VC-Tests mit heterokariotischen Isolaten von Basidiomyceten nur eine Abgrenzungsreaktion eindeutig interpretieren lässt (unterschiedliche Genotypen). Bei vegetativer Kompatibilität zweier Isolate besteht immer eine gewisse Unsicherheit in der Interpretation.

Zu dieser Problemstellung wurden veschiedene Forschungsarbeiten durchgeführt. Für verschiedene Basidiomyceten-Arten wurden die Ergebnisse von VC-Tests anhand anderer Merkmale zur Abgrenzung von Individuen überprüft. Die Myzelmorphologie erwies sich dabei für *Fomes cajanderi* bzw. *Polyporus schweinitzii* als ungeeignet, indem sowohl inkompatible Myzelien eine ähnliche, wie auch kompatible Myzelien verschiedene Morphologien aufwiesen (Adams & Lewis 1967, Barrett & Uscuplic 1971). Molekularbiologische Analysen der genetischen Variabilität innerhalb und zwischen VC-Gruppen von Basidiomyceten ergaben unterschiedliche Resultate. Bei *Phellinus tremulae* (Holmer *et al.* 1994) oder *Hetereobasidion annosum* (Hansen *et al.* 1993) bestätigten die genetischen Untersuchungen die Resultate der VC-Tests weitgehend. Ebenso konnte innerhalb von VC-Gruppen von *Amylostereum*-Arten keine genetische Variation festgestellt werden (PCR-Fingerprinting mit einem M13 Minisatelliten-Primer) (Vasiliauskas *et al.* 1998). In der zuletzt genannten Studie wiesen aber auch verschiedene VC-Gruppen identische DNA-Muster auf. Bei anderen Arten wie *Stereum sanguinolentum* (Stenlid & Vasiliauskas 1998) oder *Suillus granulatus* (Jacobson *et al.* 1993) wurden ebenfalls innerhalb von VC-Gruppen genetisch verschiedene Isolate festgestellt. Beim Vergleich von VC-Tests mit verschiedenen molekularbiologischen Methoden (RAPD, Mating Type Allele, Isoenzymanalyse) an *Armillaria* spp., kommen die Autoren trotz Ausnahmen (mit genetischer Variation innerhalb von VC-Gruppen) zum Schluss, dass VC-Tests in den meisten Fällen eine angemessene Methode für Populationsstudien darstellen (Guillaumin *et al.* 1996).

Analoge Arbeiten liegen auch für *Fomitopsis pinicola* vor. In einer Studie wiesen Isolate einer VC-Gruppe keine genetische Variation auf (Högberg *et al.* 1999), wobei allerdings nur zwei der getesteten Isolate aus der selben VC-Gruppe stammten. In einer anderen Studie liessen sich auch innerhalb einer VC-Gruppe genetisch unterschiedliche Isolate abgrenzen (Norden 1997). Er fand zwischen Isolaten aus drei Fruchtkörpern von verschiedenen Bäumen (*Picea abies*) zwar somatische Kompatibilität, jedoch eine geringe genetische Ähnlichkeit. Auch wenn dieses Resultat aufgrund der verwendeten genetischen Marker (RAPD) mit Vorsicht zu interpretieren ist, könnte es darauf hinweisen, dass auch bei *F. pinicola* die Isolate einer VC-Gruppe nicht zwingend vom selben Individuum bzw. Klon stammen müssen.

Die Verbreitung von *Fomitopsis pinicola* erfolgt primär durch Basidiosporen (Cooke & Rayner 1984, Holdenrieder & Greig 1998), obwohl dieser Porling auch Chlamydosporen bilden kann (Stalpers 1978). Dies kann durch die gefundene Anzahl von VC-Gruppen an den untersuchten Sperren bestätigt werden. Die Rundhölzer werden demnach ausgehend von zahlreichen Infektionen (Sporenregen) durch diesen Fäuleerreger besiedelt. Zahlreiche Individuen können so in Konkurrenz untereinander und mit weiteren Arten sukzessive das ganze Rundholz besetzen. Für das Auftreten von grossen VC-Gruppen gibt es – neben der genannten Dominanz weniger Individuen im Laufe der Zeit – zwei weitere Ansätze zur Interpretation. Einerseits kann ein Individuum relativ rasch ein ganzes Rundholz durchwachsen und so – zumindest temporär – eine Besiedlung durch weitere Myzelien verhindern. Im Laborversuch wurden Fichtenhölzer von 30 cm Länge in 45 Tagen von *F. pinicola* durchwachsen (Dobrý & Rypàcek 1991). Deshalb scheint die festgestellte Besiedlung eines Rundholzes von rund 4 m Länge durch ein einzelnes Individuum von *F. pinicola* in wenigen Vegetationsperioden eine realistische Vorstellung zu sein. Andererseits müssen jedoch, wie oben gezeigt, die Isolate einer VC-Gruppe nicht zwingend zum selben Individuum gehören. Unter diesem Gesichtspunkt müssen auch diejenigen VC-Gruppen, welche sich über zwei Rundhölzer erstreckten, nicht unbedingt das Resultat eines Myzelübergangs zwischen den Rundhölzern sein. In einem Experiment von Mounce (1929)

war ein Teil von unter kontrollierten Bedingungen hergestellten Kulturen aus vielen Sporen eines Fruchtkörpers (*F. pinicola*) mit einer Kultur aus der Trama dieses Fruchtkörpers kompatibel. Eine ähnliche Situation könnte an Wildbachsperren auftreten, indem bei der Sporulation eines Fruchtkörpers auf einem benachbarten Balken sich sexuell kompatible Sporen desselben Fruchtkörpers vereinigen. Dadurch entsteht ein heterokariotisches Myzel, welches mit einem Isolat aus dem sporulierenden Fruchtkörper kompatibel ist.

Über *Gloeophyllum sepiarium* liegen ausser der Arbeit von Luschka (1993) keine populationsbiologischen Arbeiten vor, und auch über *Antrodia serialis* wurden keine solchen gefunden. *G. sepiarium* verbreitet sich ebenfalls über Basidiosporen (Bjurman 1985, Edman & Jonnsson 2001). Angaben zur Verbreitung von *Antrodia serialis* fehlen bis anhin ebenfalls (Josefsson 2002). Aufgrund der erreichten Konsistenz der VC-Tests (keine widersprüchlichen Resultate) sowie der ähnlichen Besiedlungsmuster auf den Sperren lassen sich die Resultate der VC-Tests für *A. serialis* und *G. sepiarium* wohl gleich interpretieren wie für *Fomitopsis pinicola*.

Isolate von *Gloeophyllum sepiarium* und *Antrodia serialis* aus zwei benachbarten Rundhölzern gehörten nie derselben VC-Gruppe an. Für *Fomitopsis pinicola* wurden sechs solche Fälle nachgewiesen. Bezogen auf die Gesamtzahl der Nachweise dieser Art (189 Probestellen mit mindestens einem Fund von *F. pinicola*) entspricht dies einem Anteil von rund 3%. Berücksichtigt man zudem den oben dargestellten Umstand, dass eine VC-Gruppe nicht zwingend einem Individuum entspricht, ergibt sich für die häufigsten Basidiomyceten, dass eine Ausbreitung der Art durch Myzelwachstum von Rundholz zu Rundholz wahrscheinlich vernachlässigt werden kann. Dieser Befund deckt sich mit den Ergebnissen von Luschka (1993), welcher bei vom Wind geworfenen Bäumen nie dieselbe VC-Gruppe an zwei sich berührenden Stämmen feststellen konnte.

Die VC-Gruppen von *Armillaria cepistipes* wiesen teilweise deutlich grössere Ausdehnungen auf. Verschiedentlich wurden kompatible Isolate an Probestellen in mehreren Metern Abstand gefunden (z.B. an der Sperre Nr. 7). Die Arten der Gattung *Armillaria* besitzen die Fähigkeit, sich über Rhizomorphen auch ausserhalb des Nährsubstrates – beispielsweise im Waldboden – auszubreiten (Garraway *et al.* 1991). Die grössten gefundenen Klone von *Armillaria* können dabei Ausdehnungen von mehreren Hektaren erreichen (Smith *et al.* 1992a). An Beregnungspoltern wurde zudem festgestellt, dass *Armillaria*-Arten sich auch in sehr nassem Fichtenholz auszubreiten vermögen (Metzler 1994, Gross & Metzler 1995). Es erstaunt deshalb nicht, dass Isolate von *A. cepistipes* aus räumlich weit auseinanderliegenden Probestellen zur selben VC-Gruppe gehören.

An 56% (545 von 979) der Probestellen konnten aus dem Holz Basidiomyceten isoliert werden. In einer Studie mit Douglasienholz (*Pseudotsuga menziesii*) konnten nach 3 Jahren Lagerung im Freien aus 73% von total 459 Bohrkernen Basidiomyceten isoliert werden (Sexton *et al.* 1992). Die Isolationserfolge früherer Studien an lebenden Fichten mit Fäulemerkmalen variierten zwischen 38% (Holdenrieder *et al.* 1994) und 77% (Dimitri 1968). Die vorliegenden Resultate liegen also im Bereich von ähnlichen Studien, welche auf Bohrkernentnahmen beruhen. Aus den gesammelten Fruchtkörpern von den Arten *F. pinicola*, *A. serialis* und *G. sepiarium* konnten in je 70% der Fälle Reinkulturen hergestellt werden. Zusammen mit den Isolationen aus dem Holz bekräftigt dieser hohe Anteil erfolgreicher Isolationen, dass die verwendete Methode zumindest für die Ermittlung der dominierenden Basidiomyceten genügt.

Die Besiedlungsstrukturen der dominanten Arten liessen sich mit dem gewählten Probenraster genügend genau beschreiben. Die gefundene Anzahl von VC-Gruppen weist darauf hin, dass die Diversität der Genotypen innerhalb der analysierten Arten wahrscheinlich noch höher ist, als in dieser Studie festgestellt. Dies konnte z.B. für *Heterobasidion annosum* an Fichte gezeigt werden (Swedjemark & Stenlid 2001). Eine kleinräumige Analyse der tatsächlich vorhandenen Individuen holzbewohnender Pilz ist jedoch ohne destruktive Methoden kaum möglich.

2.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Bezug auf die eingangs genannten Fragestellungen lassen sich aus den Ergebnissen der Studie folgende Schlüsse ziehen:

- Die Artenzusammensetzung der Basidiomyceten an den untersuchten Sperren wird durch wenige Arten dominiert.
- Bei diesen Arten handelt es sich um Braun- und Weissfäuleerreger, welche auch beim Abbau von Totholz in Waldökosystemen eine massgebende Rolle spielen.
- Die dominierenden Fäuleerreger treten am häufigsten an den Sperrenflügeln auf.
- Die Infektion der Bauteile erfolgt primär über Basidiosporen.
- Die häufigsten Fäuleerreger bleiben in ihrer Ausdehnung meist auf ein Rundholz beschränkt.

Die dominierenden Pilzarten an den untersuchten Sperren sind sehr häufige Basidiomyceten, welche sich durch Basidiosporen verbreiten. Infektionsquellen dieser Arten sind somit an den meisten Sperrenstandorten zu erwarten. Die häufigsten Arten sind bekannte Fäuleerreger mit grosser holzzerstörender Wirkung. Deshalb können Massnahmen, welche eine Besiedlung der Sperren durch diese Arten hemmen, im Bezug auf eine Verlängerung der Funktionsdauer der Sperren als effizient betrachtet werden.

Die Fäuleerreger traten am häufigsten an den Sperrenflügeln auf. Diese Bauteile sind somit am stärksten gefährdet. Sie stellen jedoch offenbar keine Ausgangspunkte für die Infektion der übrigen Bauteile dar. Die überwiegende Mehrzahl der Individuen war kleiner als das gewählte Raster von 60 cm Abstand zwischen zwei Probestellen an einem Rundholz, was die Infektion der Bauteile hauptsächlich durch Basidiosporen bestätigt. Einzelne Individuen konnten vermutlich ganze Rundhölzer relativ rasch besiedeln, blieben jedoch in ihrer vegetativen Ausbreitung meist auf einzelne Rundhölzer beschränkt. Eine Ausnahme bilden die Arten der Gattung *Armillaria*, die mit Rhizomorphen grössere Distanzen überbrücken können. Aus diesem Grund erscheint die empfohlene Auswechslung einzelner Rundhölzer bei Fäulnis (Böll *et al.* 1999) unproblematisch. Rayner & Boddy (1988) warnen zwar vor dem Auswechseln einzelner Bauteile an Holzkonstruktionen im Bergbau, da ein latenter Befall des verbleibenden Holzes eine Infektion der neuen Bauteile nach sich ziehen kann. Für Wildbachsperren kann dies jedoch nicht bestätigt werden.

Die untersuchten Wildbachsperren waren noch relativ neu. Dies zeigt deutlich, dass eine Besiedlung durch Fäuleerreger unter pilzökologisch günstigen Bedingungen sehr rasch ablaufen kann. Ein Befall durch holzzerstörende Pilze nach wenigen Jahren verursacht an Holzsperren einen bedeutenden wirtschaftlichen Schaden, wenn von einer veranschlagten Lebensdauer von rund 50 Jahren ausgegangen wird (Zeller & Röthlisberger 1987). Die Vermeidung derartiger Fälle kann deshalb eine wesentliche Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Holz bedeuten. Die vorliegende Studie liefert dazu eine Basis bezüglich der wichtigsten beteiligten Pilzarten und ihrer Besiedlungsstrategien.

Dennoch kann diese Studie kein vollständiges Bild von über die Artenzusammensetzung und die Sukzession der Mykoflora von Wildbachsperren aus Holz geben. Die gefundenen Besiedlungsstrukturen geben letztlich nur einen Ausschnitt der Pilzsukzession an Wildbachsperren aus Holz wieder. Eine Erweiterung der Untersuchung müsste einerseits auch alte Sperren umfassen und andererseits solche, an denen (noch) keine Fruchtkörper von Fäuleerregern auftreten. Zudem sollten dabei auch Ascomyceten sowie imperfekte Pilze berücksichtigt werden. Ein solches Vorgehen könnte die Prognose der Pilzsukzession unter gegebenen Umweltbedingungen ermöglichen. Langfristige Beobachtungen von Sperren an verschiedenen Standorten würden so einen vertieften Einblick in die Sukzessionsprozesse von Fäuleerregern an Wildbachsperren aus Holz gewähren.

3 Holzzustand an Wildbachsperren: Einfluss von Fäuleerregern, Konstruktionsmerkmalen sowie spezifischen Umweltbedingungen

3.1 Einleitung

Das Auftreten von Fäulnis und die damit verbundene Reduktion der Festigkeit sind für die Funktionsdauer einer Holzkonstruktion entscheidend. Voraussetzung für die Entwicklung einer Holzfäule sind einerseits das Auftreten holzzerstörender Organismen, andererseits aber auch geeignete ökologische Bedingungen im Substrat (Findlay 1966, Cooke 1979, Rayner & Boddy 1988). Zur Wirkung ökologischer Einflussgrössen auf den Holzabbau liegt eine Vielzahl von Studien vor, so beispielsweise zum Einfluss der Temperatur (Scheffer & Livingston 1937, Wälchli 1977, Kuprik & Wazny 1978, Eslyn 1986, Viitanen 1997) oder zum pH-Wert des Nährsubstrates (Rypácek & Jahn 1966, Hintikka 1969, Schmidt 1994, Hyde & Wood 1997). Auch die Wechselwirkungen von Fäuleerregern mit anderen Organismen wie Insekten, Bakterien oder weiteren Pilzarten waren Gegenstand verschiedener Forschungsarbeiten (Park 1968, Ackerman & Shenefelt 1973, Grosser 1985, White *et al.* 1998). Zudem wurde auch die Resistenz verschiedener Holzarten gegenüber dem Abbau durch Pilze wiederholt untersucht (Cartwright & Findlay 1958, Scheffer & Cowling 1966, Wälchli 1973, 1976).

Die wahrscheinlich wichtigsten Einflussgrössen für die Entwicklung von Fäulen an Holzkonstruktionen sind jedoch der Wasser- bzw. der Sauerstoffgehalt des Holzes (Rayner & Boddy 1988). Auch zu diesen beiden Faktoren wurden zahlreiche Studien durchgeführt (Bavendamm & Reichelt 1938, Schmitz & Kaufert 1938, Ammer 1964, Griffin 1977, Boddy *et al.* 1989, Rapp *et al.* 2000). Wasser- und Sauerstoffgehalt im Holz sind eng miteinander verbunden, da das Wasser mit zunehmender Holzfeuchte die vorhandene Luft und damit den atmosphärischen Sauerstoff verdrängt (Skaar 1988). Bei hohem Wassergehalt wirkt das geringe Angebot an Sauerstoff hemmend auf die Umsetzung des Nährsubstrates durch obligat aerobe Fäuleerreger (Highley *et al.* 1983, Scheffer 1986). Bei einer geringen Holzfeuchte wird das Wachstum von Fäuleerregern dadurch limitiert, dass das Wasser sowohl als Lösungs- und Diffusionsmittel für enzymatische Prozesse ausserhalb der Hyphen wie auch für den Metabolismus innerhalb der Hyphenzellen fehlt (Zabel & Morrell 1992).

Fäulen an Holzkonstruktionen können primär durch Massnahmen vermieden werden, welche im Holz ungeeignete Lebensbedingungen für die beteiligten Mikroorganismen schaffen (Cartwright & Findlay 1958, Levi 1973, Graf 2001). Dies geschieht oft durch die Verwendung chemischer Holzschutzmittel (Levi 1973, Highley & Scheffer 1991). Ist dies aus Gründen des Umweltschutzes nicht möglich, müssen Holzschutzmassnahmen bei den ökologischen Bedingungen im Holz ansetzen. Ziel derartiger Massnahmen ist es, das Wachstum von Fäuleerregern durch die Beeinflussung von mindestens einem der oben genannten Faktoren zu verhindern oder zumindest zu hemmen.

Von diesen Faktoren lässt sich – bei Standortgebundenheit des zu schützenden Holzes – der Wasser- bzw. Sauerstoffgehalt im Holz am einfachsten beeinflussen (Graf 1997a). Dies wird in vielen praktischen Anwendungen genutzt, so beispielsweise bei der Lagerung von Frischholz, wo durch eine permanente Beregnung von Poltern eine für Fäulepilze zu hohe Holzfeuchte

angestrebt wird (Hapla 1992, Gross & Metzler 1995, Webber & Gibbs 1996). Unter Wasser gelagertes bzw. verbautes Holz kann bis zu mehreren hundert Jahren grösstenteils unversehrt bleiben (Arnold & Schweingruber 1975, Ruske 1983, Niemz *et al.* 1997). Im Hochbau wird durch konstruktive Massnahmen generell versucht, den Wassergehalt unter einem für die Fäuleentwicklung kritischen Wert von rund 25%[1] Holzfeuchte zu halten (Willeitner 1981, Graf 2001).

Die Analyse des Artenspektrums von Basidiomyceten an Wildbachsperren ergab, dass es sich bei den dominierenden Pilzarten um Braun- und Weissfäuleerreger handelt (Kapitel 2.3 & 2.4). Die am häufigsten gefundenen Arten sind geographisch weit verbreitet und kommen in allen Höhenlagen vor, wo geeignetes Holz als Substrat verfügbar ist (Wälchli 1970, Breitenbach & Kränzlin 1986a). Zudem werden diese Arten primär durch Sporen verbreitet (vergl. Kapitel 2.4.3). Dadurch sind Holzkonstruktionen im Wildbachverbau ständig der Gefahr einer Besiedlung ausgesetzt. Da chemische Holzschutzmittel nicht eingesetzt werden können (vergl. Kapitel 2.1), bleiben konstruktive Massnahmen oder die Wahl der verwendeten Holzarten die einzigen Möglichkeiten, die Wachstumsbedingungen für Fäuleerreger im verbauten Holz zu verschlechtern.

Die Entwicklung und die Beurteilung derartiger Massnahmen setzt jedoch die Kenntnis jener ökologischen Einflussgrössen voraus, welche an Wildbachsperren für das Auftreten und die Intensität einer Fäule massgebend sind. Die Umweltbedingungen können sowohl zwischen den Standorten der Bauwerke als auch zwischen den einzelnen Rundhölzern stark variieren, weshalb allein aus dem Nachweis eines Fäuleerregers an einem Rundholz kaum auf das Auftreten einer technisch relevanten Fäule geschlossen werden kann.

Über den Einfluss von Standorts- und Einbaubedingungen auf die Dauerhaftigkeit von Wildbachsperren aus Holz liegen zahlreiche Erfahrungen und Empfehlungen aus der Praxis vor. So wird zum Beispiel darauf hingewiesen, dass der Einsatz von Holz in Schattenlagen und ständig wasserführenden Gerinnen, die Bepflanzung der Gerinneflanken sowie verschiedene ausführungstechnische Details eine günstige Auswirkung auf die Lebensdauer der Bauwerke haben (Rickli 1997, Böll *et al.* 1999, Länger 1999). Daten über den Holzzustand von Wildbachsperren liegen jedoch nur wenige vor (Zeller & Röthlisberger 1987, Böll *et al.* 1999). In diesen Studien beruhte die Analyse des Holzzustands zudem nur auf einer optischen Ansprache des Vermorschungsgrades.

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, den Einfluss spezifischer Umweltparameter auf den Holzzustand von Wildbachsperren zu analysieren. Dabei dienten die Untersuchungsobjekte bzw. die Ergebnisse der Studie in Kapitel 2 als Ausgangsmaterial. Das Zusammenspiel verschiedener Umweltfaktoren mit den vorhandenen Fäuleerregern wurde mittels eines statistischen Modells analysiert und geprüft, welche dieser Faktoren bzw. Pilzarten für die Entstehung einer Fäule relevant sind.

[1] Die Prozentangaben bei der Holzfeuchte beziehen sich auf die Masse des im Holz enthaltenen Wassers gemessen an der Trockenmasse des Holzes.

3.2 Material und Methoden

Für die Untersuchung wurden dieselben Sperren verwendet, an welchen die Basidiomycetenflora untersucht worden war (vergl. Tabelle 2.1, S 12). Für einen qualitativen Vergleich wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen zusätzlich an einer über 60 Jahre alten Sperre (Standort: Chamlisboden, Gemeinde Giswil, OW; Koord. der Landeskarte: 625'200/189'200, 1100 m ü.M.) durchgeführt.

3.2.1 Erfassung des Holzzustandes mittels Resistographie

Für die Erfassung des Holzzustandes kam nur eine nahezu zerstörungsfreie Methode in Frage, um die Sicherheit der untersuchten Bauwerke nicht zu gefährden. Gewählt wurde ein *Resistograph® Typ 1410* der Firma *Frank Rinn Distribution*, Heidelberg D. Dieses Gerät wird vor allem bei der Beurteilung von Parkbäumen sowie bei Stabilitätsbeurteilungen von Bauholz in Altbauten verwendet (Rinn 1994a, Büchele 1995, Bethge *et al.* 1996).

Das Messprinzip des Resistographen beruht auf einer mit konstantem Vorschub ins Holz getriebenen rotierenden Bohrnadel von 3 mm Durchmesser (Fischer & Rinn 1995). Die Stromaufnahme des Bohrers ist dabei Mass für den Widerstand, welchen die Nadel entlang des Bohrweges überwinden muss. Im Falle von Fäulen oder Hohlräumen sinkt der Bohrwiderstand ab, was sich im Bohrprofil als mehr oder weniger deutlicher Einbruch der Kurve abzeichnet (Abbildung 3.1). Beim verwendeten Gerät vom Typ 1410 werden 25 Messwerte pro Millimeter registriert. Alle Bohrungen wurden mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 28 cm/min durchgeführt. In vorliegender Arbeit genügte die Behandlung des Bohrwiderstandes als

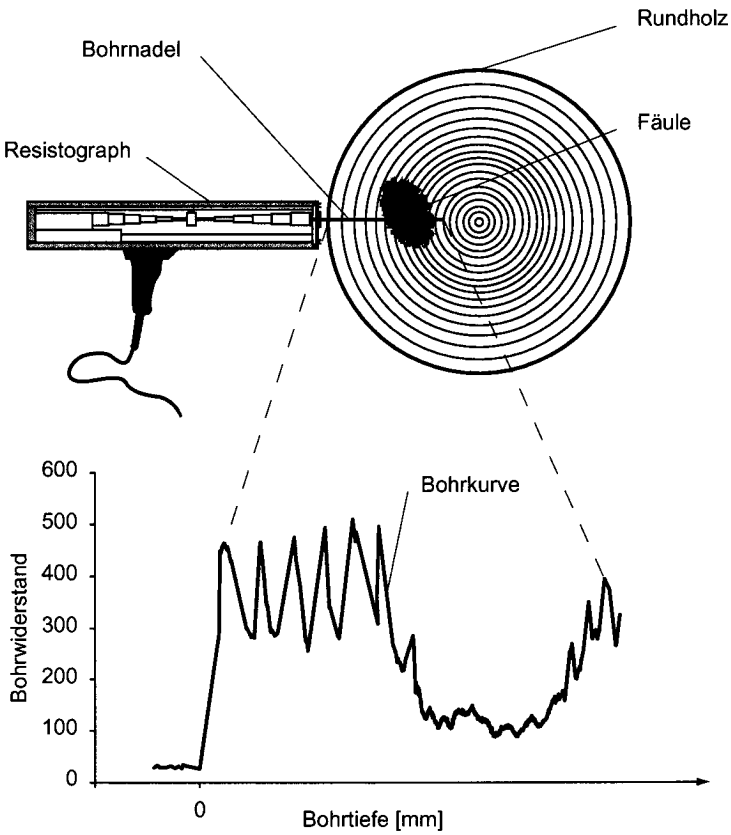


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Messprinzips beim Resistographen. Eine Bohrnadel wird mit konstanter Geschwindigkeit ins Holz getrieben. Die dazu benötigte Stromaufnahme des Geräts wird in Abhängigkeit der Bohrtiefe aufgezeichnet und repräsentiert die Dichteschwankungen im Holzkörper (unten). Bei Nadelholz sind die Jahrringe in der Bohrkurve deutlich sichtbar. Eine Fäule wird als Einbruch in der Kurve wiedergegeben, wobei die Jahrringstruktur je nach Intensität der Fäule sukzessive verschwindet. Der Bohrwiderstand wird als dimensionslose Grösse behandelt.

dimensionslose Grösse, welche sich aus der maximalen Stromaufnahme des Motors und der Auflösung der Ausgabeelektronik (12 bit) ergibt (Rinn *et al.* 1996). Andere Autoren definieren die Einheit des Bohrwiderstands als elektrische Spannung (Görlacher & Hättich 1990) oder über das Drehmoment an der Bohrnadelspitze (Helms & Niemz 1994).

Der verwendete Resistograph verfügte noch nicht über eine interne Speichermöglichkeit für die Messprofile, wie sie heute für ähnliche Geräte angeboten wird. Deshalb wurde das Bohrgerät via serielle Schnittstelle mit einem Taschenrechner vom Typ Hewlett-Packard® 200 LX verbunden und die Messwerte mit Hilfe eines Logger-Programms (Eigenentwicklung auf der Basis von *Pascal*®) im ASCII Datenformat gespeichert.

An allen Probestellen des in Kapitel 2.2.1 (Abbildung 2.2, S. 14) beschriebenen Rasters (60 cm Abstand in axialer Richtung der Rundhölzer) erfolgte mit dem Resistographen je eine Bohrung. Die Rundhölzer wurden nicht vollständig durchbohrt, um eine Beschädigung der Bohrnadel beim Auftreffen auf das dahinterliegende Erdmaterial zu vermeiden. Das eingesetzte Gerät war ebenfalls noch nicht mit einer automatischen Bohrtiefenbegrenzung ausgestattet. Ein vom Taschenrechner ausgegebenes Signal nach 5000 Messwerten erlaubte ein manuelles Anhalten des Bohrers bei rund 20 cm Bohrtiefe. Für die Auswertung wurden jeweils die ersten 15 cm ab der Holzoberfläche berücksichtigt. Bei einigen Rundhölzern, welche weniger als 20 cm Durchmesser aufwiesen, wurde die ausgewertete Bohrtiefe auf 10 cm reduziert.

An zwei Rundhölzern der Sperre Nr. 1 (vergl. Tabelle 2.1, S. 12) wurden zwischen den Probestellen (Abstand 60 cm) zusätzliche Bohrungen durchgeführt, wodurch sich ein Probenraster von 30 cm ergab. Anschliessend wurde geprüft, ob sich aus dem engeren Raster ein Informationsgewinn bezüglich des Auftretens einer Fäule ergab.

3.2.2 Analyse der Bohrkurven

Die Beurteilung von Bohrkurven erfolgt in der Baumpflegepraxis sowie bei der Prüfung von Holzbauwerken in der Regel von Auge, was eine grosse Erfahrung erfordert (Rinn 1994b). Neuere Entwicklungen (z.B. IML 2000) ermöglichen heute zwar eine graphische Aufbereitung der Messprofile, deren Beurteilung bezüglich des Holzzustandes jedoch weiterhin visuell erfolgt.

Für die vorliegende Studie wurde ein numerisches, computergestütztes Auswertungsverfahren entwickelt, um eine möglichst grosse Konstanz bei der Analyse der Bohrprofilen zu gewährleisten. Das Verfahren basiert auf dem Erscheinungsbild der Bohrkurven. Merkmale von Bohrprofilen, welche auch bei einer visuellen Ansprache verwendet werden, machen dabei die einzelnen Kurven untereinander vergleichbar. Ein vom Autor der vorliegenden Arbeit entwickeltes Computerprogramm (Basis: *Microsoft Excel*® und *Visual Basic for Application*®) ermittelt zunächst für jede Bohrkurve ein Bohrwiderstandsniveau, welches dem „normalen" Kurvenverlauf im intakten Holz an dieser Stelle entspricht. Anschliessend wird die Länge jener Bereiche der Kurve, welche deutlich unter diesem individuellen Referenzniveau liegen, vermessen und durch die Länge der gesamten Bohrstrecke dividiert (Abbildung 3.2). Dieser Quotient wird in der Folge als Fäulegrad [%] bezeichnet und dient als Vergleichsgrösse des Holzzustandes der Probestellen. Das detaillierte Verfahren zur Bestimmung von Referenzniveau und Fäulegrad jeder Kurve ist in Anhang III dargestellt.

Dreissig zufällig gewählte Bohrprofile dienten zur Überprüfung der Korrelation zwischen den Resultaten des Auswertungsprogramms und denjenigen einer visuellen Ansprache. Bei der visuellen Analyse, welche ohne Kenntnisse der Ergebnisse aus dem Computerprogramm erfolgte, wurden die deutlichen Einbrüche der Kurve von Auge beurteilt (Rinn 1994b, Mattheck & Hötzel 1997), markiert und anschliessend deren Länge gemessen. Diese als faul taxierten Abschnitte der Kurve dienten – analog zur Computeranalyse – der Bestimmung des Fäulegrades.

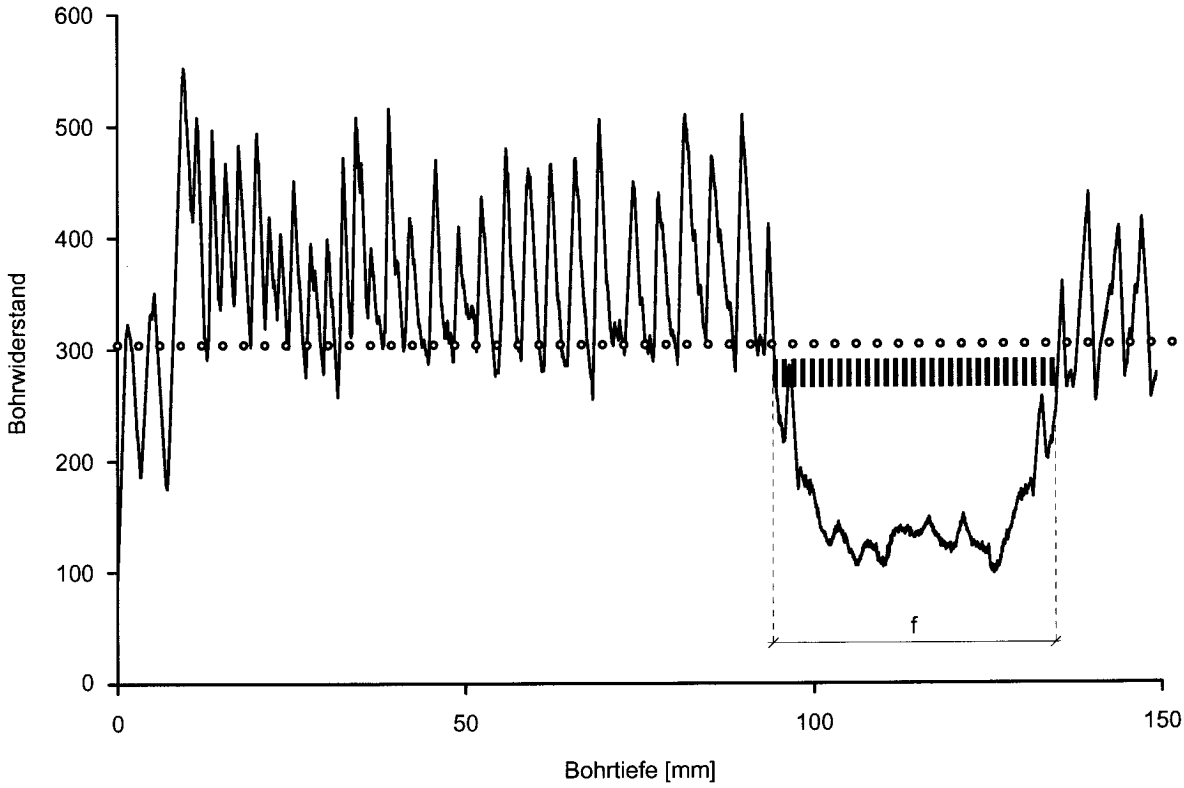


Abbildung 3.2: Beispiel für die Ermittlung des Fäulegrades an einer Probestelle. Die Abschnitte der Kurve, welche unterhalb des individuellen Referenzniveaus der Kurve (○○○○) des Bohrwiderstands liegen, werden als faul taxiert (||||). Eine Division der Länge f dieser Abschnitte durch die Länge der gesamten Bohrstrecke (hier: 150 mm) ergibt den Fäulegrad in %. Im Beispiel beträgt der Fäulegrad 27%. Zur Definition des Referenzniveaus vergleiche Anhang III.

3.2.3 Einflussfaktoren auf den Holzzustand

Neben dem in Kapitel 2 behandelten Vorkommen der häufigsten Pilzarten wurden für jede Probestelle folgende Parameter erhoben:

(a) Meereshöhe

(b) Exposition des Gerinnes

(c) Baujahr bzw. Alter der Sperre

(d) Durchmesser des Rundholzes

(e) Bauteil

(f) Holzart

(g) Stirnseite

Die Bestimmung von Meereshöhe (a) und Exposition (b) erfolgte aus der Landeskarte 1:25'000. Das Baujahr der Sperre (c) konnte aus Planungsunterlagen der Forstdienste entnommen werden. Der Durchmesser für jedes Rundholz (d) wurde bei der Datenerhebung vermessen. Der Faktor Bauteil (e) bezieht sich auf die in Kapitel 2.2.5 (Abbildung 2.7, S. 17) beschriebene Zuordnung jeder Probestelle zu einem der Bauteile „Flügel", „Einbindung" oder „Wasserbereich". Die Holzart (f) jedes Rundholzes wurde anhand mikroskopischer Merkmale bestimmt, wobei aufgrund der verwendeten Holzarten nur zwischen Tanne (*Abies alba* Mill.) und Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) unterschieden werden musste. Die Unterscheidungsmerkmale sind in Tabelle 3.1 dargestellt (nach Phillips 1970, Schweingruber 1990). Beobachtungen im Feld zeigten, dass sich Pilzfruchtkörper oft an den Stirnseiten (g) der verbauten Rundhölzer bildeten (Abbildung 3.3). Von jeder Probestelle wurde deshalb festgehalten, ob sie sich am Ende eines Rundholzes befand; d.h. rund 10 cm von der Stirnseite entfernt (vergl. Kapitel 2.2.1).

Tabelle 3.1: Merkmale zur mikroskopischen Unterscheidung von Tannen- und Fichtenholz. +: vorhanden; -: nicht vorhanden. Nach Phillips (1970).

Merkmal	Schnittebene	Tanne	Fichte
Radiale Harzkanäle	tangential	-*	+
Vertikale Harzkanäle	quer	-*	+
Markstrahltracheiden	radial	-	+

*): Bei Tanne können im Falle von Verletzungen traumatische Harzkanäle auftreten

Abbildung 3.3: Pilzfruchtkörper traten häufig an den Stirnseite von Rundhölzern auf. Im Bild Fruchtkörper von *Gloeophyllum sepiarium* an der Sperre Nr. 8.

3.2.4 Statistische Analyse

Um zu prüfen, welche der erfassten Parameter einen Einfluss auf das Auftreten einer Fäule haben, wurden zunächst alle Probestellen in eine der beiden Klassen „faul" bzw. „nicht faul" eingeteilt. Als Schwellenwert für „faul" wurde ein Fäulegrad von 10% festgelegt. Ein logistisches Modell diente der statistischen Auswertung. Derartige Modelle ermöglichen die Analyse einer binären Zielgrösse, welche von nominalen Einflussgrössen abhängt (Cox & Snell 1989, Urban 1993). Das nachfolgend beschriebene Vorgehen bei der Modellbildung sowie bei der Beurteilung der Modellgüte erfolgte nach Mandallaz *et al.* (1986), welche das verwendete Verfahren für eine ähnliche Problemstellung detailliert beschreiben. Für alle statistischen Berechnungen wurde die Statistiksoftware *SAS® Systems for Windows®* (Version 8.02) eingesetzt.

Die in Kapitel 3.2.3 dargestellten Einflussfaktoren lagen teilweise als Nominaldaten (z.B. die Holzart), teilweise als Intervalldaten (z.B. das Alter der Sperre) vor. Zur Analyse wurden alle erhobenen Daten in Nominaldaten umgewandelt (Tabelle 3.2).

Die Einflussfaktoren (erklärende Variablen) beziehen sich einerseits auf den Standort der Sperre, andererseits auf die einzelne Probestelle (vergl. Tabelle 3.2), weshalb sie zur Bildung des Modells in zwei entsprechende Gruppen a_j (Sperre) und b_{ij} (Probestelle) eingeteilt wurden. Durch die Einteilung der Werte des Fäulegrades in die beiden Klassen „faul" bzw. „nicht faul" erhält man eine binäre zu erklärende Variable Y, welche den Wert 0 („nicht faul") oder 1 („faul") annehmen kann. Die Wahrscheinlichkeit p_{ij}, dass eine Probestelle keine Fäule aufweist (also Y = 0) schreibt sich zu

$$p_{ij} = P(Y = 0 / \bar{a}_j, \bar{b}_{ij}) = \frac{\exp(\text{const.} + \bar{a}_j \cdot \bar{\alpha} + \bar{b}_{ij} \cdot \bar{\beta})}{1 + \exp(\text{const.} + \bar{a}_j \cdot \bar{\alpha} + \bar{b}_{ij} \cdot \bar{\beta})}$$

j = 1, ... , 9 Sperren
i = 1, ... , n Probestellen an den einzelnen Sperren

wobei die Vektoren α und β die unbekannten Koeffizienten der in den Variablenvektoren a_j und b_{ij} enthaltenen Faktoren darstellen (Skalarprodukte). Durch logistische Transformation erhält man

$$l_{ij} = \log \frac{p_{ij}}{1 - p_{ij}} = \text{const.} + \bar{a}_j \cdot \bar{\alpha} + \bar{b}_{ij} \cdot \bar{\beta}$$

Die Koeffizienten aller Faktoren der Vektoren α und β wurden mit der Maximum-Likelihood-Methode geschätzt und auf einen signifikanten Einfluss auf die Zielvariable geprüft. Die Wahrscheinlichkeit p_{ij} stellt dabei eine Funktion von l_{ij} dar (Mandallaz *et al.* 1986). Somit weist das Vorzeichen eines geschätzten Koeffizienten darauf hin, ob ein Faktor die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Fäule negativ oder positiv beeinflusst. Zudem gibt ein Vergleich der Beträge der Koeffizienten Aufschluss darüber, welche Faktoren den stärksten Einfluss auf die Zielgrösse ausüben.

Die Anpassungsgüte des Modells wurde anhand des Prognoseerfolgs für die einzelnen Sperren überprüft (Urban 1993). Dabei wurde für jede Sperre die aus der Modellschätzung ermittelte Wahrscheinlichkeit p_{ij} mit der tatsächlich beobachteten Anzahl Probestellen ohne Fäule pro Sperre verglichen. Die Nullhypothese lautete: *H_0: Für die Sperre j unterscheidet sich die aus dem Modell resultierende theoretische Häufigkeit für Y = 1 („faul") nicht von der tatsächlich beobachteten Häufigkeit von Probestellen mit einer Fäule.* Die geschätzte sowie die beobachtete Anzahl der Probestellen mit einer Fäule aller neun Sperren wurden anschliessend mit einem X^2-Anpassungstest (Sokal & Rohlf 1995) auf signifikante Abweichungen geprüft.

Tabelle 3.2: Parameter für die statistische Analyse des Holzzustands an den untersuchten Probestellen. Der Fäulegrad lag nach der Einteilung in die beiden Klassen „faul" bzw. „nicht faul" als binäre Zielgrösse vor. Die berücksichtigten Einflussfaktoren (Erklärende Variablen) wurden in zwei bzw. drei Kategorien eingeteilt. Bei den Fäuleerregern wurden Basidiomyceten ab 30 Nachweisen auf allen Sperren berücksichtigt (Summe aller Probestellen mit mindestens einem Fund, vergl. Tabelle 2.3, S. 21).

Zielgrösse	**Ausprägungen**
Fäulegrad	0: nicht faul; 1: faul; Schwellenwert für faul: Fäulegrad > 10%
Erklärende Variable	**Kategorie**
Auf die Sperre bezogene Einflussfaktoren	
(a) Meereshöhe	1: 900 m ü.M.; 2: > 900 m ü.M.
(b) Exposition	1: nordexponiert (inkl. Ost); 2: südexponiert (inkl. West)
(c) Alter der Sperre	1: 0-10 Jahre; 2: 11-20 Jahre; 3: 21-30 Jahre
Auf die Probestelle bezogene Einflussfaktoren	
(d) Durchmesser des Balkens	1: < 30 cm; 2: ≥ 30 cm < 40 cm; 3: ≥ 40 cm
(e) Bauteil	1: Sperrenflügel; 2: Einbindung; 3: Wasserbereich
(f) Holzart	1: Fichte; 2: Tanne; 3: unbestimmt
(g) Probestelle liegt an Stirnseite	0: nein; 1: ja
Fäuleerreger: *Fomitopsis pinicola, Antrodia serialis, Sistotrema brinkmannii, Gloeophyllum sepiarium, Armillaria cepistipes, Gloeophyllum odoratum*	0: nicht vorhanden; 1: vorhanden

3.3 Resultate

Das verwendete Verfahren der Datensicherung mit dem Taschenrechner ermöglichte die Durchführung von bis zu 150 Bohrwiderstandsmessungen pro Tag. Von den total 979 Probestellen lagen 972 Messungen vor. Durch Fehlmanipulationen bei der Aufnahme gingen insgesamt 7 Bohrprofile verloren. Der Anteil von Probestellen mit einer ausgewerteten Bohrstrecke von 10 cm betrug 2.4% (23) aller ausgewerteten Bohrprofile. Vier Bohrprofile wurden aus technischen Gründen (Ausfall Aufzeichnungsgerät) nur bis in eine Tiefe zwischen 8.5 und 13 cm ausgewertet. Alle ökologischen Faktoren liessen sich für sämtliche Sperren bzw. Probestellen erfassen, wobei die Holzart dreier Rundhölzer (mit je einer Probestelle) nicht bestimmt werden konnte. Zur Auswertung kamen schliesslich 969 Probestellen. Die Parameter aller Probestellen sind in Anhang IV zusammengestellt.

Die Ermittlung des Fäulegrades durch das Auswertungsprogramm ergab die in Abbildung 3.4 dargestellte Verteilung. Der Median des Fäulegrades lag bei 10.08% der Bohrstrecke, wobei 488 Probestellen einen Fäulegrad von über 10% („faul"), 481 einen solchen von weniger als 10% („nicht faul") aufwiesen. An der über 60 jährigen Sperre (Giswil, OW) lag das Verhältnis "faul" zu „nicht faul" bei 77 zu 62, bei einem Median des Fäulegrades von 15.36%.

Die Ergebnisse der im Abstand von 30 cm durchgeführten Bohrungen an zwei Rundhölzern der Sperre Nr. 1 sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Bei der Berücksichtigung aller Bohrungen (Abstand 30 cm) wiesen 85% der Bohrungen einen Fäulegrad > 10% (17 von 20) auf. Bei der Verwendung nur jener Bohrungen im Abstand von 60 cm (normales Raster) ergab sich ein Anteil von 82% (9 von 11). Diese beiden Anteile unterscheiden sich nicht signifikant (Vier-Felder-Tafel, Fisher's

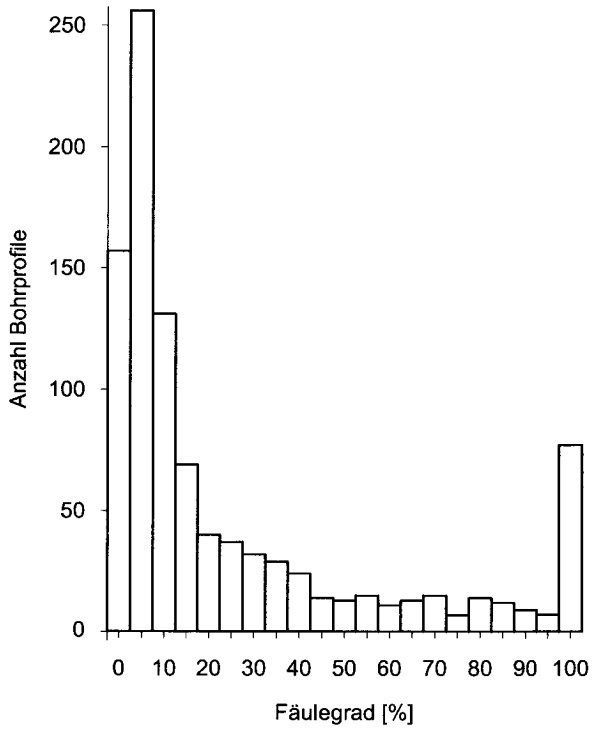


Abbildung 3.4: Verteilung des Fäulegrades aller Bohrprofile (N = 969).

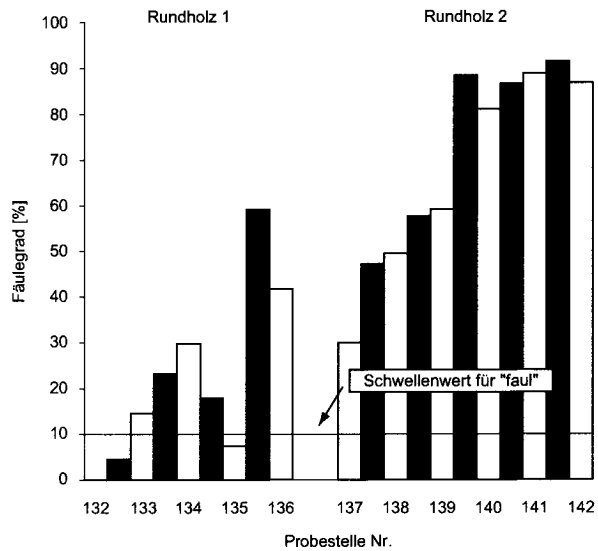


Abbildung 3.5: Ergebnisse der Bohrungen im Abstand von 30 cm an zwei Balken der Sperre Nr. 1. Die weissen Säulen entsprechen den Bohrungen bzw. Fäulegraden der Bohrungen Nr. 132 bis 142 (vergl. Anhang I und II). Die grauen Säulen sind die zusätzlichen Bohrungen. Die Bohrung Nr. 132 wies keine Fäule auf (Fäulegrad 0%). Der Anteil von Punkten mit einer Fäule (Fäulegrad > 10%) unterschieden sich bei Berücksichtigung aller Bohrungen (3 von 20) bzw. nur jener im Abstand von 60 cm (2 von 11) nicht signifikant.

exact probability test, p = 0.81). Ein engeres Proberaster hätte also zumindest für diese beiden Rundhölzer keinen wesentlichen Informationsgewinn gebracht.

Die sowohl visuell als auch mit dem Computerprogramm ermittelten Fäulegrade von 30 zufällig ausgewählten Bohrprofilen zeigten eine gute Korrelation (Abbildung 3.6). Die Steigung der Regressionsgeraden (β = 0.90) wich nicht signifikant von 1 ab ($p > 0.05$). Bei einzelnen Bohrprofilen traten jedoch Differenzen zwischen den beiden Methoden von bis zu 40% (Fäulegrad) auf.

In Tabelle 3.3 sind die Ergebnisse der logistischen Datenanalyse zusammengestellt. Einen signifikanten Einfluss auf das Auftreten einer Fäule hatte die Anwesenheit aller berücksichtigten Pilzarten mit Ausnahme von *Armillaria cepistipes*. Zudem wurde für die Faktoren Meereshöhe, Exposition, Bauteil und Stirnseite ein signifikanter Zusammenhang mit dem Auftreten einer Fäule festgestellt. In welcher Art die einzelnen Faktoren das Auftreten bzw. Ausbleiben einer Fäule beeinflussen, ergibt sich aus dem Vorzeichen der geschätzten Koeffizienten (Tabelle 3.4). Dieses lässt sich folgendermassen interpretieren: Ist das Vorzeichen des Koeffizienten einer bestimmten Kategorie positiv, so nimmt die Wahrscheinlichkeit für „nicht faul" P(Y = 0) zu, wenn der Einflussfaktor in diese Kategorie fällt. Umgekehrt erhöht sich bei negativem Vorzeichen des Koeffizienten die Wahrscheinlichkeit, dass die Probestelle eine Fäule aufweist. Der Wert des Koeffizienten in der letzten Kategorie eines Einflussfaktors entspricht dabei immer der Summe der übrigen multipliziert mit –1.

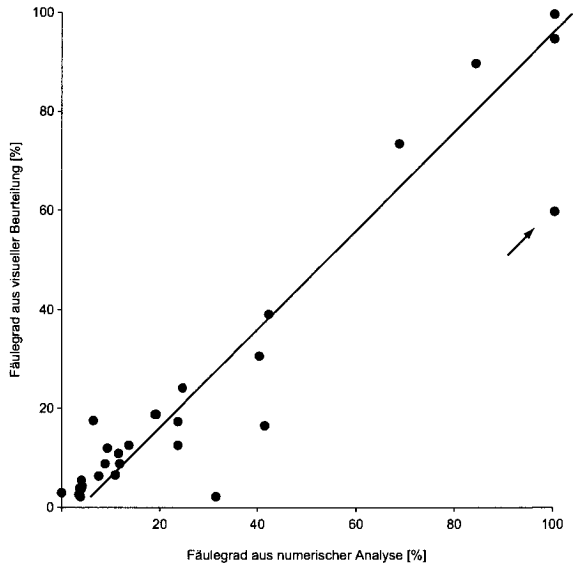


Abbildung 3.6: Korrelation zwischen dem Fäulegrad der computergestützten numerischen Analyse (x-Achse) und aus einer visuellen Ansprache (y-Achse) von 30 zufällig ausgewählten Bohrprofilen. Die Gleichung der Regressionsgerade lautet: $y = 0.91x - 1.00$, $R^2 = 0.90$. Der Pfeil bezeichnet die Messung mit der stärksten Abweichung zwischen den beiden Methoden (Fäulegrad aus numerischer Analyse: 100%, aus visueller Beurteilung 60%).

Tabelle 3.3: Zusammenstellung der Ergebnisse aus dem logistischen Modell. Fettgedrukte Einflussfaktoren haben einen signifikanten Einfluss auf das Auftreten einer Fäule ($p < 0.05$).

Einflussfaktoren	**FG**	**$\chi 2$**	**p**
Konstante	1	38.15	< 0.001
Fomitopsis pinicola	1	62.93	< 0.001
Antrodia serialis	1	31.52	< 0.001
Sistotrema brinkmannii	1	5.27	0.022
Gloeophyllum sepiarium	1	20.45	< 0.001
Armillaria cepistipes	1	1.06	0.302
Gloeophyllum odoratum	1	6.54	0.011
Meereshöhe	1	7.99	0.005
Exposition	1	4.52	0.034
Alter der Sperre	2	2.66	0.264
Durchmesser	2	0.93	0.628
Bauteil	2	42.45	< 0.001
Holzart	1	0.64	0.423
Stirnseite	1	10.44	0.001

Tabelle 3.4: Koeffizienten der Einflussgrössen auf das Auftreten einer Fäule aus dem logistischen Modell. Bei positivem Vorzeichen erhöht sich bei einer Zunahme dieses Faktors (= Wechsel von 0 nach 1 bzw. von einer anderen in die entsprechende Kategorie) die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis „nicht faul" an einer Probestelle. Ein negatives Vorzeichen bedeutet umgekehrt eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für „faul" P(Y = 1). Die Schätzung der Koeffizienten der letzten Kategorie einer Einflussgrösse ergibt sich aus der Summe der übrigen multipliziert mit −1, weshalb sich die Angabe der Standardfehler erübrigt. Signifikante Einflussgrössen ($p < 0.05$) sind fettgedruckt. n: Anzahl Probestellen in der entsprechenden Kategorie (Total ausgewertete Probestellen: N = 969).

Einflussgrösse	**Kategorien**	**Schätzwerte der Koeffizienten**	**Standardfehler**	**p**	**n**
Konstante		-3.93	0.64	<0.001	
Fomitopsis pinicola	nicht vorhanden	0.91	0.12	<0.001	783
	vorhanden	-0.91			186
Antrodia serialis	nicht vorhanden	0.81	0.14	<0.001	847
	vorhanden	-0.81			122
Sistotrema brinkmannii	nicht vorhanden	0.31	0.13	0.02	871
	vorhanden	-0.31			98
Gloeophyllum sepiarium	nicht vorhanden	0.94	0.21	<0.001	888
	vorhanden	-0.94			81
Armillaria cepistipes	nicht vorhanden	0.17	0.16	0.30	922
	vorhanden	-0.17			47
Gloeophyllum odoratum	nicht vorhanden	1.33	0.52	0.01	939
	vorhanden	-1.33			30
Meereshöhe	<= 900 m ü.M.	-0.40	0.14	0.005	343
	> 900 m ü.M.	0.40			626
Exposition	nordexponiert (inkl. Ost)	0.33	0.16	0.03	765
	südexponiert (inkl. West)	-0.33			204
Alter der Sperre	0-10 Jahre	0.14	0.12	0.25	501
	11-20 Jahre	-0.31	0.21	0.13	305
	21-30 Jahre	0.17			163
Durchmesser	< 30 cm	0.07	0.13	0.61	485
	>= 30 < 40 cm	0.06	0.12	0.60	365
	>= 40 cm	-0.13			119
Bauteil	Flügel	-0.67	0.12	<0.001	507
	Einbindung	0.06	0.14	0.69	159
	Wasserbereich	0.61			303
Holzart	Fichte	-0.09	0.11	0.42	771
	Tanne	0.09			198
Stirnseite	ja	-0.29	0.09	0.001	381
	nein	0.29			588

Neben dem Auftreten von Fäuleerregern waren folgende Einflussfaktoren mit dem Auftreten einer Fäule signifikant korreliert: Eine geringere Meereshöhe, eine Exposition in südlicher Richtung, die Position einer Probestelle bezüglich des Bauteils sowie die Nähe einer Probestelle zu einer Stirnseite. Entsprechend den Beträgen der Koeffizienten lässt sich die Reihenfolge der Einflussstärke der Faktoren in qualitativer Art wie folgt beschreiben:

Bauteil > Meereshöhe > Exposition > Stirnseite.

Auch das Vorkommen der verschiedenen Pilzarten an den Probestellen beeinflusste das Auftreten einer Fäule unterschiedlich stark, wobei sich folgende qualitative Abfolge ergibt:

Gloeophyllum odoratum > *Gloeophyllum sepiarium* > *Fomitopsis pinicola* > *Antrodia serialis* > *Sistotrema brinkmannii.*

Der Vergleich zwischen der beobachteten und der durch das Modell berechneten Anzahl Probestellen mit Fäule pro Sperre ergab einen signifikanten Unterschied ($X^2 \cong 39$ bei 9 Freiheitsgraden, $p < 0.001$). Die grösste Differenz zwischen Prognose und Beobachtung ergab sich bei der Sperre Nr. 1 mit 25 Probestellen auf (Tabelle 3.5). Bezogen auf die Gesamtzahl der Probestellen an dieser Sperre (146) entspricht dies einer Überschätzung des Anteils von Probestellen mit einer Fäule um 17%. Bei einer Eliminierung dieser Sperre aus der Auswertung sinkt X^2 auf 13. Der Unterschied zwischen Prognose und Beobachtung ist dann nicht mehr signifikant ($p > 0.05$).

Tabelle 3.5: Beobachtete sowie durch das Modell geschätzte Anzahl der Probestellen mit einer Fäule pro Sperre. Die grösste Abweichung wurde an der Sperre Nr. 1 festgestellt, welche als Ausreisser betrachtet werden kann.

Nr.	Bezeichnung	Gesamtzahl der Probestellen	Beobachtete Anzahl Probestellen mit Fäule	Geschätzte Anzahl Probestellen mit Fäule	Differenz Beobachtung - Schätzung
1	Trepsental, "Zufluss III", A	146	75	100	-25
2	Trepsental, "Zufluss III", B	159	95	97	+2
3	Steingraben	51	21	22	-1
4	Speichenrus	138	69	65	+4
5	Chratzerlibach	117	53	64	-11
6	Dürrenbach	68	27	26	+1
7	Heitlibach	127	67	57	+10
8	Ebenmattgraben	66	33	31	+2
9	Seckigraben	97	48	42	+6

3.4 Diskussion

3.4.1 Erfassung des Holzzustands

Vor der Durchführung der Studie wurden verschiedene Verfahren zur zerstörungsfreien Holzuntersuchung evaluiert, um eine Quantifizierung des Fäulezustandes zu ermöglichen. Weil die verbauten Rundhölzer der Sperren meist zur Hälfte im Bodenmaterial eingelassen waren, kamen Verfahren wie Schall- bzw. Ultraschallmessungen oder Röntgenuntersuchungen nicht in Frage (Habermehl & Ridder 1992, Niemz *et al.* 1998a). Messgeräte, welche auf der Eindringtiefe einer ins Holz geschossenen Nadel beruhen (z.B. Pilodyn-Gerät), erfassen den Holzzustand nur bis in eine Tiefe von 2 bis 3 cm (Görlacher 1987, Niemz *et al.* 1998b), wodurch Fäulen im Kernbereich nicht erfasst werden können. Die Prüfung der Biegefestigkeit von Bohrkernen (Mattheck *et al.* 1997) wurde nicht eingesetzt, weil deren Entnahme aufgrund der zum Teil fortgeschrittenen Fäulen nicht immer möglich war (vergl. Kapitel 2.2.2).

Die gewählte Methode der Resistographie ermöglicht relativ rasche Messungen unter geringer Beschädigung der Sperren. Faulstellen oder Hohlräume im Millimeterbereich können erfasst werden, sofern sie direkt durchbohrt werden (Niemz *et al.* 2002). Messungen entlang einer Linie, wie sie Resistographenbohrungen oder auch Schallmessungen darstellen, können jedoch das Ausmass einer Fäule in einem Rundholz nur näherungsweise erfassen (Gruber 2001). Mehrfache Messungen in systematischer Anordnung (verschiedene Radien) würden bei derartigen Verfahren bessere Aussagen ermöglichen (Wenzel 1999a). Dies liess sich jedoch an den untersuchten Sperren wegen der zum Teil schlechten Zugänglichkeit der Probestellen nicht realisieren. Wie bei allen nicht-destruktiven Methoden der Holzbeurteilung kann auch bei Bohrprofilen das effektiv vorhandene Ausmass einer Fäule erst durch das nachfolgende Aufschneiden des Holzkörpers verifiziert werden. Dies war aus den erwähnten Gründen (vergl. Kapitel 3.2.1) an den Sperren nicht möglich.

Das gewählte Verfahren mit dem Fäulegrad liefert eine quantitative Angabe über die Ausdehnung einer Fäule entlang der Bohrstrecke. Welchen Einfluss diese auf das Festigkeitsverhalten der einzelnen Rundhölzer hat, kann daraus wahrscheinlich nicht abgeleitet werden. Es ergeben sich ähnliche Schwierigkeiten wie bei der Übertragung von Festigkeitsprüfungen an Kleinproben auf das Bruchverhalten ganzer Bauteile (Madsen & Buchanan 1986, Wenzel 1999b, Mischler-Schrepfer 2000). Hinzu kommen die unterschiedlichen Auswirkungen verschiedener Fäuleerreger auf den Bohrwiderstand bzw. die Holzfestigkeit (Schwarze & Fink 1994). Zudem muss berücksichtigt werden, dass die gewählte Auswertungstiefe von 15 cm aufgrund der variierenden Durchmesser nicht für alle Rundhölzer denselben Anteil des Stammquerschnitts repräsentiert.

Das gewählte Verfahren mit dem Fäulegrad als Kenngrösse eines Bohrprofils ermöglichte es aber, die einzelnen Bohrkurven – und somit den Holzzustand an den Probestellen – anhand einer *relativen* Messgrösse objektiv zu erfassen und zu vergleichen. Die Rasterweite von 60 cm scheint aufgrund der orientierenden Bohrungen mit 30 cm Abstand (vergl. Abbildung 3.5, S. 42) ein gutes Bild des Holzzustandes zu vermitteln, wenn auch das Verfehlen von Fäulen kleinerer Ausdehnung nicht ausgeschlossen werden kann.

3.4.2 Analyse der Bohrkurven

Das entwickelte Computerprogramm ermöglichte eine rasche und reproduzierbare Auswertung der Bohrprofile. Das arithmetische Mittel des Bohrwiderstands über das ganze Bohrprofil, welches in verschiedenen Studien als Kennwert für den Holzzustand verwendet wurde (Görlacher & Hättich 1990, Büchele 1995), wurde aus folgenden Gründen nicht als Referenzgrösse eingesetzt:

Bei Balken oder Rundhölzern wird der Bohrwiderstand durch Wuchsmerkmale wie Jahrringbau, Reaktionsholz oder Astigkeit beeinflusst (Tobisch & Mittag 1998, Gruber 2000). Auch der Wassergehalt des Holzes wirkt sich auf den mittleren Bohrwiderstand aus (Helms & Niemz 1994, Rinn 1994a, Rinn *et al.* 1996). Eckstein & Sass (1994) fanden bei verschiedenen Laubhölzern eine Erhöhung des mittleren Bohrwiderstands bei höherer Holzfeuchte, was sie auf einen grösseren Energiebedarf bei der Kompression des feuchten Bohrmehls zurückführen. Eigene Voruntersuchungen (Daten nicht dargestellt) mit Fichtenholz bestätigen diese Ergebnisse. Das für diese Studie entwickelte numerische Verfahren, welches zur Analyse der Kurven verwendet wurde, war vom mittleren Bohrwiderstand weitgehend unabhängig. Dadurch konnten insbesondere Einflussgrössen umgangen werden, welche den mittleren Bohrwiderstand erhöhen und so einen besseren Holzzustand vorgeben, als effektiv vorliegt (Holzfeuchte, Reaktionsholz, Äste).

Zur Analyse der Bohrkurven mussten Minimalwerte für die Definition intakter Jahrringe eingesetzt werden (vergl. Anhang III). Grenzfälle, wie beispielsweise eine leichte Dämpfung der Amplituden der Bohrkurve bei beginnender Fäule (Rinn *et al.* 1990), können deshalb zu verfälschten Resultaten führen. Dieses Problem besteht aber auch bei einer visuellen Beurteilung von Bohrprofilen. Nur ein deutliches Absinken des Bohrwiderstands kann eindeutig als Fäule erkannt werden (Mattheck *et al.* 1997). Effekte wie Schaftreibung, Nachfedern der Bohrnadel oder lokal vorhandene Feuchtezonen im Holz können weitere Verfälschungen der Bohrkurven bewirken (Wenzel 1999b).

Die automatisierten Auswertungen stimmten mit den visuellen Beurteilungen gut überein (vergl. Abbildung 3.6, S. 47). Die in drei von 30 Fällen recht grosse Abweichung (Überschätzung der visuellen Beurteilung durch das Analyseprogramm um mehr als 20%) sind wahrscheinlich durch den genannten Einfluss von Grenzfällen bedingt. Dies weist darauf hin, dass sich eine derartige Auswertung nur sinnvoll einsetzen lässt, wenn – wie im vorliegenden Falle – eine grosse Anzahl Bohrungen vorliegt. Zur Analyse weniger Bohrprofile z.B. bei der Beurteilung der Standsicherheit von Bäumen ist das Verfahren wohl weniger geeignet.

Eine mögliche Erweiterung des Analyseprogramms wäre die Registrierung der Bohrtiefe, in welcher eine Fäule lokalisiert wurde. Dadurch liessen sich einerseits Angaben über das Fortschreiten einer Fäule gewinnen (im Kern oder im Splint). Andererseits könnten daraus auch Hinweise über die zu erwartende Festigkeit der Rundhölzer erhalten werden, da eine Fäule im Randbereich wahrscheinlich einen anderen Einfluss auf den Tragwiderstand eines Rundholzes hat als Kernfäulen. Das entwickelte Programm liegt zur Zeit als Prototyp vor und muss für einen breiteren Einsatz noch verfeinert und benutzerfreundlich gemacht werden.

3.4.3 Einflussfaktoren auf den Holzzustand

Folgende Faktoren hatten einen signifikanten Einfluss auf den Holzzustand: Alle berücksichtigten Fäuleerreger mit Ausnahme von *Armillaria cepistipes*, Meereshöhe der Sperre (a), Exposition des Gerinnes (b), Bauteil (e) und Stirnseite (g). Nicht signifikant wurde bei den untersuchten Sperren die Faktoren Sperrenalter (c), Durchmesser des Rundholzes (d) sowie die verwendeten Holzarten Fichte bzw. Tanne (f). Nachfolgend werden diese Ergebnisse und ihre Bedeutung für Holzkonstruktionen im Wildbachverbau einzeln diskutiert. Am Schluss folgen einige Betrachtungen zu weiteren Faktoren, welche in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt werden konnten.

Fäuleerreger

Der deutliche Zusammenhang zwischen dem Vorkommen der häufigsten Pilzarten und der Fäuleintensität zeigt, dass in der vorliegenden Studie die technisch relevanten Fäuleerreger erfasst wurden. Die Bedeutung dieser Fäuleerreger wurde schon in Kapitel 2.4.2 diskutiert. Im Gegensatz zur Anwesenheit der Braunfäuleerreger *Fomitopsis pinicola*, *Antrodia serialis*, *Gloeophyllum sepiarium* sowie *Gloeophyllum odoratum* hatte jene des Weissfäuleerregers *Armillaria cepistipes* keinen signifikanten Einfluss auf das Auftreten einer Fäule. Dies liegt vermutlich daran, dass Braunfäuleerreger eine raschere Reduktion der Festigkeitseigenschaften bewirken (Wilcox 1978). Deshalb sind sie auch aus technischer Sicht von grösserer Bedeutung. Ob *A. cepistipes* in einer späteren Phase des Holzabbaus wichtiger wird, geht aus den vorliegenden Daten nicht hervor. Zumindest bei jüngeren Sperren scheint diese Pilzart für die Holzzerstörung eine untergeordnete Rolle zu spielen. Ein weiterer Grund für den unterschiedlichen Einfluss der Fäuletypen findet sich in der verwendete Methode der Resistographie, welche bei Braunfäulen sensitiver reagiert als bei Weissfäulen (Schwarze & Fink 1994, Schwarze 1995). Der Einfluss der Art *Sistotrema brinkmannii* war ebenfalls signifikant. Ob diese Art dabei als Fäuleerreger auftrat oder erst als Folgeart einer der übrigen Arten das Holz abzubauen vermochte, geht aus den Ergebnissen nicht hervor. Trotzdem sollte die Bedeutung dieser Pilzart wegen ihrer Häufigkeit und insbesondere auch wegen ihres nicht im Detail bekannten Abbauverhaltens (vergl. Kapitel 2.4.2) genauer untersucht werden. Ein Grund für die bisherigen uneinheitlichen Resultate könnte in der Existenz verschiedener Arten innerhalb des *S. brinkmannii* Komplexes liegen, was das variable Abbauverhalten erklären würde. Deshalb sollten in experimentellen Studien mehrere verschiedene Isolate/Arten von *S. brinkmannii* s.l. berücksichtigt werden.

Meereshöhe und Exposition (a), (b)

Der günstige Einfluss einer nördlichen Exposition des Gerinnes auf die Funktionsdauer von Wildbachsperren aus Holz wird von verschiedenen Autoren beschrieben (Zeller & Röthlisberger 1987, Rickli 1997, Böll *et al.* 1999). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie stützen diese These, wobei die relativ grobe Einteilung in Nord- und Südexposition keine weitere Differenzierung einzelner Expositionen erlaubt. Zusätzlich zeigen die Resultate, dass Sperren in tieferen Lagen stärker durch Fäulen gefährdet sind.

Der Grund für den offenbar rascheren Abbauprozess der Rundhölzer ist wahrscheinlich zunächst in den unterschiedlichen Temperaturregimes in Abhängigkeit von Höhenlage und Exposition zu finden (Ott *et al.* 1997, Kappenberger & Kerkmann 1998). Zahlreiche Studien zeigen, dass das Pilzwachstum und der Holzabbau von der Temperatur abhängen (Scheffer & Livingston 1937, Wälchli 1977, Eslyn 1986, Donnelly & Boddy 1997, Viitanen 1997). Die meisten Fäuleerreger

haben ihr Wachstumsoptimum zwischen 25 und 30°C (Grinda 1975, Schmidt 1994). Unter den Bedingungen an Wildbachsperren in Waldökosystemen kann demnach generell von einer grösseren Abbaurate bei höheren Temperaturen ausgegangen werden. Zudem ist an südlich exponierten Hängen eine erhöhte Evaporation zu erwarten, was einen Einfluss auf den Wassergehalt des verbauten Holzes und somit auf die Entwicklung von Fäulen haben kann (Næsset 1999). Die Sonneneinstrahlung als weiterer Einflussfaktor auf das Temperatur- und Wasserregime verbauten Holzes, welche von Exposition und der vorhandenen Vegetation bestimmt wird, konnte aus methodischen Gründen nicht erfasst werden (vergl. Kapitel 3.4.5).

Die Faktoren Meereshöhe und Exposition können durch konstruktive Massnahmen nicht beeinflusst werden. Dennoch sollten diesen beiden Standortfaktoren insbesondere bei der Wahl des Werkstoffs einer Verbauung beachtet werden. Von welcher Meereshöhe an und bei welcher Exposition allgemein von einer geringen Gefährdung des verbauten Holzes durch die gefundenen Fäuleerreger ausgegangen werden kann, muss jedoch in weiteren Studien untersucht werden.

Bauteil (e)

Von den erhobenen Parametern hat die Position der Probestelle (Bauteil) den grössten Einfluss auf den Fäulegrad. Dies verdeutlicht ein Vergleich des Fäulegrades (Mediane) zwischen den Bauteilen „Flügel" (23.2%), „Einbindung" (7%) und „Wasserbereich" (5.2%). Die entsprechenden Werte für die über 60 Jahre alte Sperre (Chamlisboden, Giswil OW) waren 48%, 26% und 6%. Während also der Zerfall der Sperrenflügel schon in den ersten Jahren nach dem Bau rasch fortschreiten kann, fand im vorliegenden Falle im Wasserbereich praktisch kein Holzabbau statt. Dies zeigt deutlich, dass zumindest bei dieser Sperre die Rundhölzer im Überfallbereich zwar nicht vor einem Befall durch die häufigsten Braunfäuleerreger, doch weitgehend vor der Entwicklung einer Fäule geschützt sind.

Da die Bauteile primär gemäss ihrer Lage zum Wasserfluss im Gerinne definiert wurden, ist wahrscheinlich die Holzfeuchte der Rundhölzer für den unterschiedlichen Zustand verantwortlich. Die Feuchtebedingungen für einen Abbau sind offenbar an den Sperrenflügeln am günstigsten. Ein Mangel an Sauerstoff bzw. eine zu hohe CO_2-Konzentration im Holz der Bauteile unterhalb der Überfallkante wirkte wahrscheinlich hemmend auf die aeroben Fäuleerreger (Jensen 1967, Schánel 1976). Die Holzfeuchte an den Probestellen wurde jedoch aus methodischen Überlegungen (vergl. Kapitel 4.4.2, S. 70) nicht erfasst und ging somit nicht als Einflussgrösse in die statistische Analyse ein. Zu dieser Fragestellung wurde deshalb ein weiterführendes Experiment durchgeführt, welches in Kapitel 4 behandelt wird.

Stirnseiten (g)

Der Holzzustand im Bereich der Stirnseiten war schlechter im Vergleich zu jenem der übrigen Probestellen. Dies liegt wahrscheinlich an einem verbesserten Gasaustausch des Holzes in der Nähe von Stirnseiten. Sowohl für Gase als auch für die Diffusion von Wasser ist die Durchlässigkeit von Holz in Faserrichtung um ein Vielfaches grösser als quer zur Faser (Siau 1984). Dies kann im Bereich der Stirnseiten zu einem erhöhten Sauerstoffangebot und damit zu einer erhöhten Aktivität der Fäuleerreger führen. Ob die Stirnseiten zudem häufiger als Eintrittspforte für Fäuleerreger dienen können, kann aus den vorliegenden Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Die Resultate der Studie in Kapitel 2 zeigen jedoch, dass oft über die ganze Länge der Rundhölzer viele kleine, genetisch verschiedene Myzelien von Fäuleerregern vorliegen. Infektionen durch Sporen finden demnach auf der ganzen Länge der Rundhölzer statt. Der

schlechtere Zustand des Holzes in der Nähe von Stirnseiten ist aus diesem Grund eher auf günstigere Abbaubedingungen als auf eine frühere Besiedlung zurückzuführen.

Bei einwandigen Wildbachsperren (in vorliegender Studie die Sperren Nr. 3 und 6, vergl. Tabelle 2.1, S. 12) werden die Stirnseiten von Stützpfosten (vergl. Abbildung 1.2, S. 6) oft mit Blech abgedeckt. Dies aufgrund von Erfahrungen, dass dadurch bei Pfosten im Boden (z.B. bei Zäunen oder Leitungsmasten) ein Eindringen von Niederschlag verhindert und somit die Holzfeuchte unter der für eine Fäule notwendigen Mindestfeuchte gehalten werden kann. Die Ergebnisse einer Studie an Pfosten aus Douglasienholz bestätigen diese Erfahrungen (Morrell *et al.* 1993). Bei den Sperren Nr. 3 und 6 wurde keine derartige Wirkung festgestellt. Vielmehr war der Holzzustand dieser insgesamt 4 Pfosten (Median des Fäulegrads = 65%, total 15 Probestellen) wesentlich schlechter als jener der Sperrenflügel aller Sperren (23.2%). Der Grund für dieses Phänomen liegt wahrscheinlich darin, dass die Mindestfeuchte für das Wachstum von Fäuleerregern an den Stützpfosten nicht unterschritten wird (Spritzwasser, Kontakt mit anderen Rundhölzern, Erdkontakt). Unter diesem Aspekt erscheint eine Abdeckung zur Verhinderung eines Feuchteeintrags durch Niederschlag überflüssig.

Sperrenalter (c)

In der vorliegenden Studie wurde keine Abhängigkeit des Holzzustands vom Baujahr der Sperren festgestellt. Dies obschon der aktuelle Zustand von totem Holz als Resultat eines Abbauprozesses grundsätzlich von der Zeitdauer abhängig ist, während der dieser Prozess ablaufen kann (Harmon *et al.* 1986, Viitanen 1994). Die Unabhängigkeit des Holzzustands vom Sperrenalter zeigt sich beispielsweise daran, dass die jüngste (Nr. 4, Baujahr 1995) und die älteste (Nr. 8, Baujahr 1973) der untersuchten Sperren den selben Anteil von rund 50% Probestellen mit einer Fäule (Fäulegrad > 10%) aufwiesen. Dies lässt sich dadurch begründen, dass der Zeitpunkt des Befalls durch einen Fäuleerreger mit einer einmaligen Untersuchung nicht bestimmt werden kann. Ähnliche Resultate erhielten Hedley & Drysdale (1985) in Langzeitstudien mit Pfählen in Erdkontakt: Während ein Teil der Proben schon nach wenigen Jahren intensive Fäulen aufwiesen, waren andere auch nach mehreren Jahrzehnten noch wenig angegriffen.

Der vorliegende Befund bestätigt die aus der Praxis bekannte, grosse Variation der Lebensdauer von Bachsperren, welche in den günstigen Fällen gegen 100 Jahre erreichen kann (Zeller & Röthlisberger 1987). Diese grosse Streuung könnte auch bei den untersuchten Objekten dazu geführt haben, dass der statistische Test für den Faktor "Sperrenalter" nicht signifikant wurde. Zumindest für die untersuchten Bauwerke scheint also der Faktor Zeit – verglichen mit den anderen Einflussgrössen – für den Holzzustand eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Durchmesser der Rundhölzer (d)

Ebenso konnte keine Abhängigkeit des Holzzustands vom Durchmesser der Rundhölzer festgestellt werden. Dobrý & Rypàcek (1991) fanden, dass Holzproben mit grösserem Durchmesser von *Fomitopsis pinicola* und *Gloeophyllum sepiarium* in Faserrichtung schneller durchwachsen werden. Laborexperimente mit *Trametes versicolor* ergaben eine negative Korrelation des Holzabbaus mit dem Probenvolumen (Narayanamurti & Verma 1963). Ähnliche Resultate ergaben Versuche mit Holz in Erdkontakt (Purslow 1962). Aus Freilandstudien in natürlichen Waldökosystemen liegen unterschiedliche Ergebnisse vor. Während verschiedene Autoren bei kleinerem Durchmesser von Totholz einen rascheren Holzabbau feststellten (Fogel & Cromack 1977, Lambert *et al.* 1980, Brown *et al.* 1996), wurde in anderen Untersuchungen

der umgekehrte Zusammenhang festgestellt (MacMillan 1988, Næsset 1999). Harmon (1982) fand über einen Zeitraum von 12 Jahren nach einem Feuer an stehendem Totholz verschiedener Baumarten keinen Zusammenhang zwischen Durchmesser und Abbaurate. Zur Zeit scheint der Einfluss der Volumina von Totholz auf den Holzabbau nicht restlos geklärt (Harmon *et al.* 1986, Brown *et al.* 1996).

Der fehlende Zusammenhang zwischen Durchmesser und Holzzustand in der vorliegenden Studie weist darauf hin, dass eine Überdimensionierung von Rundhölzern, wie sie bei Holzkonstruktionen im Wildbachverbau oft vorliegt, keinen rascheren Abbau durch Pilze nach sich zieht. In Anbetracht der uneinheitlichen Daten in der Literatur sollte diese Fragestellung jedoch weiter bearbeitet werden.

Holzart (f)

Zwischen den verwendeten Holzarten Tanne und Fichte wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt. Beide Arten werden generell als wenig dauerhaft eingeschätzt (Findlay 1962, Scheffer & Cowling 1966, Bosshard 1974b, Rayner & Boddy 1988). Von einigen Autoren wird Tannenholz als etwas dauerhafter eingestuft als Fichtenholz (Gäumann 1930, Knigge & Schulz 1966, Kucera & Gfeller 1994). Auch im Bachverbau gilt Tannenholz als leicht dauerhafter als Fichtenholz (Rickli 1997). Der Grund dieses Unterschieds wird jedoch nicht erklärt. Ob in diesem Zusammenhang eine Nasskernbildung bei der Tanne eine Rolle spielen könnte, wurde verschiedentlich untersucht. Inhaltsstoffe von Holz aus Tannen-Nasskernen (*Abies concolor*) hatten eine hemmende Wirkung auf das Wachstum verschiedener Fäuleerreger *in vitro* (Worrall & Parmeter 1982, 1983). Die Unterschiede zwischen einzelnen Bäumen waren in diesen Studien jedoch gross, Nasskernextrakte von einigen Bäumen zeigten keine Wirkung auf das Pilzwachstum. Analoge Feststellungen machten Etheridge (1962) sowie Bauch et al. (1975) mit Nasskernholz von *Abies balsamea* bzw. *Abies alba*. In diesen Studien reduzierte eine Autoklavierung die Fäuleresistenz von Holzproben aus Nasskernen stark. Coleman et al. (1985) fand ein ähnliches Verhalten bei Holz aus Nasskernen von *Ulmus americana*.

Aus diesen Ergebnissen könnte eine erhöhte Dauerhaftigkeit von Tannenholz mit Nasskern abgeleitet werden. Wie lange diese Wirkung jedoch an verbautem Holz anhält, ist aus diesen Laborstudien nicht ersichtlich. Unter den Bedingungen an Wildbachsperren kann zumindest in den untersuchten Fällen von einer ähnlichen Fäuleresistenz beider Holzarten ausgegangen werden.

Neben Fichten- und Tannenholz kommen auch andere Holzarten für den Wildbachverbau in Frage. Von den in der Schweiz vorkommenden Holzarten gelten insbesondere Lärche (*Larix decidua*), Edelkastanie (*Castanea sativa*) sowie die Europäischen Eichenarten (*Quercus* spp.) als sehr dauerhaft (Findlay 1962, Scheffer & Cowling 1966, Kucera & Gfeller 1994). Wälchli (1976) fand bei diesen Arten jedoch erhebliche Unterschiede zwischen Kern- und Splintholz. Im seinem Versuch konnten die Braunfäuleerreger *Coniophora puteana* und *Gloeophyllum trabeum* das Kernholz von Eiche und Kastanie innert 18 Wochen praktisch nicht abbauen, während beim Splintholz Masseverluste von 20 bis 30% auftraten. Bei *L. decidua* war der Unterschied weniger gross (Masseverlust: Kernholz rund 15%, Splintholz rund 35% in 18 Wochen).

Auch das Kernholz der Gastbaumarten Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) wird als sehr dauerhaft eingestuft (Molnar 1993, Schickhofer & Hasewend 1999). Lärche sowie Eiche werden denn auch als Baumaterial für den Wildbach- und Hangverbau empfohlen (Pagnoncini 1988, Florineth 1990, Ammann 1997, Länger 1999).

Der mit Abstand grösste Teil der Holzverbauungen im Untersuchungsgebiet der nördlichen Voralpen wird mit Fichten- und Tannenholz erstellt. Wichtige Vorteile von Holz als Werkstoff im Wildbachverbau sind – sowohl aus ökologischer wie auch aus wirtschaftlicher Sicht – die lokale Verfügbarkeit sowie die kurzen Transportdistanzen (Rickli 1997, Frei & Böll 2001). Die Verwendung der oben erwähnten, dauerhaften Holzarten scheint deshalb nur in Gebieten sinnvoll, wo in der Nähe der Baustellen genügend Bäume geeigneter Dimension und Schaftform vorhanden sind. In den nördlichen Voralpen und Alpen sind Tanne und Fichte die mit Abstand häufigsten Baumarten, während Lärche selten und Eiche primär in tiefen Lagen vorkommen (Welten & Sutter 1984). Es ist deshalb anzunehmen, dass in diesen Gebieten auch weiterhin vorwiegend Fichten- bzw. Tannenholz verbaut werden wird.

Die genannten Vorteile von Holz, insbesondere der geringe Energieaufwand für die Bereitstellung des Baumaterials, gehen bei der Verwendung von nicht lokal verfügbaren Holzarten verloren. Ob sich der Einsatz dauerhafterer Holzarten trotz erhöhten Transportkosten wirtschaftlich lohnen kann, sollte weiter untersucht werden. Dazu muss jedoch zuerst gezeigt werden, wie sich die Verwendung von Lärche oder Eiche auf die Funktionsdauer von Bachsperren auswirkt. Vergleichende Studien mit verschiedenen Holzarten an unterschiedlichen Standorten könnten Aufschluss darüber geben, unter welchen Bedingungen der Einsatz von Tanne / Fichte bzw. Eiche / Lärche sinnvoll ist.

3.4.4 Statistische Auswertung

Der ermittelte Holzzustand an den Probestellen sowie die Einflussfaktoren wurden in wenige Klassen eingeteilt. Dies stellt eine drastische Vereinfachung dar und bringt natürlich einen Informationsverlust mit sich (Lamprecht 1992). Eine solche Vereinfachung ist aber zur quantitativen Analyse komplexer Systeme, wie es Wildbachsperren als Habitat für Fäuleerreger darstellen, sinnvoll. Bei grossen Stichproben wie im vorliegenden Fall sollte der Einfluss relevanter Faktoren trotzdem sichtbar bleiben (Mandallaz *et al.* 1986). Der Fäulegrad als Mass für den Holzzustand ist zudem – wie oben gezeigt – mit verschiedenen geräte- und auswertungsbedingten Unsicherheiten behaftet, weshalb der ermittelte Wert keine exakte Grösse darstellen kann. Eine Auswertung der Daten mit den Methoden der multiplen Regression wäre aufgrund der Verteilung der Daten kaum vorteilhafter (vergl. Abbildung 3.4, S. 42), da keine normalverteilten Daten bzw. Residuen vorliegen.

Natürlich waren nicht alle Rundhölzer mit einem Fäulegrad von > 10% vollständig zersetzt, und die Gruppe der „faulen" Rundhölzer beinhaltet auch solche, welche bei einer visuellen Beurteilung als „wenig" oder „mässig faul"bezeichnet werden könnten. Trotzdem erscheint der gewählte Schwellenwert als Indikator für das Auftreten einer Fäule aus verschiedenen Gründen angemessen. Zunächst lässt sich durch die computergestützte Analyse ein Fäulegrad von weniger als rund 3% nicht feststellen (Definition von Fäulnis: Bohrstrecke während minimal 5 mm (= 3.33% von 150 mm) tiefer als das Referenzniveau, vergl. Anhang III). Weiter hat eine Veränderung des Schwellenwertes auf einen Fäulegrad von 5 bzw. 15 % wenig Einfluss auf die aus der statistischen Analyse hervorgehenden Tendenzen. Zudem hat schon ein Fäulegrad von 10% eine erhebliche Verminderung der Tragfähigkeit eines Rundholzes zur Folge, was folgende Überlegung am Beispiel des Biegewiderstands zeigt (verwendete Formeln nach Gieck & Gieck 1995):

Der Biegewiderstand M_R eines Rundholzes berechnet sich nach der Formel $M_R = \sigma \cdot W_y$ [Nm], wobei σ [N/m^2] die Biegespannung und W_y [m^3] das Widerstandsmoment des Querschnitts

darstellt. Indem gilt: $W_y = d^3 \cdot \pi/32$, ergibt sich bei einer Reduktion des Durchmessers um 10% eine Abnahme des Widerstandsmoments – und somit auch des Biegewiderstands – von rund 30%. Geht man von einem totalen Festigkeitsverlust des faulen Holzes sowie von einem Fortschreiten der Fäule von aussen nach innen aus, zeigt diese Überlegung, dass auch aus technischer Sicht ein tiefer Schwellenwert des Fäulegrads für das Auftreten einer Fäule gerechtfertigt ist. Im Falle von Kernfäulen ist die Reduktion der Biegefestigkeit bei abnehmender tragender Querschnittfläche vermutlich geringer (Mattheck & Hötzel 1997), da die Randfasern des Rundholzes zunächst intakt bleiben.

Der durchgeführte X^2-Test weist auf eine recht gute Anpassung des Modells hin. Nach der Eliminierung der Sperre Nr. 1 konnte bei den verbleibenden 8 Sperren kein signifikanter Unterschied zwischen Prognose und Beobachtung der Häufigkeit einer Fäule mehr festgestellt werden. Die Sperre Nr. 1 fällt dadurch auf, dass auch unter dem Wasserstrahl häufig der Fäuleerreger *Fomitopsis pinicola* isoliert wurde (vergl. Anhang II). Nur wenige der entsprechenden Stellen wiesen jedoch eine Fäule auf. *Fomitopsis pinicola* konnte im Laborexperiment während Monaten ohne Sauerstoff überleben, wobei er das Wachstum jedoch einstellte (Scheffer 1986). Eine temporäre Austrocknung des Wasserbereichs an der Sperre Nr. 1 könnte deshalb zur Etablierung von *F. pinicola* geführt haben, ohne dass in der Folge eine Fäule entstehen konnte. Dies lässt die Sperre im Zeitpunkt der Untersuchung als Ausreisser erscheinen.

Der maximale Fehler bei einer Schätzung der Anzahl Probestellen mit einer Fäule liegt (unter Ausschluss der Sperre Nr. 1) an der Sperre Nr. 5 vor. Dort wurden eine Anzahl von 64 Probestellen mit Fäule geschätzt, obschon lediglich 53 beobachtet wurden. Gemessen an der Gesamtzahl der Probestellen an dieser Sperre (117) liegt eine Überschätzung von rund 10% vor. Bei den übrigen Sperren sind die Abweichungen geringer. Angesichts der grossen Anzahl von Einflussfaktoren und der Komplexität der ökologischen Bedingungen ist dieser Fehler tolerierbar. Das verwendete Modell kann somit als geeignet betrachtet werden, das Auftreten von Fäulnis an den untersuchten Sperren quantitativ zu analysieren und die massgebenden Einflussfaktoren adäquat zu erfassen.

3.4.5 Nicht berücksichtigte Einflussfaktoren

Im Folgenden wird auf einige Faktoren eingegangen, welche den Holzzustand verbauter Rundhölzer an Wildbachsperren beeinflussen können, jedoch in der vorliegenden Studie aus zeitlichen Gründen nicht berücksichtigt wurden. Die Betrachtung dieser Einflussgrössen kann weitere Forschungsfragen aufwerfen und soll zur vertieften Bearbeitung der Problematik anregen.

Beschattung

Der Beschattung von Holzsperren durch die umliegende Vegetation wird ein grosser Einfluss auf die Lebensdauer der Bauwerke zugesprochen (Zeller & Röthlisberger 1987, Rickli 1997, Böll *et al.* 1999). Die Wirkung auf den Temperatur- und Wasserhaushalt der Rundhölzer dürfte dabei im Vordergrund stehen. In einer Studie wie der vorliegenden kann der Schattenwurf jedoch nicht berücksichtigt werden, da hierzu die Entwicklung der Vegetation in der Nähe der Bauwerke bekannt sein müsste, insbesondere auch in den ersten Jahren nach dem Bau. Mit Vorteil könnte dies in Langzeitstudien geschehen. Eine Möglichkeit wäre es – ausgehend von neuen Bauwerken – die Sonneneinstrahlung am Standort über mehrere Jahre zu messen. Dabei kämen Methoden wie das Horizontoskop (Schütz & Brang 1995) oder hemisphärische Fotografie (Machado & Reich 1999) in Frage.

Jahrringstruktur

Die Jahrringstruktur des verbauten Holzes ist ein weiterer Faktor, welcher in der vorliegenden Studie nicht mit einbezogen werden konnte. Der Jahrringbau hat je nach Baumart einen unterschiedlichen Einfluss auf verschiedene physikalische Eigenschaften des Holzes, insbesondere auf die Dichte (Bosshard 1974a). Bei Fichten- und Tannenholz weist Spätholz eine höhere Dichte auf als Frühholz (Bernhart 1964). Da die Spätholzbreite dieser Baumarten in Tieflagen relativ konstant ist, ergibt sich bei geringer Jahrringbreite eine höhere Dichte (Bernhart 1964, Greve 1984, Grammel 1990). Fichten in Hochlagen hingegen können oft nur sehr schmale Spätholzzonen bilden, was durch die kurze Vegetationsperiode bedingt ist (Schweingruber 1980). Dadurch können sich für Holz aus verschiedenen Höhenlagen bei gleicher Jahrringbreite verschiedene Dichten ergeben.

Verschiedene Autoren schätzen Nadelholz mit schmalen Jahrringen generell als dauerhafter ein (Meierhofer & Zumoberhaus 1992, Rickli 1997, Böll *et al.* 1999). Aufgrund bisheriger Forschungsresultate muss dieser Aspekt jedoch differenziert betrachtet werden. Generell scheinen Fäuleerreger Nadelholz mit breiten Jahrringen sowohl an lebenden Bäumen als auch unter Laborbedingungen rascher besiedeln zu können. Dies konnte beispielsweise für *Heterobasidion annosum* (Rohmeder 1937, Ekman & Weissenberg 1981) und *Fomitopsis pinicola* gezeigt werden (Dobrý & Rypàcek 1991). Letztere vermuten im Spätholz eine wirksame Barriere für *F. pinicola*, da die Besiedlung von Holzproben quer zum Faserverlauf rund 10 mal langsamer erfolgte als längs zur Faser.

Die Resultate aus Abbauversuchen mit Nadelholz unterschiedlicher Jahrringbreite sind jedoch nicht eindeutig. Lohwag (1965) fand einen verstärkten Holzabbau bei *Pinus silvestris* durch *Trichaptum abietinum* bei grösserer Jahrringbreite und geringerer Dichte. Einen ähnlichen Zusammenhang stellte auch Wong (1988) an *Pinus radiata* unter dem Einfluss von *Gloeophyllum trabeum* sowie *Perenniporia tephropora* fest. Andere Autoren konnten jedoch keinen Zusammenhang zwischen Dichte oder Jahrringbreite verschiedener Laub- und Nadelhölzer unter der Einwirkung von Braun- und Weissfäuleerregern erkennen (Gäumann 1947, Rennerfelt 1948, Jahn 1967, Venäläinen *et al.* 2001). Bei Abbauversuchen mit Holz verschiedener Jahrringbreite können methodische Schwierigkeiten auftreten, da sich der Wassergehalt während dem Versuch in Abhängigkeit der Jahrringstruktur verändern und grosse Streuungen in den Resultaten verursachen kann (Courtois 1970).

Diese teilweise gegensätzlichen Resultate weisen auf einen Forschungsbedarf in dieser Fragestellung hin. Ein weiterer interessanter Aspekt bildet das Phänomen, dass Fichten aus montanen Lagen im Vergleich zu solchen aus kollinen Lagen einerseits dünnere Zellwände aufweisen, gleichzeitig jedoch einen höheren relativen Ligningehalt der Zellwände (Gindl *et al.* 2001). Wie sich diese bezüglich der Dichte gegenläufigen Effekte auf die Resistenz des Holzes gegenüber Pilzbefall auswirken, wurde noch nicht untersucht.

Die Frage nach der Dauerhaftigkeit von verbautem Holz in Abhängigkeit seines Jahrringbaus kann anhand der verfügbaren Daten nicht abschliessend beantwortet werden. Weitere Untersuchungen der Wirkung von Rohdichte, Jahrringbreite und Höhenlage des Standortes auf die Dauerhaftigkeit von Nadelholz wären sinnvoll. Dies insbesondere auch darum, weil sich diese Faktoren beim Bau von Wildbachsperren relativ einfach berücksichtigen lassen und beispielsweise die Sperrenflügel aus den dauerhaftesten Rundhölzern gebaut werden könnten.

Variable Wasserführung des Gerinnes

Bei der Analyse des Modells wurde davon ausgegangen, dass der Wasserfluss in allen Gerinnen vergleichbar ist. Lokale klimatische Bedingungen und die Grösse der Einzugsgebiete spielen jedoch für den Wasserhaushalt eines Gerinnes – und somit auch für jenen verbauter Rundhölzer an Bachsperren – eine bedeutende Rolle. Dieser Faktor kann nur in langfristigen Studien, bei welchen die Abflussmenge des Gerinnes und ihre Schwankungen im Laufe eines Jahres gemessen wird, berücksichtigt werden.

Verschiedene weitere Faktoren

Anaerobe *Bakterien* können in wassergesättigtem Holz Fäulen verursachen (Schmidt & Dietrichs 1975). Sie sind insbesondere auch in der Lage, die Pektinlamellen von Hoftüpfeln abzubauen und somit die Durchlässigkeit des Holzes zu erhöhen (Eriksson *et al.* 1990). Dies kann in nachfolgenden Perioden ohne Wassersättigung des Holzes dessen Austrocknung beschleunigen und so eine Besiedlung durch Basidiomyceten begünstigen (Clausen 1996).

An den untersuchten Wildbachsperren wurden gelegentlich auch Spuren von *holzbewohnenden Insekten* beobachtet. Diese können einerseits durch Frassgänge den Holzkörper angreifen (Grosser 1985, Highley 1999, Graf & Meili 2001) und andererseits durch den Transport von Sporen oder Myzelstücken zur Verbreitung von Pilzen an der Sperre beitragen (Ackerman & Shenefelt 1973, Økland & Hågvar 1994).

Auch sei an dieser Stelle nochmals auf die Vielzahl *weiterer holzbewohnender Pilzarten* hingewiesen, welche in dieser Studie aufgrund der Fokussierung auf die häufigsten Basidiomyceten nicht berücksichtigt werden konnten. Durch die Konzentration auf holzzerstörende Basidiomyceten konnten zwar jene Pilzarten erfasst werden, welche an relativ neuen Sperren für intensive Fäulen verantwortlich sind, jedoch könnten bei älteren Bauwerken insbesondere auch Moderfäuleerreger für die Zerstörung der Bauwerke wichtig werden (vergl. Kapitel 2.4.2).

Ob die Variation der Fäuleresistenz innerhalb einer Holzart auch *genetische Ursachen* haben kann, konnte bisher noch nicht nachgewiesen werden (Harju *et al.* 2001, Venäläinen *et al.* 2001). Hingegen wurde schon von alters her der *Jahreszeit* sowie der *Mondphase* beim Einschlag des Holzes grosse Bedeutung zugemessen (Briemle 1997, Flynn 2000). Gäumann (1930) konnte einen Zusammenhang der Dauerhaftigkeit von Holz mit verschiedenen Fällzeitpunkten herstellen, wobei jedoch nur ein Baum pro Fällzeitpunkt berücksichtigt wurde. Zürcher *et al.* (1998) stellten regelmässige Durchmesserschwankungen an jungen Fichten fest und brachten diese mit dem Gezeitengang in Verbindung. Andere Autoren konnten diese Reaktion in eigenen Versuchen nicht nachvollziehen und gehen von einer zufälligen Korrelation von Durchmesserschwankungen und Gezeiten aus (Vesala *et al.* 2000). Ob letztlich Mondphasen oder Jahreszeiten für die Dauerhaftigkeit von Holz im Bachverbau eine Rolle spielen, lässt sich mit den bisher verfügbaren Forschungsresultaten nicht eindeutig klären.

3.5 Folgerungen und Ausblick

Aus der Untersuchung von neun zwischen 5 und 27 Jahre alten Wildbachsperren auf der Alpennordseite geht hervor, dass der Holzzustand primär vom Auftreten holzzerstörender Basidiomyceten abhängt. Dabei handelt es sich um Braunfäuleerreger. Zudem zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen verschiedenen ökologischen Faktoren und dem Holzabbau durch diese Pilzarten.

Von diesen Faktoren hat die Lage eines Rundholzes innerhalb einer Sperre den grössten Einfluss: Die Sperrenflügel werden bedeutend rascher abgebaut als die seitlichen Einbindungen der Sperren oder Rundhölzer, welche ständig überflossen werden. Der Zerfall einer Sperre setzt demnach an den Flügeln ein, lange bevor sich auch an den übrigen Bauteilen Fäulen entwickeln.

Der Zustand der Rundhölzer war im Bereich von der Luft ausgesetzten Stirnseiten besonders schlecht. Bei den verwendeten Konstruktionsweisen von Holzkasten oder einwandigen Bachsperren werden sich aber luftseitige Stirnseiten auch in Zukunft nicht vermeiden lassen.

Die in der Praxis beobachtete positive Wirkung einer grossen Meereshöhe und einer nördlichen Exposition wurde zumindest für die vorliegenden Fälle bestätigt. Diese beiden Standortfaktoren sollten bei der Entscheidung über den verwendeten Werkstoff (Holz / Stein / Beton) im Wildbachverbau mit einbezogen werden. Eine isolierte Untersuchung des Faktors Höhenlage könnte anhand von Sperren im selben Gerinne in verschiedenen Höhenlagen geschehen.

Zwischen den Holzarten Tanne und Fichte wurde bezüglich der Dauerhaftigkeit kein Unterschied festgestellt. In Anbetracht des grossen Einflusses anderer Faktoren scheint diese Frage jedoch von untergeordneter Bedeutung. Der Verbau von deutlich pilzresistenteren Holzarten wie Lärche, Eiche oder Kastanie ist sicher da sinnvoll, wo das Holz in erforderlicher Qualität und Menge zur Verfügung steht. Die Dauerhaftigkeit der einzelnen Arten unter den spezifischen Bedingungen im Wildbachverbau (Verbau ganzer Stämme mit Splint- und Kernholz in frischem Zustand) sollte jedoch experimentell untersucht werden.

Der Durchmesser der verbauten Rundhölzer scheint für die Dauerhaftigkeit keine bedeutende Rolle zu spielen. Ob sich die Verwendung von dickeren Rundhölzern, als es aus baustatischer Sicht notwendig ist, günstig auf die Funktionsdauer auswirkt, kann aus den vorliegenden Daten nicht abgeleitet werden. Zwischen dem Sperrenalter und dem Holzzustand konnte ebenfalls kein Zusammenhang festgestellt werden. Dies weist darauf hin, dass zumindest in den ersten Jahrzehnten nach dem Bau der Holzzustand hauptsächlich von den ökologischen Faktoren abhängt und weniger vom Faktor Zeit.

Verschiedene Einflussgrössen konnten in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt werden. Hierzu gehören Materialeigenschaften (Jahrringbau des Holzes) sowie weitere abiotische (Beschattung, Fällzeitpunkt) und biotische (Insekten, andere Pilzarten) Einflussfaktoren. Trotzdem konnte gezeigt werden, dass allein schon die untersuchten Parameter erheblichen Einfluss auf den Holzabbau an Wildbachsperren haben. Es ist deshalb anzunehmen, dass sich durch die Vermeidung der genannten, ungünstigen Bedingungen bedeutende Schäden durch Pilzbefall zumindest in den ersten Jahren bis Jahrzehnten nach dem Bau vermeiden lassen. Wie stark sich diese Parameter auf die langfristige Entwicklung des Holzzustandes auswirken, können jedoch erst Untersuchungen von Sperren unterschiedlichen Alters oder die kontinuierliche Überwachung einzelner Bauwerke zeigen.

4 Wirkung wechselnder Feuchtebedingungen auf Fäuleerreger an Wildbachsperren aus Holz

4.1 Einleitung

Holzkonstruktionen im Wildbachverbau sind sehr heterogenen und zeitlich variablen Feuchtebedingungen ausgesetzt (Böll *et al.* 1999). Für die verbauten Rundhölzer ist deshalb ein stark schwankender Wassergehalt der verbauten Rundhölzer zu erwarten. Dieser hat als kritische Grösse für das Wachstum holzzerstörender Pilze (Dix 1984, Boddy 1986, Harmon & Sexton 1995) entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer derartiger Holzkonstruktionen.

Aus den Untersuchungen an neun zwischen 5 und 27 Jahre alten Wildbachsperren (Kapitel 2 und 3) geht hervor, dass der Holzzustand der Sperrenflügel bedeutend schlechter war als jener der übrigen Bauteile (Einbindungen bzw. Bauteile im Bereich des Wasserflusses, vergl. Abbildung 2.7). Beobachtungen an einer über 60 Jahre alten Sperre bestätigen dies (Kapitel 3.4.3).

Während die Sperrenflügel dem Wasserfluss im Gerinne nicht ausgesetzt sind, werden die übrigen Bauteile zumindest zeitweise überflossen oder von Spritzwasser benetzt. Die – relativ betrachtet – trockensten Rundhölzer an den Sperren werden somit am raschesten zerstört. Zur Überprüfung dieser Hypothese muss der Einfluss der spezifischen Feuchteverhältnisse an Bachsperren auf den Holzabbau analysiert werden.

Auf Holzlagerplätzen kann eine ständige Berieselung mit Frischwasser den Befall von frischem Rundholz durch Pilze weitgehend verhindern (Liese & Peek 1987, Bues 1993, Gross *et al.* 1996, Webber & Gibbs 1996). Unter Wasser gelagertes bzw. verbautes Holz kann bis zu mehreren hundert Jahren grösstenteils unversehrt bleiben (Arnold & Schweingruber 1975, Ruske 1983, Niemz *et al.* 1997). Unter Laborbedingungen konnte gezeigt werden, dass der Wassergehalt des Substrates einen entscheidenden Einfluss auf den Abbau von Holz durch Basidiomyceten hat (Bavendamm & Reichelt 1938, Ammer 1964, Scheffer 1973, Boddy 1983, Smith *et al.* 1992b, Viitanen 1997).

Obige Arbeiten weisen jedoch bezüglich den charakteristischen Bedingungen, welchen verbautes Rundholz im Wildbachverbau ausgesetzt ist, verschiedene Einschränkungen auf. Die Experimente erfolgten zwar jeweils bei unterschiedlichen Feuchtebedingungen, doch wurde die Feuchtigkeit jeweils nur zu Beginn des Experimentes variiert und im Versuchsverlauf nicht mehr beeinflusst. Zudem wurden, mit Ausnahme weniger Studien (Lohwag 1963, Viitanen & Ritschkoff 1991), sterile Holzproben verwendet. Die Wirkung wechselnder Feuchtebedingungen wurde bisher vor allem für Pilzarten aus den Gruppen der Deutero- bzw. Zygomyceten untersucht, welche als Schimmelpilze in Gebäuden von Bedeutung sind (Viitanen & Bjurman 1995, Pasanen *et al.* 2000). Studien zum Einfluss periodisch ändernder Feuchtigkeitsbedingungen auf den Holzabbau durch Basidiomyceten fehlen weitgehend (Carrl & Highley 1999). Da Holz im Wildbachverbau schlagfrisch verbaut und anschliessend periodisch benetzt wird, lassen sich die Ergebnisse der genannten Studien nicht ohne weiteres auf die realen Verhältnisse an Bachsperren übertragen.

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss einer periodischen Benetzung auf den Abbau von frischem Fichtenholz (*Picea abies* L. Karst.) in Bodenkontakt durch den Braunfäuleerreger *Fomitopsis pinicola* (Sw.: Fr.) Karst. zu untersuchen. Damit wurden sowohl

die am häufigsten verbaute Holzart wie auch der am häufigsten nachgewiesene Fäuleerreger aus den bisherigen Untersuchungen (Kapitel 2 und 3) berücksichtigt. In einem Laborexperiment wurden mit *F. pinicola* beimpfte, frische Rundholzproben in Quarzkies eingebettet und in verschiedenen Zeitabständen überflutet. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Überflutungszyklen wurden anhand des Masseverlust des Holzes sowie der Abnahme der Druckfestigkeit des Holzes analysiert.

4.2 Material und Methoden

4.2.1 Herkunft des Probematerials

Das Holz für den Abbauversuch stammte von 13 Fichten (BHD 10 - 20 cm) aus einem Reinbestand am Südhang des Üetlibergs, ZH (630 m ü.M., Pflanzung 1978, Fällzeitpunkt März 2001). Von jedem Baum wurden fünf ca. 30 cm lange Abschnitte (Ø ≈ 5 - 8 cm) jeweils zwischen zwei Astquirlen entnommen. Die insgesamt 65 Stammabschnitte wurden mit einer Kreissäge in je drei Proben à 9 cm zerteilt und mit einem Stechbeitel entrindet (Abbildung 4.1). Der mittlere Abschnitt (P) wurde für den anschliessenden Abbauversuch verwendet und wird im folgenden als Teststück bezeichnet. Die beiden übrigen Proben (R1, R2) dienten als Referenzen.

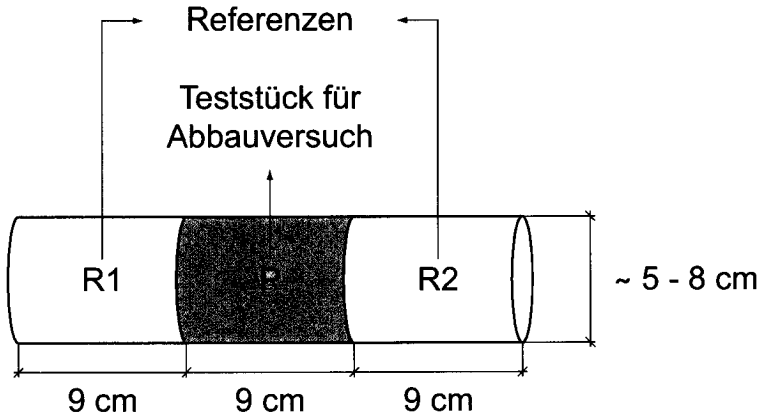


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung einer Probeeinheit. Rund 30 cm lange Abschnitte von Fichten wurden in drei Proben à 9 cm Länge aufgeteilt. Die mittlere (Teststück P) wurde in saftfrischem Zustand für den Abbauversuch verwendet, die beiden anderen (R1,2) dienten als Referenzen.

4.2.2 Inokulationsmethode

Zur Inokulation der Teststücke diente eine heterokaryotische Flüssigkultur von *Fomitopsis pinicola* (Nr. 513, Sperre Nr. 7, vergl. Anhang I). Dazu wurden zwei mit Wattestopfen verschlossene Glasflaschen (10 l) mit je 5 l Malzextrakt-Wasser (2 g/l) während 25 min bei 121°C autoklaviert. Die Beimpfung der Flüssigmedien erfolgte mit je 10 Inokuli (ca. 1 mm^3) einer zwei Wochen alten, auf Malzextraktagar (2 g/l, vergl. Tabelle 2.2, S. 15) gewachsenen Kultur des oben genannten Isolats von *F. pinicola*. Die Behälter wurden während vier Wochen bei Raumtemperatur (≈ 23°C) auf einem Magnetrührer inkubiert. In dieser Zeit bildete sich in den Flaschen eine Myzelsupension, deren Myzelfragemente teilweise nur aus wenigen Zellen bestanden (Abbildung 4.2).

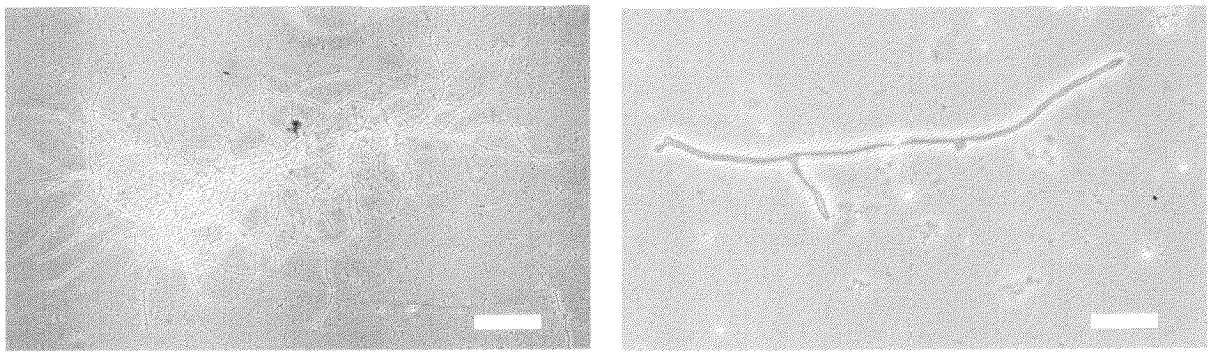


Abbildung 4.2: Myzelfragmente von *Fomitopsis pinicola* in einer Flüssigkultur (Lichtmikroskopische Aufnahme, links: Vergrösserung 1:200, Messbalken 50 µm; rechts: 1:400, Messbalken 25 µm). Durch den Rührvorgang zerfallen grössere Myzelien (links) ständig in Stücke weniger Zellen (rechts). Diese Fragmente wachsen auf einer Holzoberfläche weiter und gewährleisten eine rasche und gleichmässige Inokulation der Holzproben.

Nach dem Schälen wurden die Teststücke (P, vergl. Abbildung 4.1) mit Ethanol (96%) besprüht, um aus der Verarbeitung resultierende Kontaminationen zu verhindern. Anschliessend wurden die Proben während 10 min unter der Sterilbank belassen, damit der Alkohol verdunsten konnte. Ein sorgfältiges Eintauchen und Wenden während einer halben Minute in der Myzelsuspension stellte sicher, dass die Myzelfragmente von *F. pinicola* auf der Holzoberfläche gleichmässig verteilt wurden. In sterilen Kunststoffbehältern wurden die Teststücke zunächst während vier Wochen inkubiert, um allfällig kontaminierte Stücke frühzeitig ausscheiden zu können.

Als Behälter für den Überflutungsversuch dienten autoklavierbare Dosen aus Polypropylen (Höhe 145 mm, Ø 120 mm). Diese wurden mit Löchern zur Luftzirkulation sowie einem Silikonschlauch zur Drainage versehen und zur Hälfte mit gewaschenem und getrocknetem Quarzkies (Körnung ca. 1 bis 5 mm) gefüllt (Abbildung 4.3). Nach der Autoklavierung des ganzen Systems während 25 Minuten bei 121°C wurde in jeder Dose ein mit *F. pinicola* beimpftes Teststück zur Hälfte im Kies eingegraben und die Dose mit dem Schraubdeckel verschlossen.

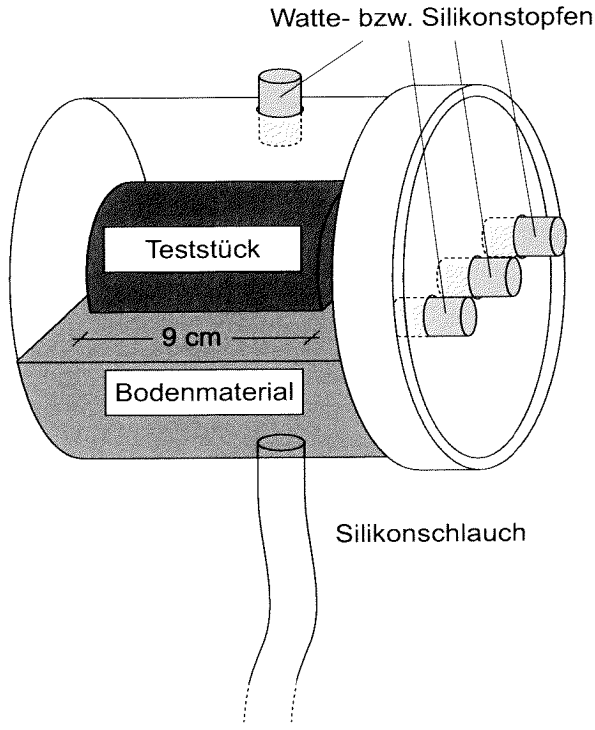


Abbildung 4.3: Inkubationssystem für den Abbauversuch (schematisch). Das Teststück war zur Hälfte im Bodenmaterial eingelassen. Während den Trockenphasen stellten Wattestopfen in Löchern von 1.2 cm Durchmesser den Gasaustausch sicher. Diese Öffnungen wurden während der Dauer der Überflutung mit Silikonstopfen verschlossen. Der Silikonschlauch (Länge ca. 50 cm) diente zur Drainage des Systems nach einer Phase der Überflutung und wurde am unteren Ende mit einer Klemme verschlossen.

Die 65 Probeeinheiten wurden in fünf Serien à 13 Wiederholungen eingeteilt. Pro Serie war jeder der 13 Probebäume mit einem Teststück vertreten. Die Dosen der einzelnen Serien wurden in Intervallen von drei Wochen mit sterilem Wasser (entmineralisiert) überflutet bzw. nach einer Überflutungsphase wieder geleert (Versuchsplan in Abbildung 4.4). Der gesamte Versuch dauerte 21 Wochen. Die Dosen der Serie 1 wurden nie überflutet, jene der Serie 5 blieben während der ganzen Versuchsdauer mit Wasser gefüllt. Bei dieser Serie erfolgte alle drei Wochen ein Wechsel des Wassers. Die Öffnungen der Dosen wurden während der Überflutung mit Silikonstopfen, während den Trockenphasen mit Wattestopfen verschlossen. Die inokulierten Teststücke wurden bei Raumtemperatur (≈ 23°C) im Dunkeln inkubiert (Abbildung 4.5).

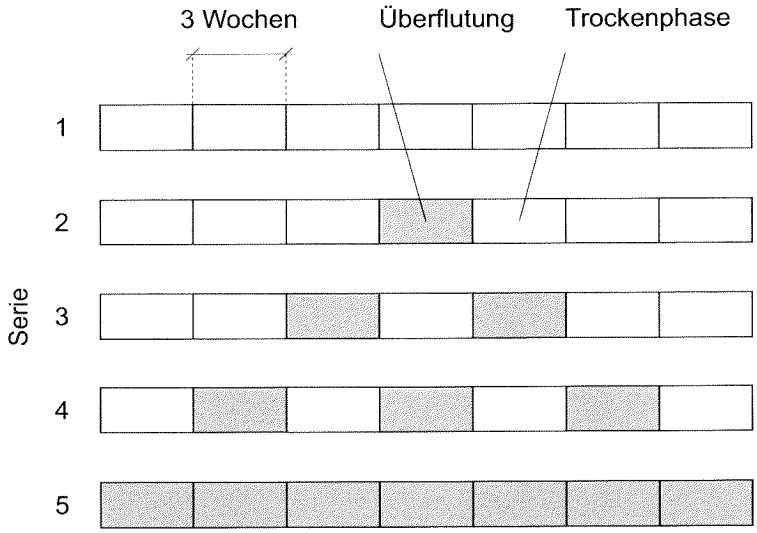


Abbildung 4.4: Ablauf des Abbauversuchs. Die fünf Probeserien wurden nach dem dargestellten Zeitplan in Intervallen von drei Wochen mit Frischwasser überflutet. In der Serie 1 erfolgte nie eine Überflutung. Die Teststücke der Serie fünf standen während der gesamten Versuchsdauer unter Wasser, wobei dieses alle drei Wochen ersetzt wurde.

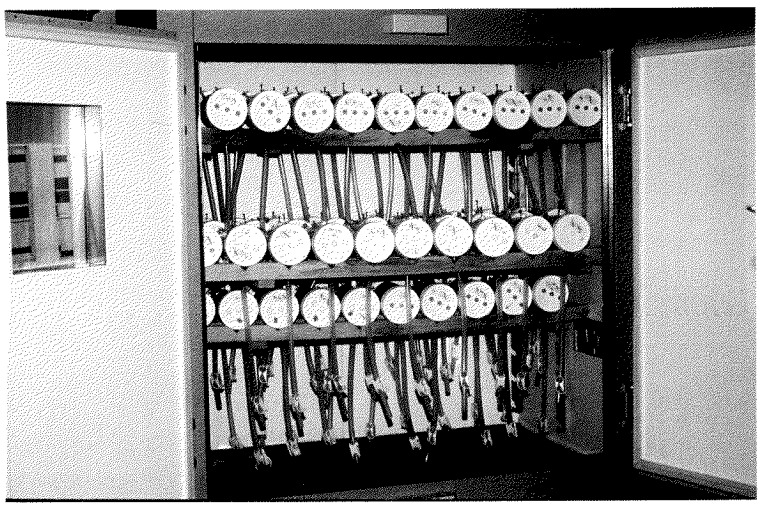


Abbildung 4.5: Versuchsanordnung. In einem Schrank mit Luftzirkulation wurden sämtliche Dosen bei Raumtemperatur (23°C) während 21 Wochen inkubiert. Die im Bild gut sichtbaren Gummischläuche ermöglichten ein rasches Ablassen des Wassers, ohne dass die Dosen geöffnet werden mussten.

Am Ende der Versuchsdauer wurden die Teststücke von Oberflächenmyzel gesäubert. Zur Überprüfung, ob der Testpilz im Experiment überlebte, wurden pro Serie je drei Holzspäne (ca. 1·1·5 mm) an der Oberfläche von drei Teststücken entnommen (n = 9 / Serie) und auf Terramycin-Malzagar (2 g/l Malzextrakt, 1.5 g/l Agar, 50 mg/l Oxytetracyclin, nach Sieber 1989) kultiviert. Auf Rückisolationen aus dem Holzinneren musste verzichtet werden, um die Teststücke für die anschliessenden Druckversuche verwenden zu können. Durch Konfrontationstests dieser Isolate mit der Ausgangskultur von *F. pinicola* konnte die Identität der Rückisolationen festgestellt werden (VC-Test, vergl. Kapitel 2.2.5).

4.2.3 Bestimmung von Masse- und Festigkeitsverlust

Teststücke und Referenzen wurden nachfolgend bei 103°C bis zur Gewichtskonstanz gedarrt und das Trockengewicht nach DIN 52183 (1977) bestimmt. Das Ausgangsgewicht der Teststücke (P) wurde aus dem mittleren Darrgewicht der Referenzen (R1, R2) geschätzt. Der Masseverlust (MV) der Teststücke liess sich somit nach folgender Formel berechnen:

$$MV = \frac{m_R - m_P}{m_R} \cdot 100$$

wobei:

$$m_R = \frac{m_{R1} + m_{R2}}{2}$$

MV: Masseverlust des Teststücks P [%]
$m_{R1,2}$: Trockenmasse der Referenzen R1 und R2 [g]
m_P: Trockenmasse der Teststücke P nach dem Abbauversuch [g]

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser nach DIN 52185 (1976) wurden alle Teststücke bzw. Referenzen nach dem Abbauversuch bei 20°C und 65% RLF bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert. Anschliessend wurden sowohl die Teststücke als auch die Referenzen gewogen und deren Holzfeuchte u [%] nach der Formel $u = (m_u - m_0)/m_0 \cdot 100$ [%] ermittelt (Niemz 1993), wobei m_u die Feuchtmasse und m_0 die Trockenmasse (Darrgewicht) einer Holzprobe darstellt. Die Druckprüfung erfolgte mit einer Universalprüfmaschine vom Typ Zwick Z 100 (Zwick GmbH, Ulm, D). Bei Rundhölzern mit einem Durchmesser von mehr als 60 mm, für welche die Maximalkraft der genannten Prüfmaschine nicht ausreichte, wurde eine Universalprüfmaschine vom Typ Amsler 300 kN (Roell Amsler Dynamic Testing, Gottmadingen, D) eingesetzt. Die Abnahme der Druckfestigkeit (FV) wurde analog zum Masseverlust aus der Differenz der mittleren Druckfestigkeit der Referenzen (R1, R2) und der Druckfestigkeit der Teststücke (P) berechnet:

$$FV = \frac{\sigma_R - \sigma_P}{\sigma_R} \cdot 100$$

wobei:

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{R1} + \sigma_{R2}}{2}$$

und

$$\sigma = \frac{Q_{max}}{A} = 4\frac{Q_{max}}{d^2\pi}$$

FV: Festigkeitsverlust des Teststücks [%]
$\sigma_{R1,2}$: Druckfestigkeit parallel zur Faser der Referenzen R1 und R2 [N/mm²]
σ_P: Druckfestigkeit parallel zur Faser der Teststücke P nach dem Abbauversuch [N/mm²]
Q_{max}: Bruchkraft [N]
A: Querschnittfläche einer Probe (P, R1, R2) [mm²]
d: Durchmesser einer Probe (P, R1, R2) [mm], Mittel aus zwei übers Kreuz vorgenommenen Messungen

4.2.4 Statistische Auswertung

Zunächst wurde die Schätzung der Trockenmasse bzw. der Druckfestigkeit der Teststücke P *vor* dem Abbauexperiment aus den Referenzen R1 und R2 überprüft. Dazu dienten 11 zusätzliche Probeeinheiten von acht Bäumen desselben Bestandes[1], deren mittleren Abschnitte (vergl. Abbildung 4.1) nicht inokuliert wurden. Dadurch liess sich für diese Probeeinheiten der Schätzwert aus den Referenzen (R1, R2) mit dem tatsächlich gemessenen Wert des mittleren Abschnitts vergleichen. Zudem konnten diese 11 Probeeinheiten als Kontrollserie bezüglich der Serien 1 bis 5 verwendet werden.

Zur statistischen Analyse der Ergebnisse des Abbauexperiments wurde ein allgemeines lineares Modell (Stahel 2000) verwendet. Als Zielgrössen dienten der Masse- sowie der Festigkeitsverlust (MV bzw. FV). Für jede Zielgrösse wurde ein separates Modell berechnet. Neben der Probeserie wurden in beiden Modellen der Durchmesser der Rundhölzer eingeführt, da dieser einen Einfluss auf die Besiedlung von Holz durch Fäuleerreger haben kann (Narayanamurti & Verma 1963, Dobrý & Rypàcek 1991). Im Analysemodell für den Festigkeitsverlust wurde zusätzlich die Holzfeuchte der Teststücke berücksichtigt, da im Bereich der Ausgleichsfeuchte von Holz bei Normbedingungen ($u \approx 12\%$) schon geringe Abweichungen der Holzfeuchte einen grossen Einfluss auf die Druckfestigkeit haben (Schmidt-Vogt 1986, Madsen 1992, Niemz 1993). Da jeder Probebaum mit einer Probeeinheit pro Serie vertreten war, wirkt sich ein allfälliger Einfluss des Baumes in jeder Serie gleich aus, weshalb die Herkunft (Baum) der Proben vernachlässigt werden konnte. Aus diesen Überlegungen resultieren folgende Modelle:

Masseverlust:

$$y_{ij} = \mu + a_i + bx_j + a_i bx_j + e_{ij}$$

Festigkeitsverlust:

$$y_{ij} = \mu + a_i + bx_j + cz_j + a_i bx_j + a_i cz_j + a_i bx_j cz_j + e_{ij}$$

μ:	Konstante
y_{ij}:	Masse- bzw. Festigkeitsverlust der j-ten Probe in der i-ten Serie (Behandlung)
a_i:	Behandlung (i = 1, ..., 5)
b,c:	Regressionskoeffizienten
x_j:	Durchmesser des Teststücks j
z_j:	Wassergehalt des Teststücks j
e_{ij}:	Zufälliger Fehler

Ob zwischen dem Masse- bzw. Festigkeitsverlust der einzelnen Serien signifikante Unterschiede bestehen, wurde mit einem Mehrfachvergleich der Mittelwerte (Tukey-Kramer-Test) geprüft. Alle Analysen erfolgten mit der Statistiksoftware *SAS System for Windows*® (Version 8.02; SAS Institute Inc.).

[1] Neun Proben stammten von denselben Bäumen, welche auch für den Abbauversuch verwendet wurden, zwei weitere von einer zusätzlichen, im selben Bestand gefällten Fichte (vergl. Anhang V).

4.3 Resultate

Innerhalb der Kontrollserie ergab ein paarweiser Vergleich zwischen dem Mittelwert der Referenzen (R1, R2) und dem Teststück (P) für die Trockenmasse und die Druckfestigkeit keine signifikanten Abweichungen (paarweiser t-Test, p = 0.85 bzw. 0.86). Eine lineare Regression zwischen Referenzen und Teststück (Abbildung 4.6) ergab eine gute Korrelation beim Trockengewicht (R^2 = 0.97). Bei der Druckfestigtkeit war die Korrelation etwas schwächer (R^2 = 0.67). In beiden Fällen wich die Steigung der Regressionsgeraden nicht signifikant von der Geraden mit Steigung 1 ab (p > 0.05). Der Mittelwert der Referenzen lieferte also sowohl für die Trockenmasse wie auch für die Druckfestigkeit parallel zur Faser einen guten Schätzwert für die entsprechenden Ausgangswerte eines Teststücks.

Schon wenige Tage nach der Inokulation bedeckte das Myzel von *Fomitopsis pinicola* die gesamte Oberfläche der Teststücke und bildete innerhalb von 4 Wochen eine dichte Myzelmatte (Abbildung 4.7). In dieser Zeit traten keine Kontaminationen auf und sämtliche Teststücke konnten für den anschliessenden Abbauversuch verwendet werden.

Die Myzelentwicklung des Testpilzes an der Oberfläche der Teststücke verlief während des Abbauversuchs zwischen den einzelnen Serien sehr unterschiedlich. Während sich an den Teststücken der Serie 1 (nie überflutet) kräftiges Luftmyzel bildete, blieb in der Serie 5 (ständig unter Wasser) die Entwicklung von Oberflächenmyzel praktisch aus (Abbildung 4.8). In den Serien 1 bis 3 konnte aus allen drei, in der Serie 4 aus zwei der untersuchten Teststücke das ursprüngliche Isolat von *F. pinicola* reisoliert werden (aus mindestens einem der drei Holzspäne). In der Serie 5 war keine der Rückisolationen erfolgreich. Hingegen wurde von zwei Teststücken der Serie 4 und einem der Serie 5 mindestens aus einem Holzspan *Trichoderma* sp. isoliert.

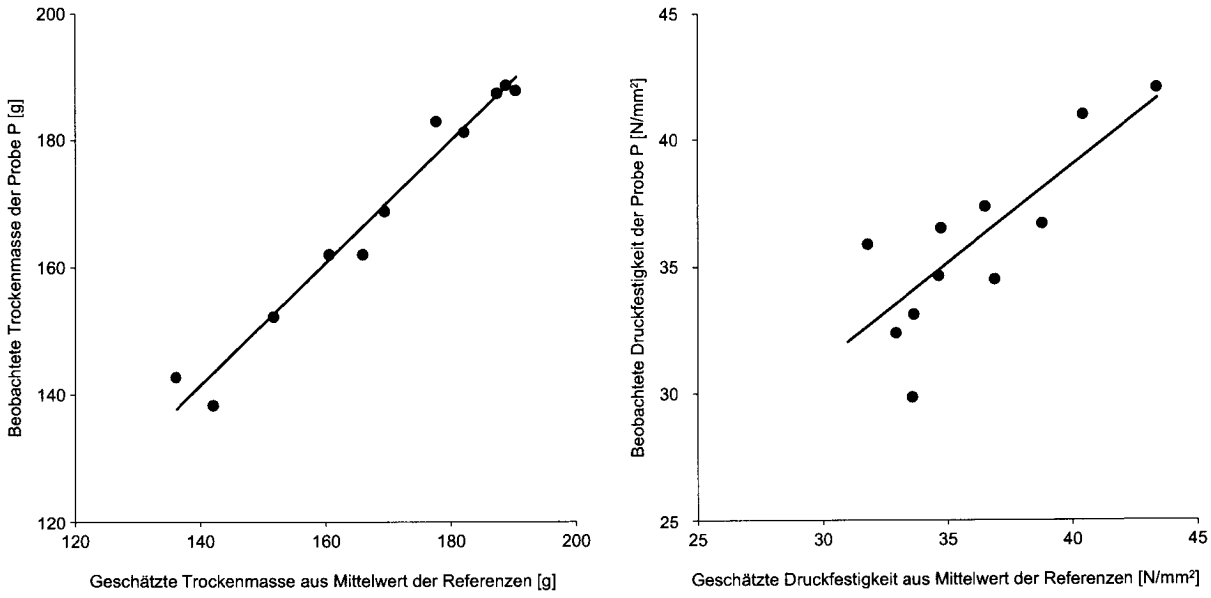


Abbildung 4.6: Korrelation zwischen den Mittelwerten der Referenzen (R1 und R2) und denjenigen der Teststücke P in der Kontrollserie. Links: Trockengewicht (Gleichung der Regressionsgeraden: y = 0.95x + 7.69, R^2 = 0.97). Rechts: Druckfestigkeit parallel zur Faser (Gleichung der Regressionsgeraden: y = 0.78x + 7.90, R^2 = 0.67).

Der Masseverlust liess sich von allen Probeeinheiten bestimmen. Bei den Druckprüfungen konnten die Daten von einem Teststück und zwei Referenzproben, welche für Vorversuche verwendet wurden, nicht in die Gesamtauswertung einbezogen werden. Die Daten sämtlicher Messungen finden sich in Anhang V.

Die einzelnen Serien unterschieden sich sowohl im Masseverlust als auch in der Abnahme der Druckfestigkeit deutlich (Tabelle 4.1). Mit zunehmender Überflutungsdauer nahm der Masseverlust ab. Die Ergebnisse der allgemeinen linearen Modelle für den Masseverlust und die Festigkeitsabnahme sind in Tabelle 4.2 dargestellt. In beiden Modellen traten keine Interaktionen zwischen den unabhängigen Variablen auf, weshalb nur die Haupteffekte berücksichtigt wurden. Der Durchmesser der Rundhölzer hatte weder auf den Masse- noch den Festigkeitsverlust einen signifikanten Einfluss ($p > 0.05$). Dies gilt auch für die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Druckprüfung im Modell für den Festigkeitsverlust. Der Einfluss der Überflutungsdauer war hingegen hochsignifikant ($p < 0.001$). Sowohl für den Masseverlust als auch für die Festigkeitsabnahme ergaben die paarweisen Vergleiche der Mittelwerte signifikante Unterschiede zwischen allen Serien (Tukey-Kramer-Test, $p < 0.05$) mit Ausnahme der Paarungen der Serien 4/5, 4/Kontrolle und 5/Kontrolle.

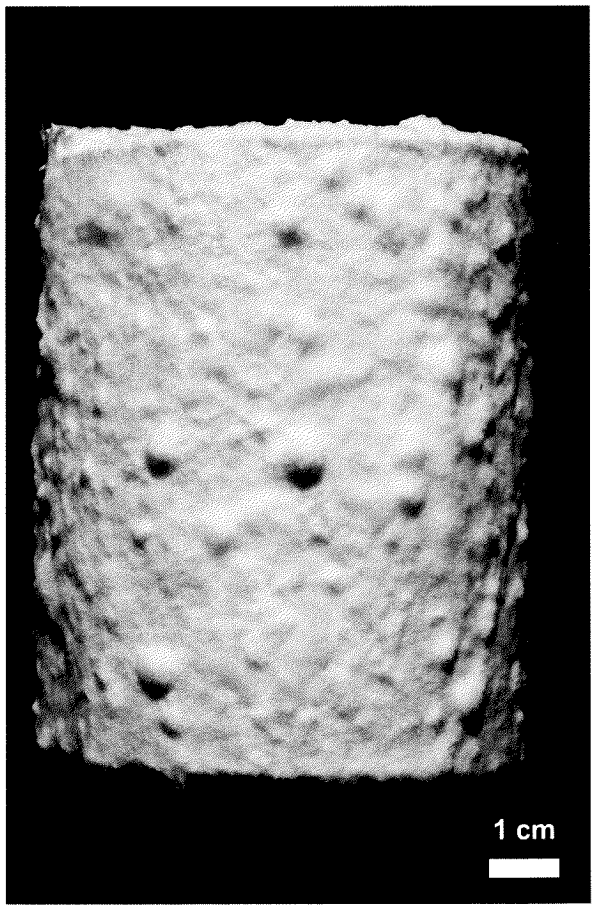


Abbildung 4.7: Mit einer Flüssigkultur von *F. pinicola* inokuliertes Teststück nach 4 Wochen Inkubationszeit in einer sterilen Kunststoffdose. Der Pilz hat sich auf der Holzoberfläche etabliert und umschliesst die ganze Holzprobe mit einer dichten Myzelmatte. In diesem Zustand wurden die Proben in die Inkubationsbehälter mit Kies eingebracht.

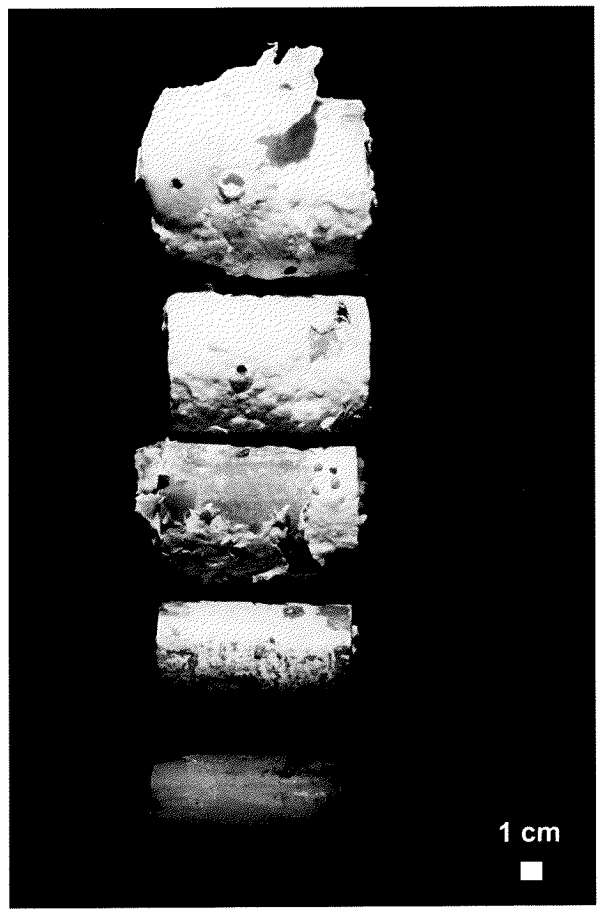


Abbildung 4.8: Teststücke der Serien 1 bis 5 (von oben nach unten) nach 21 Wochen Inkubationszeit. Die Entwicklung des Luftmyzels nahm von der Serie 1 (ohne Wasserzugabe) mit der Dauer der Überflutung sukzessive ab und blieb bei der Serie 5 (dauernde Überflutung) beinahe ganz aus. Die teilweise zerrissenen Myzelmatten sind durch die Entnahme der Proben aus den Dosen bedingt.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Ergebnisse des Abbauversuchs. Mittelwerte und in Klammern Standardabweichungen der Serien. MV: Masseverlust der Teststücke [%]; FV: Reduktion der Druckfestigkeit parallel zur Faser [%]; d: Durchmesser der Teststücke (P) [mm]; u: Holzfeuchte der Teststücke (P) beim Druckversuch [%]; N: Anzahl ausgewertete Probeeinheiten (Masseverlust / Festigkeitsverlust).

Serie	MV		FV		d		u		N
1	23.04	(5.26)	81.99	(4.71)	68.69	(0.71)	11.11	(4.41)	13 / 11
2	15.30	(2.61)	61.00	(10.63)	68.54	(0.72)	11.59	(4.07)	13 / 13
3	8.80	(2.31)	45.07	(8.08)	64.24	(0.66)	11.61	(4.83)	13 / 13
4	3.39	(1.71)	19.41	(10.82)	62.14	(0.61)	12.10	(7.71)	13 / 13
5	2.26	(2.61)	15.62	(14.74)	58.41	(0.71)	12.45	(7.80)	13 / 12
Kontrolle	-0.18	(2.22)	0.11	(6.49)	81.14	(0.57)	12.87	(2.84)	11 / 11

Tabelle 4.2: Varianzanalyse-Tabelle aus dem allgemeinen linearen Modell. Beim Durchmesser und der Holzfeuchte wurden jeweils die Werte der Teststücke P verwendet. F: Testgrösse (t-Statistik); p: Irrtumswahrscheinlichkeit.

Masseverlust

Quelle	Freiheitsgrade	Quadratsumme	Mittleres Quadrat	F	p
Serie	5	5002.26	1000.45	107.06	<0.001
Durchmesser	1	0.09	0.09	0.01	0.92
Total	6	5002.36			

Festigkeitsverlust

Quelle	Freiheitsgrade	Quadratsumme	Mittleres Quadrat	F	p
Serie	5	29396.45	5879.29	59.86	<0.001
Durchmesser	1	4.34	4.34	0.04	0.83
Holzfeuchte	1	171.95	171.95	1.75	0.19
Total	7	29572.74			

4.4 Diskussion

Einfluss der periodischen Überflutung von frischem Fichtenholz auf den Holzabbau durch Fomitopsis pinicola

Die periodische Überflutung von frischem Rundholz (*Picea abies*) wirkte sich deutlich auf den Holzabbau durch *Fomitopsis pinicola* aus. Die Rundhölzer, welche nie unter Wasser standen (Serie 1), wiesen den intensivsten Holzabbau auf.

Für den Abbau von Holz durch eine bestimmte Pilzart wird oft ein minimaler sowie ein maximaler Wassergehalt angegeben. Die Limitierung des Pilzwachstums in trockenem bzw. nassem Holz hat aber nicht dieselbe physiologische Ursache. Bei einer Holzfeuchte unter dem Fasersättigungspunkt (für Nadelholz: u = 25-30%, nach Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955) liegt das Wasser vorwiegend in gebundener Form in den Zellwänden vor. Dadurch ist es für die meisten holzzerstörenden Pilze – bedingt durch das tiefe Wasserpotential – nicht verfügbar (Griffin 1977, Griffith & Boddy 1991, Dix & Webster 1995). Bei Holzfeuchten von über 200%, bei welchen die meisten Basidiomyceten ihr Wachstum einstellen (Ammer 1964, Zabel & Morrell 1992), wirkt hingegen der mangelnde Sauerstoff im Holz limitierend (Rypácek & Jahn 1966). Zwischen diesen Kardinalwerten für den Wassergehalt folgt der Holzabbau einer Optimalkurve (Bunnell & Dowding 1974, Zabel & Morrell 1992), wobei zwischen verschiedenen Pilzarten und -stämmen erhebliche Unterschiede bestehen (Bavendamm & Reichelt 1938, Ammer 1964, Wälchli 1973).

Unter diesen Gesichtspunkten lassen sich die festgestellten Unterschiede des Holzabbaus wie folgt interpretieren. Da die Teststücke der Probeserie 1 (ohne Wasserzugabe) den intensivsten Holzabbau aufwiesen, kann das Pilzwachstum in keiner der Serien 1 bis 5 durch eine zu geringe Holzfeuchte limitiert gewesen sein. Frisches Splint- und Kernholz von Fichte weist einen Wassergehalt von 130-200 % bzw. 30-50 % auf (Bernhart 1965, Burmester 1980, Kucera & Bosshard 1989). Offensichtlich war die Holzfeuchte der Teststücke schon zu Beginn des Experiments und ohne Wasserzugabe für das Wachstum des Fäuleerregers *Fomitopsis pinicola* geeignet. Saprobe Pilze produzieren beim Abbau des Nährsubstrats Wasser. Der Braunfäuleerreger *Postia placenta* beispielsweise erhöhte in einem Experiment den Wassergehalt von Nadelholz (*Pinus resinosa*) von 40 auf rund 290% (Smith & Shortle 1990), wobei sich dieser hohe Wert auf das Trockengewicht der Proben nach den Experiment beziehen. Deshalb ist es plausibel, dass der Testpilz in den Rundhölzern der Serie 1 über die ganze Versuchszeit eine genügende Holzfeuchte aufrecht erhalten konnte.

Der reduzierte Holzabbau bei zunehmender Überflutungsdauer wurde sehr wahrscheinlich durch fehlenden Sauerstoff im Holz verursacht. Die minimale Dauer der Trockenphasen, welche zur Entwicklung einer Fäule und zu messbarem Holzabbau führte, scheint zwischen den Serien 3 und 4 zu liegen. In den Serien 4 und 5 waren weder Masse- noch Festigkeitsverlust signifikant. Obschon in der Serie 5 die Rückisolierung des Testpilzes aus dem Bereich unmittelbar unter der Holzoberfläche nicht gelang, kann in dieser Serie nicht von einer letalen Wirkung der Bedingungen auf *F. pinicola* ausgegangen werden. Verschiedene Basidiomyceten können während Jahren bei sehr geringem Sauerstoffgehalt überleben (Schmitz & Kaufert 1938, Johnson & Martin 1992). Isolate von *Fomitopsis pinicola* und *Antrodia serialis* (Fr.) Donk überlebten im Experiment während 1 - 3 Monaten, *Gloeophyllum sepiarium* (Wulf.) P. Karst. während 3 - Monaten unter totalem Ausschluss von Sauerstoff (Scheffer 1986).

Die experimentellen Bedingungen können die natürlichen Verhältnisse in Wildbachgerinnen nur bedingt wiedergeben. Verschiedene externe Faktoren, welche den Wassergehalt verbauter Rundhölzer beeinflussen, wurden im Experiment vernachlässigt. Als Beispiele seien eine verstärkte Evapotranspiration durch Sonneneinstrahlung, Wind, oder auch eine Erhöhung der Porosität des Holzes durch die Aktivität holzbewohnender Insekten genannt. Zudem muss beachtet werden, dass bei den verwendeten, rund 30 Jahre alten Fichten ($Ø \approx 5 - 8$ cm) der Kernholzanteil geringer war als bei verbautem Holz mit einem Durchmesser von rund 30 cm. Trotz dieser Einschränkungen stimmen die Ergebnisse aus dem Laborexperiment gut mit den Resultaten aus den Felduntersuchungen an Wildbachsperren (Kapitel 2 und 3) überein. Die vom Wasserfluss im Gerinne weitgehend unbeeinflussten Sperrenflügel weisen die intensivsten Abbauerscheinungen auf. Dieses Phänomen dürfte zur Hauptsache auf die ausbleibende Benetzung durch das Wasser im Gerinne zurückzuführen sein.

Wildbachsperren aus Holz lassen sich demnach nur bedingt mit anderen Holzbauten mit Erdkontakt wie Zäune, Pfosten oder Leitungsmasten vergleichen. An derartigen Konstruktionen wurden jeweils im Übergangsbereich zwischen Erde und Luft die grössten Abbauraten festgestellt (Cartwright & Findlay 1958, Levy 1968, 1982). Die der Luft ausgesetzten Teile waren jeweils weniger stark angegriffen. Zudem wurde festgestellt, dass Pfosten in nassen Böden rascher zerstört werden (Hedley & Drysdale 1985, Edlund 1998). Die Verfügbarkeit von Wasser kann demnach bei in der Erde eingelassenen Pfählen in den oberirdischen Bereichen zum limitierenden Faktor werden. Dies scheint an Wildbachsperren nicht der Fall zu sein. Die trockensten Bereiche (Sperrenflügel) entsprechen folglich ungefähr jenen Übergangsbereichen zwischen Boden und Luft an Holzpfosten, welche für den Abbau durch Fäuleerreger ideal sind.

Holzkonstruktionen im Bachverbau sind eher Bedingungen ausgesetzt, wie sie für Rundholz bei einer Nasslagerung oder für Holz im Wasserbau zutreffen. In einer Langzeitstudie an Kiefern aus Beregnungspoltern in Grossbritannien beschränken sich die gefundenen Fäuleschäden nach fünf Jahren auf 0.1 bis 0.2% des untersuchten Holzvolumens (Webber & Gibbs 1996). Hapla (1992) fand nach fünfjähriger Nasslagerung – ebenfalls von Kiefern – keine negativen Auswirkungen auf die Holzeigenschaften. Umgekehrt weisen Syme & Saucier (1995) auf die Problematik einer zeitweisen Austrocknung hin, welche zu grossen wirtschaftlichen Einbussen durch Fäulen führen kann.

Die beiden weiteren an Bachsperren sehr häufig nachgewiesenen Arten *Antrodia serialis* und *Gloeophyllum sepiarium* haben vergleichbare ökologische Ansprüche wie *Fomitopsis pinicola* (Jahn 1979), wobei *G. sepiarium* vor allem auch trockene Substrate besiedelt (Breitenbach & Kränzlin 1986a). Diese Arten traten ebenfalls vorwiegend an den nicht benetzten Bauteilen der Sperren auf (Kapitel 2), weshalb ein ähnliches Abbauverhalten bei variierender Überflutung zu erwarten sein dürfte wie für *F. pinicola*.

Da verschiedene andere Pilzarten, insbesondere Moderfäuleerreger aus den Gruppen der Asco- bzw. Deuteromyceten, langfristig auch Holz mit einem hohen Wassergehalt abbauen können (vergl. Kapitel 1.1), bietet auch eine dauernde Benetzung der Bauteile keinen absoluten Schutz gegen Fäulnis. Auch einige Basidiomyceten sind in der Lage, Holz bei sehr hohem Wassergehalt zu zerstören, was an Konstruktionen in Kühltürmen gezeigt werden konnte (Udaiyan & Manian 1991, Van Acker *et al.* 1995, Van Acker & Stevens 1996). Bei Bachsperren kann jedoch davon

ausgegangen werden, dass schon eine zeitweise Benetzung des Holzes durch Gerinnewasser zumindest den häufigsten Arten entgegenwirkt, welche massgebend zum frühzeitigen Zerfall von Bachsperren beitragen.

Methodik des Abbauexperiments

Die Inokulation von saftfrischen und unsterilen Fichtenholzproben mit einer Flüssigkultur von *Fomitopsis pinicola* war sehr effektiv. Die Myzelfragmente besiedelten innert weniger Tage die gesamte Probenoberfläche. An keinem der 65 Teststücke wurden Kontaminationen festgestellt. Diese Art der Inokulation stellt eine Erweiterung ähnlicher Methoden mit unsterilen Proben dar, bei welchen – im Hinblick auf Konstruktionsholz im Hochbau – getrocknete Holzproben verwendet wurden (Lohwag 1963, Viitanen & Ritschkoff 1991). Mit der verwendeten Methode konnten die typischen Verhältnisse verbauter Rundhölzer von Wildbachsperren erfolgreich simuliert werden.

Die Quantifizierung des Holzabbaus durch saprobe Pilze erfolgte bisher meist anhand des Masseverlustes von Holzproben. Dabei diente die Differenz des Trockengewichts der Proben vor und nach der Inkubation als Messgrösse für die Aktivität der Testpilze (Gäumann 1930, Armstrong & Savory 1959, Courtois 1970, Schwarze 1995). Dieses Vorgehen ist bei der Verwendung saftfrischer Holzproben nicht möglich. Der Masseverlust sowie die Druckfestigkeit der Teststücke liessen sich jedoch recht genau und ohne systematische Fehler aus den Referenzen schätzen (Korrelationen innerhalb der Kontrollserie mit $R^2 = 0.97$ bzw. 0.67). Die geringere Korrelation bei der Druckfestigkeit lässt sich dadurch erklären, dass sich Strukturstörungen wie Äste oder Risse auf die Festigkeitseigenschaften stärker auswirken als auf das Darrgewicht der Proben.

Der Einfluss der an der Holzoberfläche (Serie 4 und 5) festgestellten Vertreter der Gattung *Trichoderma* auf das Wachstum des Testpilzes ist schwer abschätzbar. Verschiedene Arten dieser Gattung sind für ihre hemmende Wirkung auf holzzerstörende Basidiomyceten bekannt (Dawson-Andoh & Morrell 1991, Schoeman *et al.* 1996, Ejechi 1997). *Trichoderma*-Arten konnten jedoch bisher zur biologischen Bekämpfung von Fäuleerregern an Holzkonstruktionen nur mit mässigem Erfolg eingesetzt werden (Score *et al.* 1998, Graf 2001). Ob *Trichoderma* sp. schon zu Beginn des Experiments im Holz vorhanden war oder beim Öffnen der Dosen zwecks Wasserzugabe hineingelangte, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden. Auch in jenen Serien (1 bis 3), wo *Trichoderma* sp. nicht auftrat, waren die Unterschiede des Abbaus zwischen den Serien signifikant. Deshalb ist kaum anzunehmen, dass eine antagonistische Wirkung von *Trichoderma* sp. in den Serien 4 und 5 allein für den geringen Holzabbau verantwortlich war. Das Auftreten von *Trichoderma* sp. dürfte deshalb das Gesamtergebnis des Versuchs kaum verfälscht haben.

Das verwendete Isolat von *Fomitopsis pinicola* verursachte in der Serie 1 in 21 Wochen einen mittleren Masseverlust von rund 23% des Trockengewichts der Holzproben (vergl. Tabelle 4.1, S. 65). Diese Abbaurate ist im Vergleich zu früheren Studien mit *F. pinicola* eher gering (vergl. Kapitel 5.4.2). Dies könnte insbesondere an der Verwendung unsteriler Proben liegen. Die prozentuale Abnahme der Druckfestigkeit im Verhältnis zum Masseverlust liegt im Bereich früher publizierter Daten (Tabelle 4.3).

Die Befunde zeigen, dass insbesondere Braunfäulen schon bei geringem Masseverlust eine relativ hohe Festigkeiteinbusse bewirken. Auch führt ein bestimmter Masseverlust – je nach Pilzart und Fäuletyp – zu unterschiedlichen Festigkeitsverlusten (Schwarze 1995). Deshalb sollten sich Abbauversuche mit technischer Fragestellung nicht auf den Masseverlust als einzige Messgrösse für die Pilzaktivität beschränken, sondern zusätzliche technisch relevante Grössen mit einbeziehen. Bei der durch Fragestellung und Versuchsanordnung bedingten Probenform kamen nur Druckversuche in Frage. Biege- bzw. Schlagbiegeprüfungen reagieren sensitiver auf Pilzbefall als Druckversuche (Mizumoto 1966, Wilcox 1978) und könnten in weiteren Versuchen eine kürzere Versuchsdauer ermöglichen.

Wie sich die für das Experiment gewählte Periodizität der Überflutung auf den Holzabbau auswirkte, ist schwierig abzuschätzen. Peralta *et al.* (1993) untersuchten während zwei Jahren den Einfluss periodischer Beregnung von Holz auf Nasslagerplätzen (Intervalle von 1 h Beregnung und 2 h Trockenheit). Sie fanden eine bessere Schutzwirkung des Holzes gegen Bläuepilze und Insekten bei kontinuierlicher Beregnung. Als Ursache vermuten sie aber eher die grössere Gesamtmenge des ausgebrachten Wassers als die Kontinuität der Beregnung. Die Gesamtdauer, während der im Holz für den Abbau geeignete Feuchtebedingungen herrschen, nennen auch Rapp *et al.* (2000) als massgebende Grösse für die Entwicklung von Holzfäulen. Ob eine andere Versuchsplanung mit gleicher Gesamtdauer der Überflutung jedoch einer anderen Periodizität (vergl. Abbildung 4.4, S. 60) vergleichbare Resultate erbringt, kann nur durch weitere Studien überprüft werden.

Zur Charakterisierung des Wassergehaltes wurde die Dauer der Überflutung an Holzproben gewählt. Auf die Bestimmung der Holzfeuchte sowohl an den Probestellen im Feld (vergl. Kapitel 3.4.3) wie auch an den Kleinproben im Experiment wurde aus folgenden Gründen verzichtet:

Im Laufe von Abbauexperimenten kann die Holzfeuchte durch die Veränderung der Porosität des Holzes und durch die Wasserproduktion aus dem Stoffwechsel des Testpilzes stark variieren (Courtois 1970, Smith & Shortle 1990). Somit stellt die im Laborversuch gemessene Holzfeuchte keine repräsentative Grösse für den Einfluss des externen Wassereintrags dar.

Tabelle 4.3: Masseverlust und Festigkeitsverlust in ausgewählten Abbauversuchen mit Braunfäuleerregern an Nadelholz. In allen Studien wurden sterile Holzproben verwendet. Die Prüf- bzw. Inokulationsmethoden weichen zum Teil voneinander ab, so dass die einzelnen Zahlen nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden können. Es wurden nur Studien mit statischen Prüfmethoden berücksichtigt. ID: Inkubationsdauer [Tage]; MV: Masseverlust [%]; FV: Festigkeitsverlust [%].

Fäuleerreger	**Holzart**	**ID**	**Prüfmethode**	**MV**	**FV**	**Autoren**
Antrodia serialis	*Picea sitchensis*	70	Biegefestigkeit	13	70	Cartwright *et al.* (1931)
Gloeophyllum trabeum	*Pinus densiflora*	30 / 150	Druckfestigkeit // Faser	2 / 16	10 / 75	Mizumoto (1966).
Gloeophyllum trabeum / Postia placenta	*Pseudotsug a menziesii*	177	Biegefestigkeit	18 / 20	73 / 65	Winandy & Morrell (1993)
Serpula lacrymans	*Picea abies*	105	Biegefestigkeit	5	45	Niemz *et al.* (2001)
Gloeophyllum trabeum / Postia placenta	*Pinus* spp.	84	Biegefestigkeit	25-40	80-100	Curling *et al.* (2002)
Fomitopsis pinicola	*Picea abies*	140	Druckfestigkeit // Faser	23	82	Vorliegende Studie (Serie 1)

Ähnliches gilt für Messungen der Holzfeuchte an verbauten Rundhölzern an Bachsperren. Zwar wird dort der momentane Wassergehalt primär durch externen Wassereintrag (Niederschlag, kapillare Aufnahme von Bodenwasser, Wasserfluss im Gerinne) sowie Wasserverlust (Gravitation, Evapotranspiration) bestimmt (Rayner & Boddy 1988). Der Stoffwechsel von Mikroorganismen sowie der Wassertransport durch Pilzmyzel haben jedoch ebenfalls einen entscheidenden Einfluss (Schmidt 1994). Zudem bewirkt eine Erhöhung der Porosität bei fortschreitender Fäule – wie bei den Laborstudien – eine Änderung der Aufnahmekapazität sowie der Austrockungsdynamik des Holzes. Dadurch wird die Holzfeuchte auch vom Zeitpunkt des letzten Wassereintrags (z.B. durch Niederschlag) abhängig. Angesichts des sehr variablen Holzzustands an den Sperren zeigen diese Überlegungen, dass eine einmalige Bestimmung der Holzfeuchte im Feld keine gute Vergleichsgrösse für den Wasserhaushalt verbauter Rundhölzer sein kann.

4.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus dem Experiment zum Abbau von frischem Fichten-Rundholz durch *Fomitopsis pinicola* bei unterschiedlicher Überflutungsdauer folgt ein klares Resultat: Holz ohne Wasserzugabe wurde unter den verwendeten Versuchsbedingungen am raschesten abgebaut. Der Abbau verringerte sich mit der Gesamtdauer der Benetzung und blieb bei vollständiger Überflutung ganz aus.

Wenn auch die Versuchsbedingungen nicht in jeder Hinsicht den Verhältnissen an Wildbachsperren entsprechen, so konnte doch der Einfluss einer periodischen Überflutung auf den Abbau durch den häufigsten Fäuleerreger (*Fomitopsis pinicola*) quantitativ belegt werden. Eine exakte Prognose der Lebensdauer einzelner Bauteile von Wildbachsperren aus Holz ist aufgrund der vorliegenden Untersuchung nicht möglich. Dennoch machen die Ergebnisse die Bedeutung des Wassergehaltes für die Anfälligkeit verbauter Rundhölzer gegenüber Fäuleerregern deutlich. Die minimale Holzfeuchte für die Entwicklung einer Fäule wird vermutlich selbst an den trockensten Bauteilen von Holzkonstruktionen im Bachverbau nie für längere Zeit unterschritten. Schon eine temporäre Benetzung – wie beispielsweise an den Einbindungen – kann das Sauerstoffangebot im Holz derart verringern, dass die Entwicklung holzzerstörender Basidiomyceten stark gehemmt wird. Alle Bemühungen zur Verhinderung von Fäulnis müssen deshalb auf eine Erhöhung des Wassergehalts abzielen. Die Empfehlungen, das Holz möglichst rasch nach dem Einschlag zu verbauen oder die Forderung nach Beschattung der Bauwerke (Rickli 1997, F. Florineth pers. Mitteilung), lassen sich somit bestätigen.

Nach den Ergebnissen des dargestellten Experimentes sowie den Resultaten der Kapitel 2 und 3 sind die Sperrenflügel deutlich stärker gefährdet als die übrigen Bauteile. Ein Befall durch Basidiomyceten bzw. die Entwicklung von Fäulen kann bei der Verwendung von Tannen- und Fichtenholz an diesen Bauteilen kaum verhindert werden. Es stellt sich deshalb die Frage, ob der Einsatz von Holz als Baustoff an den Sperrenflügeln sinnvoll ist. Die Verwendung von anderen Materialien wie Blocksteinen oder Drahtsteinkörben ist möglich (Wenzel 1990, Steinlin *et al.* 1996, Böll *et al.* 1999). Das erhöhte Gewicht der Flügel stellt jedoch höhere Anforderungen an Steifigkeit und Tragfähigkeit des Sperrenkörpers und der Einbindungen. Insbesondere wenn zur Verfüllung der Holzkasten Feinmaterial verwendet wird, kann es zur Deformation der

Sperrenkörper kommen (Böll 1997). Eine Lösung dieses Problems würde die Verwendung von Stein als Baumaterial im Einbindungsbereich bieten (Abbildung A.1 in Anhang VII). Dies ist jedoch mit erhöhten Erstellungskosten verbunden und setzt eine genügende Tragfähigkeit des Bodens voraus.

Bei einer in Österreich teilweise angewandten Konstruktionsweise, bei welcher die Sperrenflügel schräg in den Sperrenkörper eingesenkt werden (Abbildung A.2 in Anhang VII), besteht ein direkter Kontakt der Rundhölzer der Flügel mit dem Fliesswasser im Gerinne (F. Florineth, pers. Mitteilung). Dadurch könnte der Wassergehalt dieser Bauteile erhöht und damit Fäuleprozesse verlangsamt werden. Ein Nachweis der positiven Wirkung dieser Konstruktionsweise muss jedoch zunächst erbracht werden.

Das durchgeführte Laborexperiment bestätigte die im Feld gemachten Feststellungen insofern, als die trockensten Bauteile die stärksten Abbauerscheinungen aufwiesen (vergl. Kapitel 3). Eine weiterführende Untersuchung des Wasserhaushaltes im Holz von Wildbachsperren und seine Wirkung auf den Basidiomycetenbefall könnte durch langfristige Beobachtungen indirekter Faktoren geschehen. Als mögliche Parameter seien hier die Bodenfeuchte, die Besonnung (vergl. Kapitel 3), die Dynamik des Wasserflusses, die Luftfeuchtigkeit und die Niederschlagsverhältnisse am Sperrenstandort angeführt. Eine langfristige Überwachung der Holzfeuchte könnte mittels TDR-Sonden erfolgen, wie sie für die Messung des Wassergehalts von Böden (Bohl 1996) oder von Holz (Gray & Spies 1995) eingesetzt werden. Voraussetzung hierzu ist jedoch, dass von intaktem Holz (neu gebaute Sperren) ausgegangen wird, da das veränderte Sorptionsverhalten des Holzes durch Pilzbefall die Interpretation der Ergebnisse verfälschen kann.

5 Wirkung von Eisen aus Verbindungsnägeln auf holzabbauende Pilze

5.1 Einleitung

Die Rundhölzer von Holzkonstruktionen im Bachverbau werden in der Regel durch Stahlnägel miteinander verbunden, wozu meistens unbehandelte Armierungseisen eingesetzt werden (Rickli 1997). Nägel in feuchtem Holz sind jedoch oft einer intensiven Korrosion ausgesetzt (Baker 1974, 1992) und haben deshalb einen Einfluss auf die Inhaltsstoffe des umliegenden Holzes (Abbildung 5.1). Die Korrosion der Nägel ist elektrochemischer Natur, wobei die im Wasser gelösten Ionen im Holz als Elektrolyt wirken. Die Reaktionen an der Nageloberfläche können vereinfacht wie folgt beschrieben werden (Berns 1993):

Anodische Reaktion

Oxidation von Eisen

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

Kathodische Reaktion:

Reduktion von Sauerstoff, in schwach sauren bis schwach basischen und belüfteten Elektrolyten

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH$$

Bildung von Wasserstoff, in sauren Elektrolyten ohne Sauerstoff

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

Extrakte der im Bachverbau häufig verwendeten Holzarten Fichte und Tanne weisen pH-Werte von rund 4.5 bis 5.5 auf (Fengel & Wegener 1984). In diesem Bereich sind, abhängig vom Zutritt von Sauerstoff, grundsätzlich alle angegebenen Reaktionen möglich.

Auch die Bildung von Korrosionsprodukten aus der anodischen Reaktion sind pH abhängig. In sauren Lösungen kann Fe^{2+} in gelöster Form existieren, bei höherem pH-Wert werden die unlöslichen Produkte Eisen(II)hydroxid $Fe^{2+}(OH)_2$ und unter dem Einfluss von

Abbildung 5.1: Beispiel eines Nagels im Holz (Verbauung „Ruostel", Kt. SZ, vergl. Lienert 1991) Deutlich ist die Verfärbung des Holzes um den Nagelschaft erkennbar. Auch im Abstand von einigen Zentimetern ist das Holz dunkel und teilweise rotbraun verfärbt, was auf eine Veränderung der Inhaltsstoffe des Holzes im Bereich eines Nagel hinweist.

Sauerstoff Rost $Fe^{3+}O(OH)$ oder Eisen(III)hydroxid $Fe^{3+}(OH)_3$ gebildet (Marian & Wissing 1960b). Welche Kathodenreaktionen stattfinden und welche Korrosionsprodukte aus der Anodenreaktion letztlich entstehen, ist vom pH-Wert und der Zusammensetzung des Elektrolyten sowie der Verfügbarkeit von Sauerstoff abhängig (Wranglén 1985).

Korrosionsprodukte, welche von rostenden Nägeln freigesetzt werden, können einen direkten Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften des umliegenden Holz haben (Farber 1954, Marian & Wissing 1960a, Helinska-Raczkowska & Raczkowski 1978). Dabei werden in einer durch Eisenionen katalysierten Reaktion Hemizellulosen und Zellulose oxidativ gespalten, wobei im Versuch die Zugfestigkeit von Holzproben in Eisenkontakt nach 9 Monaten um rund 50% reduziert wurde (Marian & Wissing 1960b).

Eisen ist auch für den Holzabbau durch Pilze von grosser Bedeutung. Wie von den meisten Lebewesen wird Eisen von Pilzen als Spurenelement für den Stoffwechsel benötigt. So sind beispielsweise der Elektronentransfer in der Atmungskette oder die DNA-Synthese von der Verfügbarkeit von Eisen abhängig (Griffin 1994, Matzanke 1994). Fäuleerreger benötigen zudem Eisen im extrazellulären Enzymsystem zum Abbau verholzter Zellwände (Paszczynski *et al.* 1988, Jellison *et al.* 1997b).

Für Braunfäuleerreger spielt Eisen auch beim nichtenzymatischen Abbau verholzter Zellwände eine entscheidende Rolle. Exoenzyme sind zu gross, um die Mikroporen verholzter Zellwände zu durchdringen (Stone *et al.* 1970, Srebotnik & Messner 1990, 1991). Trotzdem wird bei Braunfäulen die Zellulose der S_2-Schicht depolymerisiert, ohne dass zunächst die S_3 Schicht angegriffen wird (Wilcox 1968, Eriksson *et al.* 1990). Hierfür ist eine Reaktion (Fentonreaktion, Winterbourn 1991) verantwortlich, an welcher Eisenionen (Fe^{2+}) und Wasserstoffperoxid (H_2O_2) beteiligt sind (Koenigs 1974a, Murmanis *et al.* 1988, Enoki *et al.* 1989, Hyde & Wood 1997). Durch diese Reaktion werden Hydroxyl-Radikale gebildet, welche die Kohlenhydrate der Zellwand oxidativ spalten (Koenigs 1974a, Gilbert *et al.* 1984, Goodell *et al.* 1997). Wasserstoffperoxid konnte als Stoffwechselprodukt verschiedener Braunfäuleerreger nachgewiesen werden (Koenigs 1972, 1974b, Highley 1980). Eisen muss dazu aus dem Substrat verfügbar gemacht werden (Griffin 1994).

Da Eisen in der Gegenwart von Sauerstoff und in feuchter Umgebung meist in seiner dreiwertigen Form – primär als Hydroxid – vorliegt (Jones 1986, Winterbourn 1991), ist es für die meisten Mikroorganismen nicht direkt verfügbar (Fekete *et al.* 1989). Viele von ihnen produzieren deshalb chelatbildende Moleküle (Siderophoren), welche dreiwertiges Eisen (z.B. aus $FeOH_3$) mobilisieren und für den Organismus verfügbar machen (Raymond & Carrano 1979, Emery 1987, Neilands *et al.* 1987, Schwyn & Neilands 1987, Hughes & Poole 1991). An der Chelatisierung sowie am Transport und der Reduktion von Fe^{3+} zu Fe^{2+} sind wahrscheinlich verschiedene Stoffgruppen beteiligt. Eine Übersicht über verschiedene Modelle zur Erklärung dieses Prozesses findet sich bei Hyde & Wood (1997).

Die beschriebene physiologische Bedeutung von Eisen für Pilze legt den Schluss nahe, dass ein erhöhter Eisengehalt im Holz dessen Abbau durch Fäuleerreger beeinflusst. Direkte Studien zur Wirkung von Eisen auf den Holzabbau durch Pilze sind selten und zum Teil widersprüchlich. Während Eisen das Wachstum verschiedener Fäuleerreger in Kultur förderte (Negrutskiy *et al.* 1998), stellten Ruddick & Kundzewicz (1991) bei erhöhtem Eisengehalt des Holzes keine verstärkte Fäulnis fest.

Über Eisengehalte, welche sich in verbautem Holz im Freien im Bereich von Eisennägeln einstellen, liegen keine Daten vor. Ebenso fehlen Studien über den Einfluss von Korrosionsprodukten aus Nägeln und den daraus resultierenden erhöhten Eisengehalt des Holzes auf die Abbauaktivität holzzerstörender Pilze. Zur Beantwortung dieser Fragen müssten einerseits die Korrosionsprodukte von Nägeln sowie deren Konzentration und Verlagerung im Holz analysiert, und andererseits deren Auswirkungen auf den Holzabbau durch Pilze untersucht werden. Zunächst sollte jedoch bekannt sein, welchen Einfluss Eisenkonzentrationen, wie sie sich im Bereich von Stahlnägeln im Laufe der Zeit einstellen, auf den Holzabbau durch Fäuleerreger haben. An diesem Punkt setzt die vorliegende Studie an.

Ziel der Arbeit war es, die Wirkung von Eisengehalten, welche im Bereich von Verbindungsnägeln im Holz von Wildbachsperren auftreten, auf die Abbauaktivität des Braunfäuleerregers *Fomitopsis pinicola* (Fr.) Karst. zu untersuchen. Dieser Porling war der an Bachsperren am häufigsten nachgewiesene Fäuleerreger (vergl. Kapitel 2.3.1). In der vorliegenden Studie wurde zunächst die Verteilung des Eisens im Bereich von Nägeln im Holz verbauter Rundhölzer mittels energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX) abgeschätzt. Anschliessend wurde der Gesamtgehalt des Eisens im Holz mit emissonsspektroskopischen Messungen bestimmt. In einem Laborexperiment wurden die in der Nähe der Nägel nachgewiesenen Eisengehalte durch Tränkung mit eisenhaltigen Lösungen in Holzproben simuliert und geprüft, wie sich diese Gehalte auf den Holzabbau durch *F. pinicola* auswirken.

5.2 Material und Methoden

5.2.1 Probenmaterial

Zur Analyse des Eisengehaltes von Holz im Bereich von Verbindungsnägeln wurden Rundhölzer einer 15 Jahre alten Wildbachverbauung im Wägital verwendet (Langrainbach, Gemeinde Vorderthal SZ, Koordinaten der Landeskarte 708.400 / 220.100, 920 - 970 m ü.M.). Die aus Fichtenholz erstellte Verbauung war zum Zeitpunkt der Probenahme im Frühjahr 2001 durch Rutschprozesse im Gerinne so stark beschädigt, dass verschiedene Sperren ihre Funktion nicht mehr erfüllen konnten und die Entnahme von Probestücken unproblematisch war (Abbildung 5.2). Von 10 verschiedenen Sperren wurde aus je einem Rundholz ein ca. 50 cm langer Abschnitt

Abbildung 5.2: Herkunft der Rundhölzer für die Eisenanalyse. Die Verbauung (Langreinbach, Gemeinde Vorderthal, Kt. SZ) war durch Rutschprozesse stark beschädigt, weshalb die Entnahme von Probestücken problemlos möglich war.

herausgesägt, welcher einen Verbindungsnagel enthielt (Abbildung 5.3). Sämtliche Rundhölzer waren entweder Elemente eines Sperrenflügels oder eines Längsverbaus und wiesen Durchmesser zwischen 25 und 40 cm auf.

Die Rundholzstücke wurden nahe der Ebene des Nagels gespalten und dieser anschliessend entfernt. Mit der Bandsäge wurden von allen 10 Rundhölzern längs zur Faser Holzproben der Dimensionen 1·1·5 cm herausgeschnitten (Abbildung 5.4). Die Entnahme der Proben erfolgte unter Einhaltung eines Abstands von mindestens 5 cm von der Oberfläche sowie vom Mark des Rundholzes. Die Abstände der Probenmittelpunkte von der Nageloberfläche betrugen 5, 15, 25, 35, 45 und 95 mm. Von 7 der Rundhölzer wurde je eine analoge Serie quer zur Faser entnommen. Insgesamt wurden also 17 Probeserien à 6 Proben hergestellt.

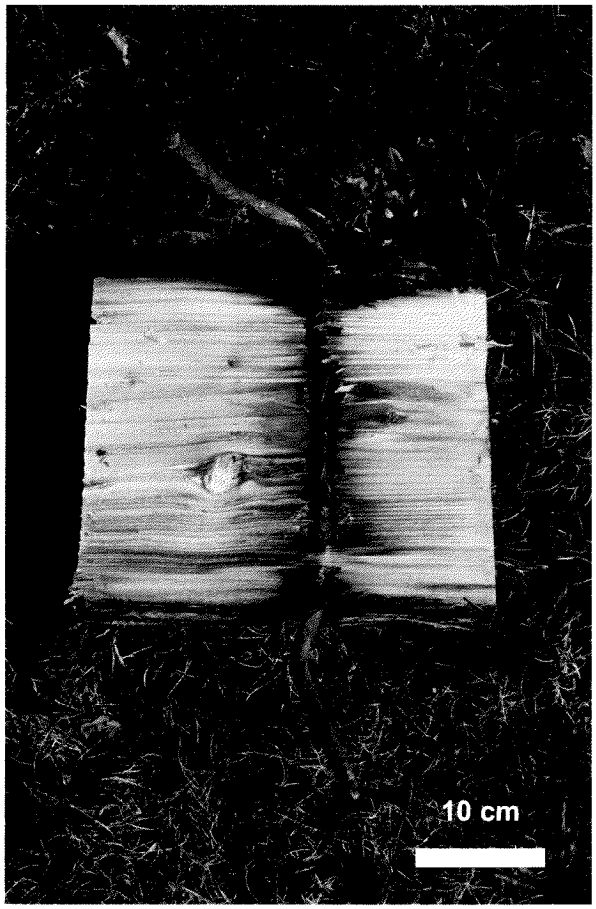


Abbildung 5.3: Rundholz nach dem Spalten entlang des Verbindungsnagels (Rundholz Nr. 6).

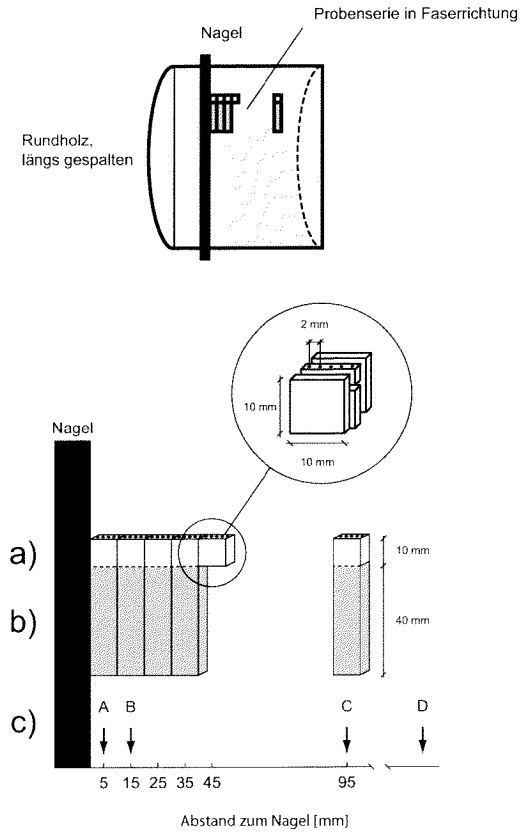


Abbildung 5.4:

Oben: Schematische Darstellung eines Nagels im Rundholz und Anordnung einer Probenserie in Faserrichtung.

Unten: Detaildarstellung einer Probenserie.

a) Probennahme für die EDX-Analyse (weiss). Vergrössert: Zuschnitt der Proben und Anordnung der Messpunkte.

b) Probennahme für die AES-Analyse (grau): Analysierte Proben (die Proben aus dem Abstand 45 mm wurden nicht analysiert).

c) Abstände, deren Eisengehalte (aus den AES-Analysen) für das Abbauexperiment berücksichtigt wurden. Der Abstand D entspricht einer Eisenkonzentration in einem grösseren, nicht bekannten Abstand von der Nageloberfläche.

5.2.2 Bestimmung des Eisengehalts im Holz

Energie-dispersive Röntgenmikroanalyse (EDX)

Die Proben von vier Serien längs und zwei Serien quer zur Faser wurden zunächst bei 70°C während 72 Stunden getrocknet. Von jeder Probe wurde ein Stück mit einer Rasierklinge abgetrennt und daraus Kleinproben von ca. 3·3·10 mm mit einer sauberen Schnittfläche tangential zum Faserverlauf hergestellt (Abbildung 5.4 unten, a). Nach dem Schneiden wurden alle Proben mit Druckluft gereinigt.

Die EDX-Analyse wurde mit einem Tieftemperatur-Rasterelektronenmikroskop (Philips SEM 515) durchgeführt. Die Vorbereitung und Kühlung der Proben erfolgte nach Frey *et al.* (1996). Alle Proben wurden mit Platin beschichtet (Schichtdicke ca. 8 nm). Auf den tangentialen Schnittflächen wurden bei 300facher Vergrösserung in Abständen von 2 mm Spot-Messungen durchgeführt (Messdauer 60 s, Totzeit ca. 30%). Somit konnte im Bereich zwischen 0 und 50 mm vom Nagel entfernt Messreihen mit einer Auflösung von 2 mm erstellt werden (vergl. Abbildung 5.4 unten, a). Der Bereich zwischen 90 und 100 mm wurde nur anhand von zwei Serien längs bzw. einer Serie quer zur Faser untersucht. Die analysierte Probenfläche betrug rund 290 x 290 µm, womit ein integraler Messwert über fünf bis zehn Zellen ermittelt wurde (Abbildung 5.5). Die Messspektren (Abbildung 5.6) wurden mit einer Analysesoftware (Voyager, Noran Instruments Inc., Middleton, WI) analysiert, welche das Hintergrundrauschen eliminiert und die Net-Counts der auszuwertenden Elemente ausgibt (Zysset *et al.* 1996, Brunner & Frey 2000, Heim *et al.* 2000). Auf eine Berechnung von Konzentrationen wurde verzichtet, da bei Proben von nicht definierter Dicke die erhaltenen Werte die Anteile der untersuchten Elemente

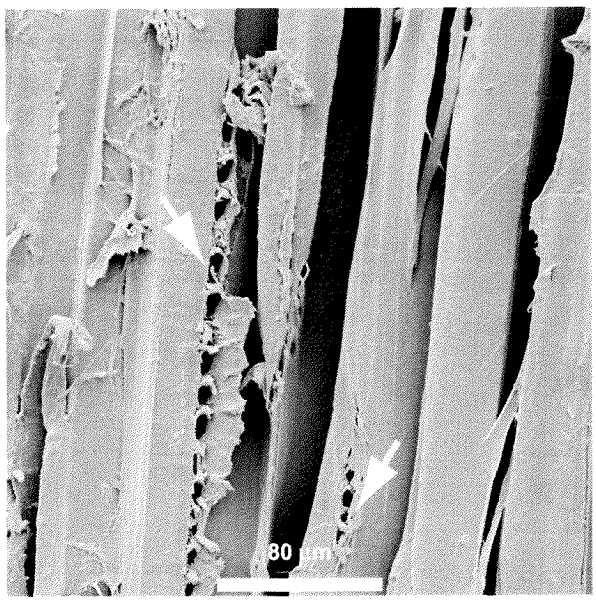


Abbildung 5.5: Messbereich bei der EDX-Analyse. Tangentiale Schnittfläche bei 300-facher Vergrösserung (Pfeile: Markstrahlen). Die Messung des Eisengehaltes erfolgte auf der ganzen sichtbaren Probenoberfläche (Kantenlänge ca. 290 µm). *Foto: B. Frey, WSL Birmensdorf.*

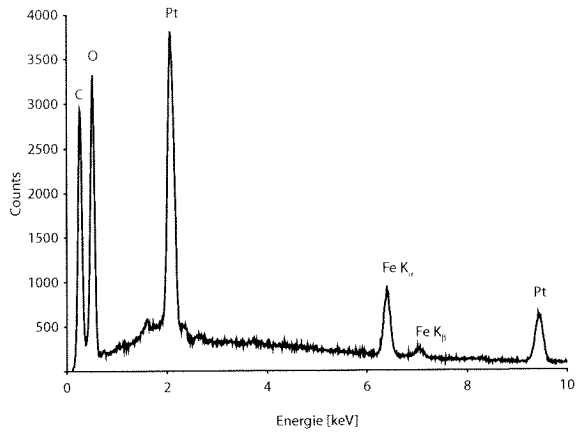


Abbildung 5.6: Beispiel eines Spektrums der EDX-Analyse (Testserie, Abstand vom Nagel 5 mm). Sichtbar ist das Spektrum von 0 bis 10 keV. Die Peaks von C, O, Pt (Beschichtung) und Fe wurden von der Quantifizierungs-Software (Voyager, Noran Inc.) automatisch identifiziert und die Netcounts als Gesamtzahl der Counts abzüglich des Grundrauschens (Bereiche zwischen den Peaks) berechnet. Das Element Eisen besitzt im Energiebereich von 0 bis 10keV zwei Peaks (K_α und K_β). Für die Auswertung wurden die Net-Counts des K_α-Peaks verwendet.

am Probenvolumen nur näherungsweise wiedergeben (Van Stevenwinck & Van Steveninck 1991). Als Nachweisgrenze für das Element Eisen wurden 50 Counts in 60 s festgelegt. Bei nicht genormten Proben können zudem die Messwerte (Counts) in Abhängigkeit des Winkels der Probenoberfläche und des Abstands zu Detektor variieren. Deshalb wurden nicht die Net-Counts von Eisen, sondern das Verhältnis der Net-Counts der Elemente Eisen und Kohlenstoff (Fe/C) zur Darstellung der Änderung des Eisengehaltes im Holz in Funktion des Abstands zum Nagel verwendet. Um zu prüfen, ob aus dem Schneiedevorgang mit einer Stahlklinge (Rasierklinge) messbare Eisenkontaminationen der Proben resultieren, wurden 25 Messungen an Proben aus Holz einer frisch gefällten Fichte durchgeführt, welche auf die selbe Art mit einer Rasierklinge hergestellt worden waren.

Atomemissions-Spektroskopie

Ausgehend von den Ergebnissen der EDX-Analyse wurden die Proben der Abstände 5, 15, 25, 35 und 95 mm vom Nagel für die spektroskopischen Analysen berücksichtigt (Abbildung 5.4 unten, b). Die Proben (10 Serien in Faserrichtung, 7 Serien quer zur Faser) besassen Abmessungen von 40x10x10 mm. Sie wurden nach der Trocknung während 72 Stunden bei 70°C und der Reinigung mit Druckluft in einer Schwingmühle Retsch MM 2000 (Mahldauer 240 s, Frequenz 30 Hz) aufgeschlossen, wobei Mahlbecher und -kugeln aus Zirkonoxid (Becherinhalt 25 ml, Ø Kugeln 20 mm) eingesetzt wurden. Anschliessend wurden die Proben nochmals während 24 Stunden bei 70°C getrocknet. Der Anteil des Eisens an der Trockenmasse der Proben wurde mit einem ICP-Atom-Emissions-Spektrometer (Perkin Elmer OPTIMA 3000, Perkin Elmer Schweiz AG) gemessen. Im folgenden wird das verwendete Verfahren kurz als *AES-Analyse* bezeichnet. Zum Nachweis von Verunreinigungen durch das Zuschneiden der Proben wurden – analog zur EDX-Analyse – 5 Kontrollproben analysiert. Die Proben aller Serien wurden pro Abstand zusammengefasst und innerhalb dieser Gruppen Median und Streuung berechnet (Tukey 1977).

5.2.3 Holzabbau *in vitro* in Abhängigkeit vom Eisengehalt

Für das Abbauexperiment wurden in Anlehnung an Jellison *et al.* (1997a) Holzproben mit Eisen(III)chloridlösungen ($FeCl_3$) verschiedener Konzentrationen getränkt. Die Holzproben stammten von einer rund 80-jährigen Fichte und wurden alle vom selben Kantholz (80·80 mm, ca. 10 m ab Stock) zugeschnitten. Die Kantenlänge der Proben in Faserrichtung wurde auf 10 mm festgelegt, um eine gute Durchtränkung zu gewährleisten. Damit ergaben sich Probenabmessungen von 80·80·10 mm. Alle Holzproben wurden vor der Tränkung nach DIN 52183 (1977) bei 103°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und das Darrgewicht auf 0.001 g genau bestimmt.

Die Proben wurden während insgesamt 88 Stunden unter Vakuum und unter ständigem Rühren der Lösung getränkt. Um das Eindringen der Lösung in die Proben zu verbessern, wurde das Vakuum in Intervallen von 24 Stunden für ca. 30 Minuten aufgehoben. Nach der Tränkung wurden die Proben abgetropft, erneut gewogen und die Masse der eingedrungenen Lösungsmenge aus der Differenz von Trocken- und Feuchtgewicht berechnet. Vorversuche ergaben, dass sich bei diesem Verfahren ein Wasser- bzw. Lösungsgehalt von rund 190% des Trockengewichts der Proben einstellt.

Die Holzproben wurden in 5 Serien (A bis E) à 23 Stück mit $FeCl_3$-Lösungen der Konzentrationen $c_{A\text{-}E}$ von 0.2, 0.05, 0.01, 0.001 und 0.000 [mol/l] getränkt. Die Lösungen wurden aus wasserfreiem

$FeCl_3$ in destilliertem Wasser hergestellt. Mit der Wahl dieser Konzentrationen wurde versucht, die aus der AES-Analysen bekannten mittleren Gesamtgehalte von Eisen der Abstände 5, 15 und 95 mm von der Nageloberfläche längs zur Faser künstlich zu erzeugen (Serien A bis C, vergl. Abbildung 5.4 unten, c). Die Serie D repräsentierte einen grösseren, nicht bekannten Abstand vom Nagel. Serie E diente als Kontrolle. Die pH-Werte der Lösungen wurden mit einem Universal-Farbindikator (Merck, Darmstadt, D) bestimmt.

Die Berechnung der Konzentration c einer $FeCl_3$-Lösung, welche unter obigem Verfahren einen bestimmten Eisengehalt k im Holz erzeugt, erfolgte dabei nach folgender Formel:

$$c = k \cdot \frac{\rho_L}{u \cdot M \cdot (w_{(Fe)} - k)}$$

c: Benötigte Stoffmengenkonzentration der $FeCl_3$-Lösung [mol/l]
k: Eisengehalt im Holz [g/g], aus AES-Analyse bekannt
ρ_L: Dichte der Lösung [g/l] ≅ 1000 g/l
u: Lösungsgehalt in % der Trockenmasse des Holzes ≅ 190%
$w_{(Fe)}$: Massenanteil von Fe in $FeCl_3$ (wasserfrei) [g/g] ≅ 0.34
M: Molmasse von $FeCl_3$ [g/mol]

Der maximale Fehler, welcher durch die Verwendung der Dichte ρ_L der $FeCl_3$-Lösung von 1000 g/l entsteht, beträgt rund 2.5% (im Falle der Serie A mit $c_A = 0.2$ mol/l) und wurde vernachlässigt.

Die Eisengehalte der Proben nach der Tränkung wurden durch Umformung der obigen Gleichung und unter Berücksichtigung der effektiv aufgenommenen Lösungsmenge berechnet. Für die Probeserien A, B und C wurde zudem rechnerisch geprüft, ob sich die durch die Tränkung erreichten Eisengehalte von den angestrebten, in den Feldproben ermittelten Gesamteisengehalte der Abstände 5, 15 und 95 mm unterschieden. Die aufgenommene Masse Eisenchlorid der einzelnen Serien konnte aus der Masse der aufgenommenen Lösung sowie der verwendeten Konzentration der Lösung berechnet werden.

In Petrischalen (Durchmesser 145 mm, Höhe 20 mm) wurden heterokaryotische Kulturen von *Fomitopsis pinicola* (Kultur von Sperre Nr. 7, Fruchtkörper Nr. 513) auf 2% Malzextraktagar (vergl. Tabelle 2.2, S. 15) hergestellt und während 10 Tagen bei Raumtemperatur (23°C) inkubiert. In dieser Zeit erreichten die Kulturen einen Durchmesser von rund 8 cm. Nach der Tränkung wurden die Holzproben bei 70°C bis zu einem Wassergehalt von rund 80% getrocknet. Anschliessend wurden alle Proben einzeln auf die Myzelien in den Kulturschalen gelegt und diese mit Parafilm verschlossen. Nach einer Inkubationszeit von 6 Monaten bei Raumtemperatur wurden die Proben nach sorgfältiger Entfernung des Pilzmyzels an der Oberfläche erneut gedarrt und gewogen.

Von jeder Probe wurde der Masseverlust nach folgender Formel berechnet:

$$MV = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \cdot 100$$

wobei

$$P_0 = m_0 + m_L$$

MV: Masseverlust der Proben
P_0: Gewicht der Probe vor dem Abbauversuch [g]
P_1: Gewicht der Probe nach dem Abbauversuch [g]
m_0: Trockenmasse der Probe vor dem Abbauversuch [g]
m_L: Aufgenommene Masse $FeCl_3$ [g]

Von jeder Probeserie wurden Median und Streuung des Masseverlusts bestimmt (Tukey 1977). Zudem wurde folgende Nullhypothese geprüft: H_0: *Die Verteilungen des Masseverlusts der Proben aller Serien unterscheiden sich nicht.* Diese Hypothese wurde mit einem Kruskal-Wallis-Test ($p < 0.05$) geprüft, welcher für mehrere Stichproben angewendet werden kann und keine normalverteilten Daten voraussetzt (Stahel 2000). Falls H_0 verworfen wird, können die einzelnen Serien in Ergänzung zum Kruskal-Wallis-Test paarweise auf signifikante Unterschiede geprüft werden (Conover 1999).

5.3 Resultate

5.3.1 Eisengehalt im Holz in Funktion des Abstands zum Nagel

EDX-Analyse

Die EDX- Messungen zeigten schon im Abstand von wenigen Millimetern von der Nageloberfläche eine starke Abnahme des Eisengehalts im Holz (Verhältnis der Net-Counts von Eisen und Kohlenstoff). In Faserrichtung traten im Abstand von 0 bis 20 mm zwischen den einzelnen Serien grosse Unterschiede auf (Abbildung 5.7a). Ab rund 20 mm näherten sich die Werte aller Messreihen an. Bei einer Serie lag der Eisengehalt auch im Abstand von rund 100 mm über der Nachweisgrenze. Die Serien quer zur Faser zeigten eine ähnliche Verteilung der Messwerte, wenn auch auf deutlich tieferem Niveau (Abbildung 5.7b). Bei den 25 Kontrollmessungen wurde die Nachweisgrenze nur in 2 Fällen überschritten, wobei das Verhältnis Fe/C nicht grösser als 0.01 war. Die Daten aller Messungen sind in Anhang VI(1) zusammengestellt.

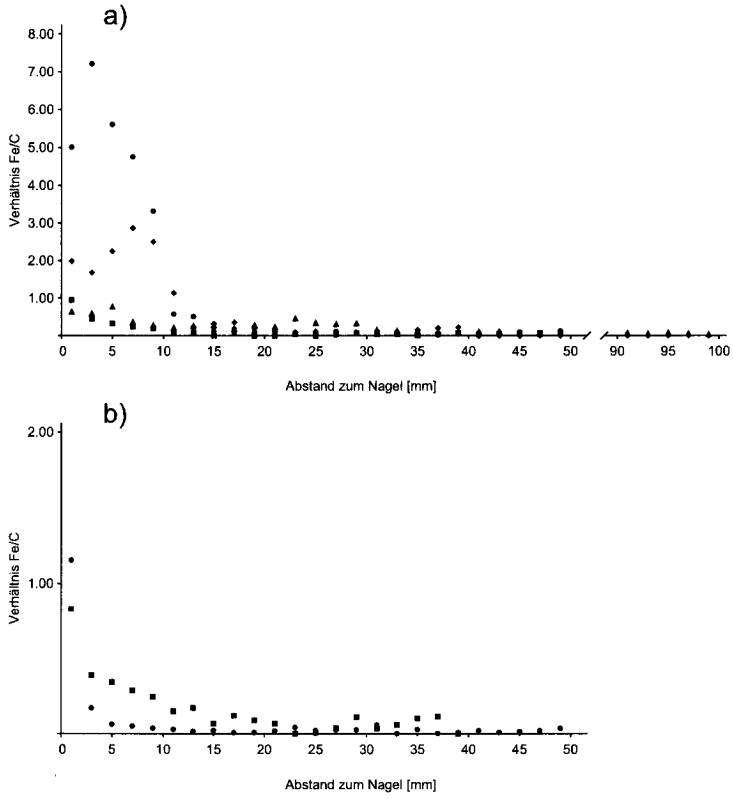


Abbildung 5.7: Eisengehalt des Holzes in Funktion des Abstands zum Nagel aus der EDX-Analyse (Verhältnis der Net-Counts Eisen / Kohlenstoff). a) Werte der vier analysierten Serien in Faserrichtung und b) Werte der zwei Serien quer zur Faser. Unterschiedliche Signaturen bezeichnen die Messwerte der einzelnen Serien.

AES-Analyse

Die aus den AES-Analyse resultierenden Konzentrationen des Eisens im Holz bestätigten die nach der EDX-Analyse vermutete Verteilung. Die maximale Konzentration wurde bei allen Serien im Abstand von 5 mm vom Nagel (Probenmitte) gemessen. Die Eisengehalte variierten in diesem Abstand zwischen rund 0.5 und 6% des Trockengewichtes mit einem Median bei 1.9%. In grösserem Abstand zum Nagel nahm der Eisengehalt rasch ab, wobei auch im Abstand von mehreren Zentimetern in Faserrichtung noch Eisen nachweisbar war (Abbildung 5.8a). Abbildung 5.8b zeigt die analog zur EDX-Analyse wesentlich raschere Abnahme des Eisengehaltes quer zur Faser (Abbildung 5.8b). Die Analyse der Kontrollproben ergab Gehalte von rund 10 ppm, welche mit Werten aus der Literatur korrespondieren (Young & Guinn 1966). Die Daten der Messungen finden sich in Anhang VI(2).

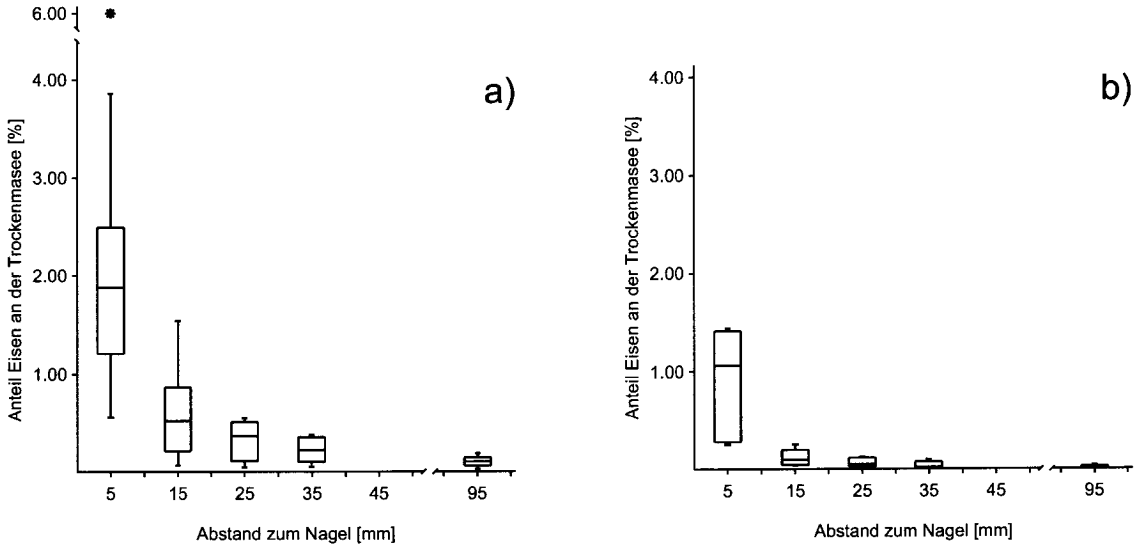


Abbildung 5.8: Eisengehalt des Holzes in Funktion des Abstandes zum Nagel aus der AES-Analyse. a) Parallel zur Faser; b) Quer zur Faser. In der Darstellung sind die Werte der 10 (a) bzw. 7 (b) Probeserien pro Abstand in Boxplots zusammengefasst (Tukey 1977).

5.3.2 Holzabbau *in vitro* in Abhängigkeit vom Eisengehalt

Die durch eine Tränkung während 88 Stunden erreichten Eisengehalte im Holz der Proben (80·80·10 mm) sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Die Eisengehalte der Probeserien A, B, und C unterschieden sich nicht signifikant von denjenigen der im Feld gemessenen Gesamteisengehalte der Abstände 5, 15 und 95 mm in Faserrichtung (Wilcoxon-Test, $p > 0.05$). Die mittleren Werte aller Parameter der Probeserien sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Der Masseverlust der Holzproben 6 Monate nach der Inokulation mit *Fomitopsis pinicola* war in den einzelnen Serien sehr unterschiedlich (Abbildung 5.10 und Anhang VI(3)). In den Serien A (Eisengehalt ≅ 2% des Probengewichts P_0) und B (Eisengehalt ≅ 0.5%) erfolgte mit einer Ausnahme in der Serie B praktisch kein Holzabbau. Die höchste Abbaurate (Median des Masseverlustes = 20.5%) wurde bei einem Eisengehalt von 0.11% in der Serie C festgestellt. Sowohl für alle Serien als auch für die Serien C bis E (bei welchen ein deutlicher Abbau durch den Testpilz erfolgte) ergab sich ein signifikanter Einfluss der Eisenkonzentration auf den

Masseverlust (Kruskal-Wallis-Test, $p < 0.05$). Der paarweise Ergänzungstest nach Conover (1999) zwischen den Serien C, D und E ergab einen signifikanten Unterschied zwischen C (k = 0.11%) und D (k = 0. 01%) sowie zwischen C und der Kontrollserie E. Letztere wies eine etwas geringere, aber nicht signifikant tiefere Abbaurate auf als die Serie D.

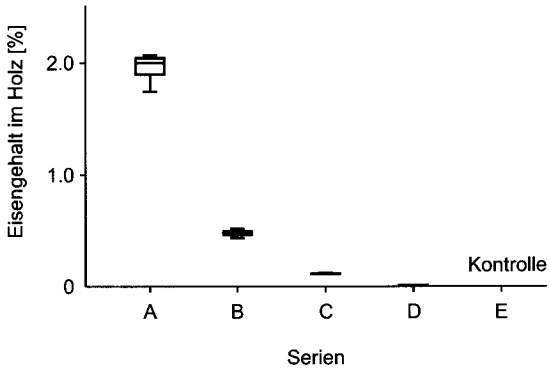


Abbildung 5.9: Eisengehalte der Proben des Abbauexperiments, berechnet aus der aufgenommenen Lösungsmenge und der Konzentration der Tränklösungen (vergl. Tabelle 5.1).

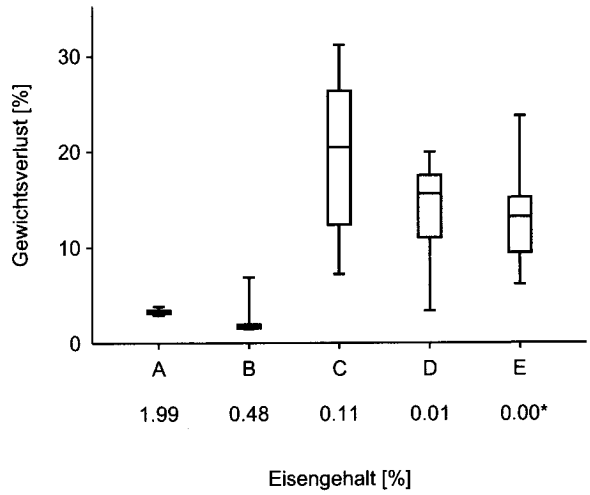


Abbildung 5.10: Masseverlust der Proben in % der Trockenmasse. Jeder Boxplot gibt die Verteilung der Werte einer Probeserie wieder. *) Die Tränklösung der Kontrollserie E enthielt kein Eisenchlorid.

Tabelle 5.1: Resultate des Abbauversuchs. Alle Werte aus der Konzentrationen c sind Mediane der entsprechenden Serien. c: Konzentration der hergestellten $FeCl_3$-Lösung [mol/l]; u: Aufgenommene Lösungsmenge in % des Trockengewichtes der Proben; k: Im Experiment erzeugter Eisengehalt der Proben [%]; MV: Masseverlust der Proben in % des Probengewichts (Trockengewicht der Proben + aufgenommene Masse $FeCl_3$).

Serie	c	u	k	MV
A	0.20	188.09	1.99	3.33
B	0.05	172.40	0.48	1.79
C	0.01	202.34	0.11	20.48
D	0.001	196.08	0.01	15.60
E	0.00	-	-	13.20

5.4 Diskussion

5.4.1 Eisengehalt des Holzes im Bereich von Verbindungsnägeln

Aus den Ergebnissen der Holzanalysen an 15 Jahre alten Wildbachsperren geht hervor, dass sich im Bereich von Verbindungsnägeln Eisen bis in eine Entfernung von mehreren Zentimetern verlagern kann. Die in einer Entfernung von rund 10 cm längs zur Faser gemessenen mittleren Eisengehalte von rund 0.1% der Trockenmasse lagen noch um rund einen Faktor 100 über den Werten der Kontrollproben. Der Einflussbereich eines Nagels auf den Eisengehalt im Holz dürfte deshalb in Faserrichtung noch grösser sein als 10 cm. Da bei Holzkonstruktionen im Bachverbau meist maximale Abstände von rund 1.5 m zwischen den Nägeln eingehalten werden (vergleiche Untersuchungsobjekte in Anhang II), ist im Laufe der Zeit für die gesamten verbauten Rundhölzer ein Eisengehalt zu erwarten, welcher über dem natürlichen Eisengehalt von Fichtenholz liegt.

Die 10 untersuchten Rundhölzer wiesen insbesondere im Abstand von wenigen Millimetern zum Nagel eine grosse Streuung des Eisengehaltes auf. Die beobachteten Extremwerte unterschieden sich dabei um den Faktor 10 (vergl. Anhang VI(2)). Da von jedem Rundholz nur je eine Probeserie hergestellt wurde, kann über die Variabilität der Eisenverlagerung entlang eines Nagelschaftes keine Aussage gemacht werden. Die unregelmässigen Verfärbungen lassen jedoch auch für den einzelnen Nagel lokale Unterschiede vermuten (vergl. Abbildung 5.3).

Die Gründe für diese grosse Variabilität der Eisenverlagerung sind zunächst im Korrosionsprozess der Nägel zu suchen. Die Korrosionsgeschwindigkeit und somit die Menge abgetragenen Eisens ist bei gegebenem Metallwerkstoff primär von der Zusammensetzung des Elektrolyten – im vorliegenden Fall der im Wasser gelösten Ionen im Holz – abhängig (Wranglén 1985). Die elektrochemische Korrosion in wässerigen Lösungen wird generell durch einen tiefen pH-Wert (Wasserstoffkorrosion) sowie durch eine hohe Diffusionsrate von gelöstem Sauerstoff (Sauerstoffkorrosion) beschleunigt (Tostmann 2001). Die vorherrschende Korrosionsform an ins Holz geschlagenen Nägeln ist die Spaltkorrosion (Baker 1974). Bei dieser treten im Spalt (zwischen Holz und Nageloberfläche) erhöhte Elektrolytkonzentrationen auf, was die Korrosionsreaktion ebenfalls beschleunigt. Durch eine variable Spaltgeometrie ergeben sich entlang des Nagelschaftes bezüglich pH-Wert, Elektrolytkonzentration und Sauerstoffzufuhr unterschiedliche Bedingungen. Dies führt zur beobachteten ungleichmässigen Korrosion. Der inhomogene Aufbau von Holz könnte die Korrosionsbedingungen innerhalb eines Balkens sowie bei verschiedenen Balken zusätzlich beeinflussen.

Ein zweiter Grund für die festgestellte Streuung liegt darin, dass die in der Korrosionsreaktion (vergl. Kapitel 5.1) freigesetzten Fe^{2+}-Ionen je nach pH und Konzentration des Elektrolyten in Lösung bleiben, als Eisenhydroxide ausgefällt werden oder sich als (Hydr)oxidschicht auf der Metalloberfläche und an Zellwänden anlagern. Die Elektrolytverhältnisse bedingen also auch die spezifische "Transportfähigkeit" der Korrosionsprodukte.

Eine weitere Ursache für eine unregelmässige Eisenverlagerung stellt die durch Wuchsmerkmale sowie durch Holzverletzungen beim Vernageln beeinflusste Durchlässigkeit des Holzkörpers dar. Die grossen Differenzen der Eisengehalte zwischen den Serien parallel und quer zur Faser sind wahrscheinlich durch die grössere Diffusionsrate in Faserrichtung (Siau 1984) sowie durch nur in der Längsrichtung auftretende Risse beim Einschlagen der Nägel bedingt.

Ein vierter Grund für eine unregelmässige Verlagerung des Eisens sind wahrscheinlich auch unterschiedliche Zyklen der Befeuchtung und Austrocknung des Holzes. Wenn Holz – beispielsweise nach Regen oder Hochwasser – eine Holzfeuchte über der Fasersättigung aufweist, verdunstet beim Austrocknen zunächst freies Wasser in den Zellen (Bosshard 1974a). Dieser Vorgang beruht auf kapillarem Wasserfluss, welcher um ein Vielfaches grösserer ist als die Diffusionsrate allein (Siau 1984). Die einzelnen untersuchten Rundhölzer waren wahrscheinlich unterschiedlichen Feuchtebedingungen ausgesetzt, weshalb auch dieser Faktor massgeblich zur variablen Verlagerung der Korrosionsprodukte beigetragen haben dürfte.

Die genannten Faktoren, welche die Eisenverlagerung im Holz beeinflussen, sind zudem voneinander abhängig. So kann beispielsweise eine lokal erhöhte Durchlässigkeit des Holzes zu einer verstärkten Korrosion führen. Dies wurde an mit Nägeln verbundenen Holzbalken beobachtet, bei denen entlang der Kontaktflächen der Balken eine grössere Durchlässigkeit vorlag (Kubler 1992). Die genannten Faktoren stehen zudem in Wechselwirkung mit dem Vorhandensein holzzerstörender Pilze und anderer Mikroorganismen im Holz. Die Erhöhung der Porosität des Holzes durch Pilze sowie die Freisetzung von organischen Säuren und Siderophoren seien hier als mögliche Einflussfaktoren auf den Korrosionsprozess und die Zusammensetzung der Korrosionsprodukte angeführt. Bakterienbeläge können zudem die Korrosion auf Metalloberflächen beschleunigen (Ehlert 1967, Tostmann 2001). Die Variabilität des Eisengehaltes ist somit das Ergebnis verschiedener Prozesse und Einflussgrössen.

5.4.2 Wirkung von Eisen auf *Fomitopsis pinicola*

Die im Abbauexperiment festgestellten Masseverluste waren im Vergleich zu früheren Studien eher gering, wobei für *Fomitopsis pinicola* eine grosse Variabilität zwischen einzelnen Isolaten bekannt ist. In Abbauversuchen wurden schon nach drei Monaten Masseverluste von 70% (an *Pinus sylvestris*, Srebotnik & Messner 1991) oder 30% (an *Picea abies*, Schwarze 1995) festgestellt. Andere Autoren berichten jedoch von Abbauraten von nur 2% in 8 Monaten (an *Picea rubens*, Ostrofsky *et al.* 1997). Der eher geringe Abbau könnte einerseits durch den nicht optimalen Gasaustausch in den Petrischalen bedingt sein. Andererseits stand den Kulturen auf Malzextraktagar zumindest zu Beginn des Experiments neben den Probehölzern eine weitere Kohlenhydratquelle zur Verfügung. Das Ausbleiben von nennenswerten Masseverlusten in den Serien A und B (Eisengehalt 2 bzw. 0.5%) ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass der Testpilz die Proben dieser Serien nicht vollständig zu besiedeln vermochte (Abbildung 5.11) und im Laufe des Experiments abstarb. Die Kulturen dieser beiden Serien trockneten aus, und eine Reisolation des Testpilzes war nur aus den Serien C bis E möglich.

Im Abbauexperiment wiesen die Proben mit einem mittleren Eisengehalt von 0.11% des Trockengewichts (Serie C) einen signifikant höheren Masseverlust auf als alle übrigen Probeserien. Damit konnte gezeigt werden, dass die Eisenkonzentration zumindest unter Laborbedingungen den Holzabbau durch *Fomitopsis pinicola* beeinflusst. Dieser Braunfäuleerreger vermochte das in Wasser gelöste Eisen(III)chlorid offenbar zu nutzen und das Holz der Proben rascher abzubauen, als wenn kein Eisenchlorid zugegeben wurde. In welcher Art und Weise sich der erhöhte Eisengehalt auf den Abbauprozess auswirkte, kann aus dem Versuch nicht mit Sicherheit abgeleitet werden. In Laborversuchen konnte *F. pinicola* jedoch kristalline Zellulose nicht abbauen (Danninger 1980). Der Braunfäuleerreger *Postia placenta* konnte im Versuch mit Fe^{++}/H_2O_2 vorbehandeltes Sägemehl schneller abbauen als unbehandeltes

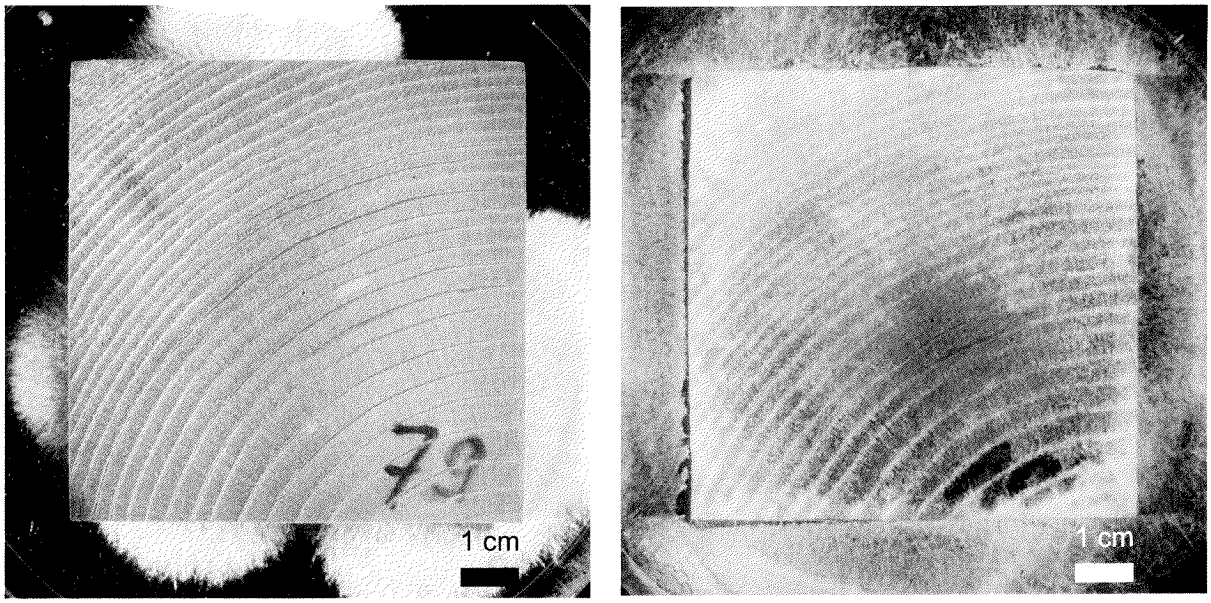


Abbildung 5.11: Mit Eisenlösungen durchtränkte Holzproben nach 6 Monaten Inkubationszeit. Links: Probe aus Serie A (Konz. der Eisenlösung 0.2 mol/l, Nr. 79, Masseverlust 2.20%. Auf der Probe ist kein Myzelwachstum erkennbar, und der Testpilz stellte sein Wachstum im Verlauf des Versuchs auch auf dem Agarmedium ein; Rechts: Probe aus Serie C (Konz. der Eisenlösung 0.01 mol/l, Probe Nr. 100, Masseverlust 29.84%), vollständig von Myzel überwachsen.

(Ritschkoff 1996). Deshalb erscheint es plausibel, dass sich das Eisen günstig auf die in Kapitel 5.1 beschriebene nichtenzymatische Spaltung des Lignozellulosekomplexes des Holzes auswirkt. Welche Mechanismen im Falle von *F. pinicola* dabei bei der Reduktion des dreiwertigen Eisens in seine zweiwertige Form massgebend werden, bleibt als Forschungsfrage bestehen.

Die im Experiment erzeugten Eisengehalte der Holzproben (Serien A bis C) unterschieden sich nicht signifikant von den mittleren Eisengehalten der Feldmessungen in den Abständen 5, 15 und 95 mm von einem Stahlnagel. Die Eisengehalte der Feldproben konnten also im Experiment ziemlich genau nachgebildet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Laborexperiment der entsprechende Eisengehalt mit einer $FeCl_3$-Lösung erzeugt, an den Feldproben jedoch der *Gesamtgehalt* an Eisen bestimmt wurde. Das Eisen lag also in den Laborversuchen zumindest am Anfang des Experiments gelöst und in dreiwertiger Form vor. Entlang eines Nagels im Holz führen die in Kapitel 5.4.1 dargestellten Prozesse jedoch zu verschiedenen Korrosionsprodukten, welche vom Pilz verfügbar gemacht werden müssen. Aus diesem Grund ist eine direkte Übertragung der Laborresultate auf Rundhölzer im Freien schwierig.

Unter diesem Gesichtspunkt muss auch der ausgebliebene Abbau der Serien A und B (Eisengehalte rund 2 bzw. 0.5%) gesehen werden. Die im Experiment erzeugten Eisengehalte wirkten wahrscheinlich toxisch (Guerinot 1994, Jellison *et al.* 1997b). Vergleichbare Eisenkonzentrationen zeigten auch auf andere Fäuleerreger eine hemmende Wirkung (Negrutskiy *et al.* 1998). Der an den Proben aus Rundhölzern gemessene Gesamteisengehalt enthält jedoch auch Korrosionsprodukte im Holz (z.B. Rost), deren Verfügbarkeit für *F. pinicola* nicht vorausgesagt werden kann und die somit auch nicht *a priori* hemmend wirken müssen. Deshalb ist auch der Schluss auf toxische Verhältnisse nahe beim Nagel nicht ohne weiteres möglich.

Lundborg (1988) stellte fest, dass *Fomitopsis pinicola* zumindest unter Laborbedingungen Fe^{3+} aus einer $FeCl_3$-Lösung zu Fe^{2+} zu reduzieren vermag. Indem aus dem Korrosionsprozess wie

gesagt beide Formen von Eisen vorliegen können, lassen die Resultate des Versuchs auf eine Verwertbarkeit von Korrosionsprodukten durch *F. pinicola* schliessen. Hierzu muss jedoch ein experimenteller Nachweis noch erbracht werden.

Der Einfluss der Azidität der Holzproben auf den Holzabbau kann nur aufgrund der pH-Werte der $FeCl_3$-Lösungen abgeschätzt werden. Diese lagen zwischen 2.5 (Serie A) und 4 (Serie D). Welcher pH sich im Holz einstellte, wurde in vorliegender Studie nicht ermittelt. Verschiedene Braunfäuleerreger können den pH ihres Substrats im Verlaufe des Abbaus regulieren (Rypácek & Jahn 1966). Hintikka (1969) fand für *F. pinicola* normales Wachstum bis zu einem pH des Kulturmediums von 3.8. Dass Braunfäuleerreger den pH ihres Substrates stark absenken können, ist beispielsweise aus Studien mit *Gloeophyllum trabeum* und *Coniophora puteana* bekannt, welche im Versuch den pH-Wert des Mediums auf 3.5 bis 2.4 reduzierten (Hyde & Wood 1997, Jellison *et al.* 1997a). Dass der pH allein für den nicht erfolgten Abbau in den Serien A und B verantwortlich ist, scheint deshalb unwahrscheinlich. Bei Spaltkorrosion, wurden in der stagnierenden Elektrolytlösung pH Werte von 2 bis 3 festgestellt (Fontana & Greene 1978). Die pH-Werte, welche sich in den Probehölzern des Experimentes einstellten, liegen deshalb wohl nicht sehr weit von jenen entlang eines Nagelschaftes im Holz entfernt.

5.5 Folgerungen und Ausblick

Die Resultate der Studie zeigen, dass Eisen zumindest unter Laborbedingungen den Holzabbau von Fichtenholz durch *Fomitopsis pinicola* beeinflusst. Eine geeignete Konzentration dreiwertiger Eisenionen in Holzproben führte zu einem verstärkten Holzabbau. Zudem konnte gezeigt werden, dass Nägel im Holz von Wildbachsperren den Eisengehalt des Holzes bis in einen Abstand von mehreren Zentimetern deutlich anheben.

Ob dieses freigesetzte Eisen aus Verbindungsnägeln zu einem erhöhten Abbau durch *F. pinicola* führen kann und in welchem Abstand vom Nagel das Eisen in geeigneter Form und Konzentration vorliegt, kann aus den Versuchen nicht abgeleitet werden. In Anbetracht der Häufigkeit von *F. pinicola* an Bachsperren und seiner Bedeutung für die Holzzerstörung an den Bauwerken (vergl. Kapitel 3) sollte jedoch diese Frage in weiteren Studien geklärt werden. Zunächst wäre zu prüfen, ob Korrosionsprodukte von Stahl eine ähnliche Wirkung auf den Holzabbau durch Pilze zeigen wie die verwendete Eisen(III)chlorid-Lösung. Anschliessend könnte an neuen Bachsperren im Sinne eines Monitorings die Auswirkung der Nägel auf die Fäuleentwicklung im Feld untersucht werden. Dabei sollte auch die zeitliche Entwicklung sowie der Einfluss verschiedener Nagelsorten (z.B. rostfreie Stähle) berücksichtigt werden. Die chemische Zersetzung des Holzes durch Korrosionsprodukte entlang des Nagels (Marian & Wissing 1960b) könnte jedoch den Holzabbau durch Pilze überlagern, was die Interpretation derartiger Experimente erschwert.

In der vorliegenden Studie wurden zur Messung der Eisengehalte im Holz bewusst Rundhölzer gewählt, welche von Sperrenflügeln stammten. Diese Elemente sind einer erhöhten Gefährdung durch holzzerstörende Pilze ausgesetzt (vergl. Kapitel 3.4.3). Von den Ergebnissen dieser Untersuchungen kann deshalb nicht ohne weiteres auf die Wirkung von Stahlnägeln in Rundhölzern anderer Bauteile (Teile unter dem Wasserstrahl, Einbindungen in der Erde) geschlossen werden, wo andere Korrosions- und Verlagerungsverhältnisse des Eisens vorkommen können. Die Verteilung von Eisen aus Verbindungsnägeln in dauernd wassergesättigten Rundhölzern sollte ebenfalls untersucht werden. Da jedoch in diesen Bereichen wahrscheinlich

der Sauerstoffgehalt für die meisten Fäuleerreger limitierend wirkt, scheinen diese Bauteile im Bezug auf die Ausgangsfragestellung eher von untergeordneter Bedeutung.

Yang (2001) schlägt zur Vermeidung von Fäulnis im Bereich von Stahlnägeln im Holz eine Versiegelung der Nagellöchern mit chemischen Holzschutzmitteln vor. Dieses Vorgehen ist aus Umweltschutzgründen im Wildbachverbau nicht zu empfehlen. Aufgrund der vorliegenden Resultate erscheint es angebracht, die Verlagerung der Korrosionsprodukte in axialer Richtung des Rundholzes – in welcher Form auch immer sie vorliegen – so weit wie möglich zu hemmen, um den Bereich, in welchem kritische Eisengehalte auftreten können, zu minimieren. Diesbezüglich scheint die Vermeidung von Holzverletzungen, wie sie durch das Vorbohren und Zuspitzen der Nägel erreicht wird (Rickli 1997, Böll *et al.* 1999) eine sinnvolle Massnahme. Wenn auch die Spaltkorrosion entlang des Nagelschafts nicht vermieden werden kann, so wirkt eine mehr oder weniger intakte Oberfläche im Bohrloch (entlang des Nagelschaftes) wahrscheinlich einer Verlagerung von Eisen in Faserrichtung des Holzes entgegen. Durch die Verwendung von Nägel mit Köpfen wurde versucht, das Eindringen von Wasser ins Nagelloch zu verringern (F. Florineth, pers. Mitteilung; vergl. Abbildung A.3 in Anhang VII). Die Wirkung dieser Massnahme auf die Korrosion der Nägel und die Eisenverlagerung bleibt jedoch zu untersuchen.

Das ebenfalls empfohlene stumpfe Einschlagen der Nägel ohne Vorbohren (Pagnoncini 1988) verhindert zwar ein Aufspalten von schlagfrischen Rundhölzern. Die dabei auftretenden Faserquetschungen am Nagelloch (Böll *et al.* 1999), könnten jedoch die Verlagerung von Korrosionsprodukten ins Holz fördern. Ob stärkere Verletzungen des Holzkörpers tatsächlich zu einer intensiveren Eisenverlagerung führen, muss aber durch weitere Untersuchungen bestätigt werden.

6 Tragsicherheit von Holzkonstruktionen im Wildbachverbau

Ein Fallbeispiel 60 jähriger Wildbachsperren

Konrad Philipp Noetzli, Martin Frei, Albert Böll
Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Abteilung Wasser-, Erd- und Felsbewegungen

Publiziert in: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 153(10), S. 377-384 (peer reviewed)

Abstract

Holz ist ein wertvoller Werkstoff für Verbaumassnahmen in Wildbachgerinnen. Durch biologische Abbauprozesse wird jedoch seine Festigkeit im Laufe der Zeit vermindert. In einer Fallstudie wurden die Rundhölzer von drei um 1940 gebauten Wildbachsperren am Verbauungsort einzeln auf Biegung bis zum Bruch belastet. Zwei Drittel der geprüften Rundhölzer wiesen 60 Jahre nach dem Einbau immer noch ein höheres Bruchmoment auf, als bei der Bemessung vorausgesetzt wird, wobei die mittlere Sicherheitsreserve bezüglich den Bemessungswerten 1.2 betrug. Der Einfluss der Versuchsbedingungen sowie das statische System werden diskutiert.

6.1 Einleitung

Holz hat als Werkstoff im Wildbachverbau eine lange Tradition. Es wird heute hauptsächlich für Werke in kleineren Gerinnen mit geringer Geschiebeführung eingesetzt (Böll *et al.* 1999). Gegenüber anderen Baustoffen wie Beton oder Stahl bietet Holz verschiedene Vorteile. Einerseits kann es meist in der Nähe des Verbauungsortes bereitgestellt werden, andererseits ist es relativ kostengünstig, einfach zu bearbeiten und weist bei geringem Gewicht eine hohe Festigkeit auf (Reinhardt 1973). Dadurch lässt sich Holz auch in wenig tragfähigen Böden als Baustoff verwenden, wo Betonsperren aufwendig fundiert werden müssen. Zudem sind Holzkonstruktionen im Vergleich zu Werken aus Beton gegenüber Deformationen bei Bodenbewegungen relativ unempfindlich, was bei instabilem Gelände ein entscheidender Vorteil sein kann (Zeller & Röthlisberger 1987, Böll 1988).

Unbehandeltes Holz unterliegt im Freien dem natürlichen Abbau durch Pilze und andere Mikroorganismen (Rypácek & Jahn 1966, Rayner & Boddy 1988, Zabel & Morrell 1992, Highley 1995). Holz mit ständigem Erd- und Wasserkontakt gilt als besonders gefährdet (Highley 1984a, Graf 1997a). Derartige Bedingungen sind jedoch für Holz als Werkstoff im Wildbachverbau typisch. Daraus ergibt sich die Frage, wie sich die Tragsicherheit der Sperren langfristig entwickelt. Bisherige Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Wildbachsperren basierten auf einer optischen Beurteilung der Funktionstauglichkeit und des Vermorschungsgrades der Bauwerke (Zeller & Röthlisberger 1987). Die aktuelle Holzfestigkeit der verbauten Rundhölzer blieb dabei eine unbekannte Grösse. Für die Tragsicherheit der Werke ist jedoch die Veränderung der Festigkeit des verbauten Holzes unter den spezifischen Bedingungen in Wildbachgerinnen von zentraler Bedeutung. Nur die Kenntnis dieser Entwicklung ermöglicht letztlich Aussagen über die langfristig zu erwartende Tragsicherheit von Holzkonstruktionen im Wildbachverbau.

Erste Biegebruchversuche an einer rund 60 Jahre alten Sperre ergaben relativ hohe Bruchwerte der verbauten Rundhölzer (Frei & Böll 2001). Ziel der vorliegenden Arbeit war es, in einer grösser angelegten Untersuchung Anhaltspunkte über den Tragwiderstand von Rundhölzern zu erhalten, welche vor mehreren Jahrzehnten verbaut wurden.

6.2 Material und Methoden

6.2.1 Untersuchungsobjekte

Die Untersuchung wurde in einem vollständig beschatteten Gerinne am Westhang des Zimmerbergs durchgeführt (Gemeinde Hirzel ZH). Die einwandigen Wildbachsperren aus Fichten- und Tannenholz waren gemäss Angaben des lokalen Forstdienstes zwischen 1939 und 1945 erstellt worden. Der Forstdienst schätzte zum Zeitpunkt der Untersuchung im Herbst 2000 die ganze Verbauung als sanierungsbedürftig ein, und es war geplant, sie im Jahr 2001 zu ersetzen. Für die Untersuchung wurden drei Sperren auf rund 650 m ü. M. ausgewählt (Abbildung 6.1)

Abbildung 6.1: Die untersuchten einwandigen Wildbachsperren waren in einem erneuerungsbedürftigen Zustand; die Sperrenflügel fehlten. Im Vordergrund die Sperre Nr. 1. Die aus der Sicht des Betrachters linke Einbindung wurde beim Bau mit Blocksteinen verstärkt.

6.2.2 Nachweis der Tragsicherheit

Wildbachsperren aus Holz sind grundsätzlich auf die gleichen Einwirkungen wie Bachsperren aus Stahlbeton zu bemessen (ASF 1973, Böll 1997). Der Nachweis der Tragsicherheit erfolgt dabei üblicherweise nach der Schweizerischen Holzbaunorm SIA 164 (1992). Die Bemessung des einzelnen Rundholzes basiert auf einer Leiteinwirkung, welche aus dem hydrostatischen Wasserdruck bei einem vollständigen Einstau der nicht hinterfüllten Sperre resultiert (Abbildung 6.2a). Bei steiler Hinterfüllung (z.B. bei Runsensperren) muss auch der Erddruck in die Berechnung einbezogen werden (Böll 1997).

Das statische System für ein verbautes Rundholz entspricht in erster Näherung einem einfachen Balken (Abbildung 6.2b). Die ideellen Auflager werden in halber Einbindungstiefe angenommen. Aus diesem statischen Modell resultiert ein maximales Biegemoment $M_{max} = q \cdot L^2/8$ in Balkenmitte, wobei q die aus dem hydrostatischen Wasserdruck resultierende Linienlast und L die Länge des Rundholzes zwischen den ideellen Auflagern ist.

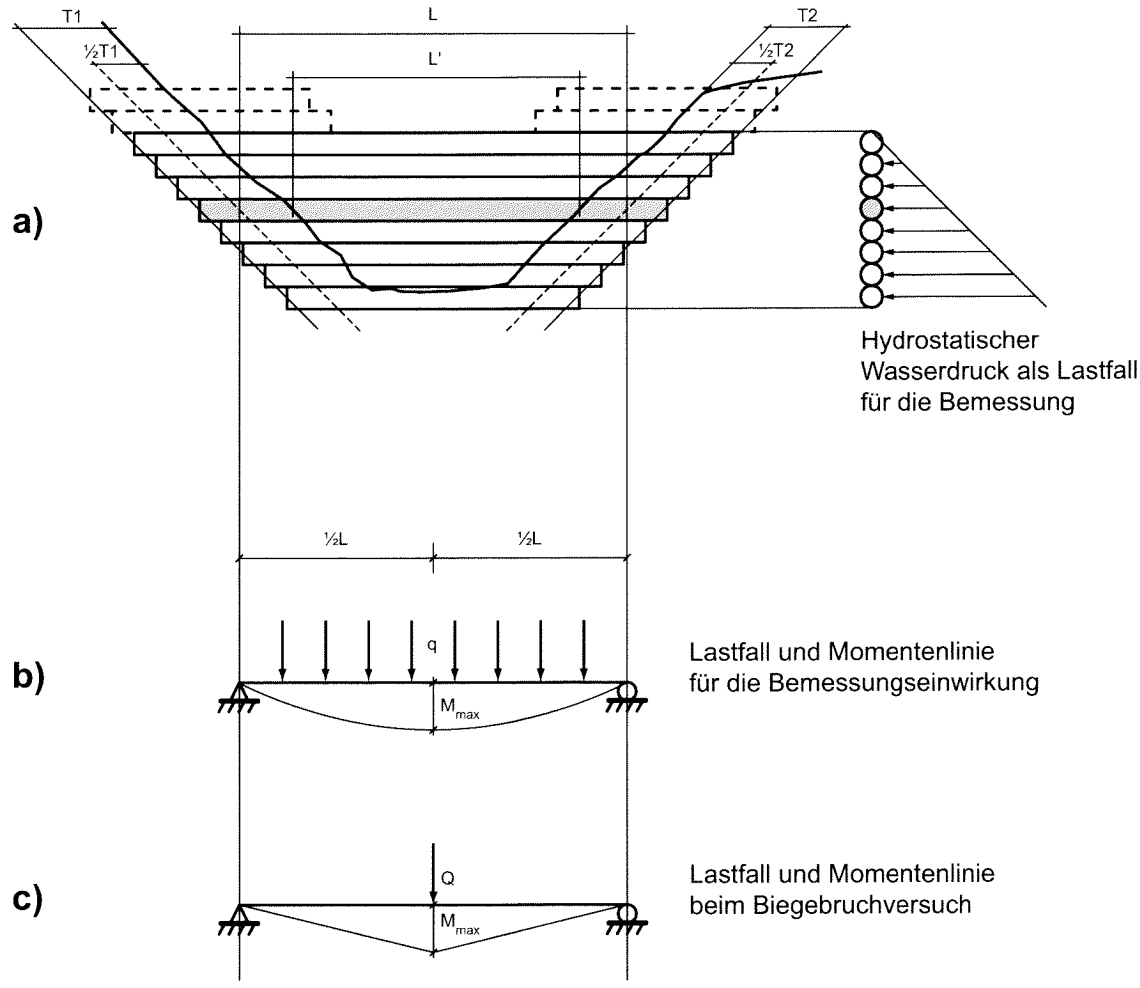


Abbildung 6.2:

a) Schematische Darstellung der untersuchten Sperren. Bei der Bemessung wird als Einwirkung der hydrostatische Wasserdruck bei vollständigem Einstau ohne Hinterfüllung angenommen.

b) Aus dem hydrostatischen Wasserdruck resultiert für jedes Rundholz eine Linienlast q. Das maximale Biegemoment M_{max} tritt in der Mitte des Balkens auf.

c) Das beim Versuch in Balkenmitte angebrachte Drahtseil erzeugt eine dreiecksförmige Momentenlinie. Das maximale Biegemoment M_{max} tritt ebenfalls in der Balkenmitte auf.

Die verbauten Rundhölzer werden normalerweise gemäss Elastizitätstheorie auf Biegung bemessen. Dabei wird in Anlehnung an die Norm SIA 164 (1992) nach dem Konzept der zulässigen Spannungen folgender Nachweis erbracht:

$$M_{max} \leq M_{zul} = \sigma_{zul} \cdot W_y$$

wobei

$$\sigma_{zul} = \sigma_b \cdot c_D \cdot c_W \cdot c_G$$

M_{max}: maximales Moment aus der Bemessungslast [Nm]
M_{zul}: zulässiges Moment, Bemessungsmoment [Nm]
σ_{zul}: Bemessungsspannung (zulässige) [N/mm²]
W_y: Widerstandsmoment des Querschnitts beim Rundholz: $d^3 \cdot p/32$ [mm³]; d: Durchmesser [mm]
σ_b: Grundwert der zulässigen Spannung [N/mm²]
c_D: Beiwert für die Lastdauer
c_W: Beiwert für die Holzfeuchte
c_G: Geometrisch bedingter Beiwert

Das zulässige Moment M_{zul} liegt dabei weit unter dem effektiven Bruchmoment M_u und beinhaltet die Sicherheiten gegenüber Versagen auf Biegung (vergl. Abbildung 6.6).

6.2.3 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung wurde entsprechend den oben dargestellten Modellvorstellungen gewählt. Zunächst wurden die Verbindungsnägel zwischen den Rundhölzern durchgetrennt, um die Bauteile ohne den Einfluss vertikaler Verbindungen prüfen zu können. Die Einwirkung auf jedes Rundholz wurde mit einem Drahtseil als Einzellast in der Mitte eingeleitet (Abbildung 6.2c). Dadurch ergab sich – analog zum Bemessungsmodell – das maximale Feldmoment in Balkenmitte zu $M_{max} = Q \cdot L/4$. Die Länge L wurde nach der Formel $L = L' + \frac{1}{2}(T1+T2)$ berechnet, wobei die sichtbare Länge L' vor und die horizontalen Einbindetiefen T1 bzw. T2 nach dem Versuch gemessen wurden (vergl. Abbildung 6.2a).

Mit einer traktorbetriebenen Seilwinde wurden die einzelnen Rundhölzer der Sperren auf Biegung bis zum Bruch belastet (Abbildung 6.3). Die Kraft Q wurde mit einer am Zugseil installierten Messdose (Firma Burster 200 kN) in Intervallen von 0.25 Sekunden registriert und in einem Datenlogger (Eigenkonstruktion Eidg. Inst. f. Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos) gespeichert. Mit dieser Anordnung konnten sowohl der Kraftverlauf während der Belastung als auch die Bruchkraft Q_u (Maximalkraft) ermittelt werden (Abbildung 6.4).

Abbildung 6.3: Biegebruchversuch an einer einwandigen Holzsperre. Die Krafteinleitung in Balkenmitte erfolgte mittels einem Drahtseil und einer traktorbetriebenen Winde.

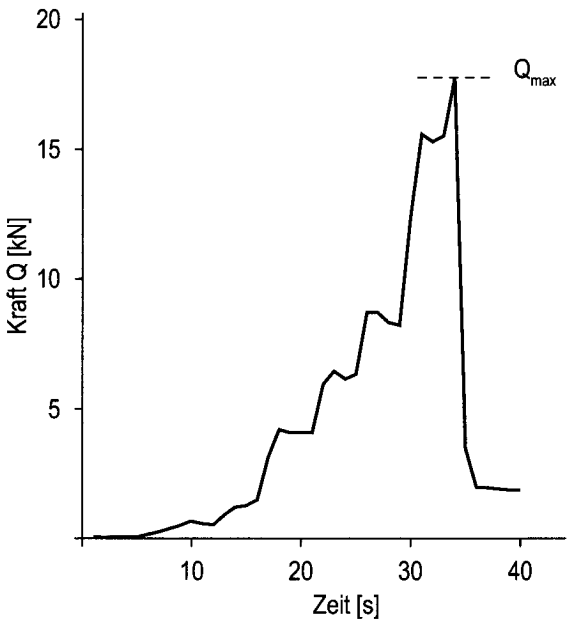


Abbildung 6.4: Beispiel eines Kraftverlaufs: Aufzeichnung der gemessenen Kraft Q in Funktion der Zeit. Die Messung erfolgte mit einer zeitlichen Auflösung von 0.25 s.

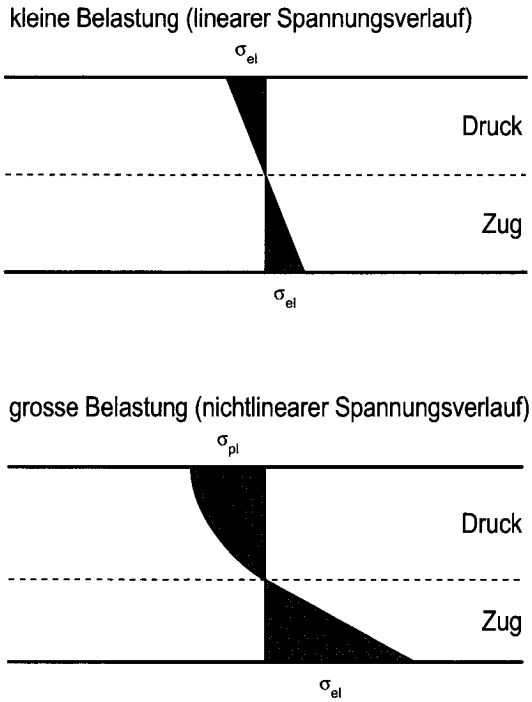


Abbildung 6.5: Spannungsverteilung in einem Holzbalken bei Biegebelastung nach Zakic (1973), verändert. Bei kleiner Belastung ist die Spannungsverteilung linear. Bei grosser Belastung, insbesondere im Bereich der Bruchlast, treten auf der Druckseite plastische Verformungen auf, und die Spannungsverteilung ist nicht mehr linear.

Von jedem Rundholz wurde nach dem Versuch der Durchmesser in der Mitte (an der Stelle L'/2) und die Anzahl der Bruchstellen festgehalten. Es wurde versucht, durch Beobachtung die Reihenfolge der Brüche festzuhalten. Diese folgten jedoch zeitlich so nahe aufeinander, dass sie sich nicht unterscheiden liessen.

6.2.4 Auswertung

Aus der gemessenen Bruchkraft wurde für jedes Rundholz das Bruchmoment M_u berechnet, wobei entsprechend den üblichen vereinfachenden Bemessungsannahmen von frei drehbaren Auflagern ausgegangen wurde. Für die Versuchsanordnung zutreffendere statische Systeme werden weiter unten behandelt. Um das erhaltene Bruchmoment M_u mit den Festigkeitskennwerten nach der Norm SIA 164 (1992) zu vergleichen, müsste nun die Bruchspannung σ_u aus der Gleichung $\sigma_u = M_u/W_y$ berechnet werden.

Dieser Zusammenhang gilt jedoch streng genommen nur bei kleinen Biegebelastungen (Zakic 1973, Steiger 1995). Bei einer Biegebelastung im Bereich der Bruchlast weist Bauholz eine nicht lineare Spannungsverteilung über den Querschnitt auf (Abbildung 6.5). Dies ist durch die geringere Druckfestigkeit des Holzes gegenüber seiner Zugfestigkeit begründet (Niemz 1993). Zudem verhält sich Holz gegenüber Druckbelastungen duktiler als auf Zug. Bei normalem Bauholz tritt der Bruch jedoch trotzdem meist aufgrund von Strukturstörungen auf der Zugseite ein, bevor plastische Verformungen auf der Druckseite eintreten (Steiger 1995). Daraus ergibt sich ein sprödes Versagen von trockenem Holz auf Biegung (Abbildung 6.6a, linke Kurve), und die Gleichung $\sigma_u = M_u/W_y$ ist näherungsweise gültig.

Bei einer hohen Holzfeuchte ist jedoch ähnlich wie bei schlagfrischem Holz (Heiz 2001) ein grosser Anteil an plastischer Verformung der Balken zu erwarten (Abbildung 6.6a, rechte Kurve und Abbildung 6.6b). Dieses Phänomen beruht darauf, dass mit zunehmender Holzfeuchte die Druckfestigkeit deutlich stärker abnimmt als die Zugfestigkeit (Dubas 1981, Madsen 1992). Darrproben von 10 der geprüften Rundhölzer wiesen eine mittlere Holzfeuchte von 170% auf, weshalb der lineare Zusammenhang zwischen Bruchmoment und Bruchspannung kaum gegeben sein dürfte. Aufgrund dieser Unsicherheit bezüglich des plastischen Verhaltens der Rundhölzer unter den realen Einbaubedingungen wurde das nachfolgend beschriebene Vorgehen zur Auswertung verwendet.

Aus dem Grundwert der zulässigen Biegespannung von 7 N/mm^2 für Holz der Festigkeitsklasse III (SIA 164 1992) lässt sich der entsprechende zulässige Biegewiderstand zu $M_{zul} = \sigma_{zul} \cdot W_y$ berechnen, da σ_{zul} in einem Bereich liegt, in welchem eine linear-elastische Spannungsverteilung vorliegt (vergl. Abbildung 6.6a). Um die gemessenen Bruchmomente auch mit einem Materialkennwert auf dem Niveau der Bruchlasten (ohne Sicherheitsbeiwerte) vergleichen zu können, wurde folgender Ansatz gewählt:

Die Norm DIN 1052 (1988) ordnet der Güteklasse III nach DIN 4074-1 (1989) dieselbe zulässige Spannung σ_{zul} von 7 N/mm^2 zu, wie die Norm SIA 164 (1992) der Festigkeitsklasse III. Für die entsprechende tiefste Klassierung (S7) gibt die Norm DIN V ENV (1995) einen charakteristischen Wert der Biegefestigkeit $f_{m,k}$ (5%-fraktile, „rechnerische Biegebruchspannung") von 16 N/mm^2 an. Daraus ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von $f_{m,k}/\sigma_{zul} = 16/7 \approx 2.3$. Mit Hilfe dieses

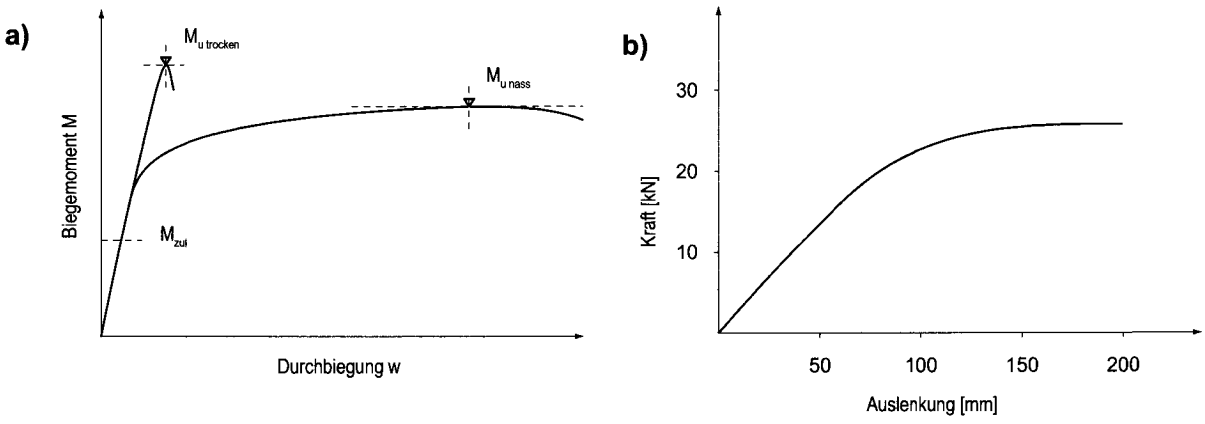


Abbildung 6.6:

a) Schematischer Verlauf des Biegemoments bei der Belastung von Rundhölzern. Linke Kurve: nahezu elastisches Bruchverhalten bei trockenem Bauholz mit normalen Strukturstörungen. Rechte Kurve: Plastische Verformung bei nassem Holz (sowie bei fehlerfreien Kleinproben) unter hoher Biegebelastung. M_u: Bruchmomente, M_{zul}: Zulässiges Moment nach der Norm SIA 164 (1992), welches die Sicherheiten gegenüber Versagen auf Biegung beinhaltet.

b) Verhalten von schlagfrischem Fichtenholz im Biegeversuch (Holzproben der Abmessungen 80·80·1440 mm, Krafteinleitung in Balkenmitte (nach Heiz 2001, verändert). Bei einer Auslenkung von 200 mm wurde der Versuch abgebrochen. Biegeversuche an frisch geschlagenen Rundhölzern zeigten ein analoges Verhalten.

Umrechnungsfaktors wurde für jeden Balken aus dem zulässigen Moment M_{zul} ein rechnerischer Grenzwert für den Biegewiderstand M_R berechnet („rechnerisches Bruchmoment"), welcher dem Biegewiderstand auf dem Niveau der charakteristischen Biegefestigkeit entspricht. Anschliessend erfolgte für jedes Rundholz ein paarweiser Vergleich dieses rechnerischen Grenzwerts des Biegewiderstandes M_R mit dem Bruchmoment M_u, wobei gilt:

$$M_u = Q_u \cdot \frac{L}{4}$$

$$M_R = M_{zul} \cdot 2.3$$

wobei

$$M_{zul} = \sigma_b \cdot c_W \cdot c_D \cdot c_G \cdot W_y$$

Q_u: Gemessene Bruchkraft [N]
L: Rundholzlänge zwischen den ideellen Auflagern [mm]
σ_b: Grundwert der zulässigen Spannung = 7 N/mm²
c_D: Lastdauerbeiwert = 1.30
c_W: Holzfeuchtebeiwert = 0.6
c_G: Geometrisch bedingter Beiwert = 1.0
W_y: Widerstandsmoment des Querschnitts [mm³] = $d^3 \cdot \pi/32$ mm³; d: Durchmesser des Rundholzes [mm]

Die Holzfeuchte von rund 170% liegt weit über dem Fasersättigungspunkt, welcher für Fichte und Tanne bei rund 32% liegt (Kollmann & Schneider 1959, Reinhardt 1973). Dieser hohen Holzfeuchte wurde mit dem Feuchtebeiwert c_W = 0.6 Rechnung getragen. Durch den Lastdauerfaktor c_D von 1.30 wurde die kurze Belastungsdauer des Prüfversuchs berücksichtigt.

Für alle Rundhölzer wurde der Quotient $r = M_u/M_R$ berechnet und geprüft, ob die Bedingung $r = M_u/M_R > 1$ noch erfüllt ist und das Holz somit auch nach 60 Jahren noch die bei einer Bemessung vorausgesetzten Festigkeitswerte aufwies. Zudem wurden die gefundenen Bruchmomente mit den zulässigen Momenten M_{zul} nach der Norm SIA 164 (1992) verglichen.

6.3 Resultate

Insgesamt wurden 14 Rundhölzer geprüft. Es kamen 7 Rundhölzer von der ersten, 4 von der zweiten und 3 von der dritten Sperre zur Auswertung. Die Messresultate finden sich in Tabelle 1.

In Abbildung 6.7 sind die Werte von $r = M_u/M_R$ dargestellt. Der Median der gemessenen Werte lag mit 1.2 signifikant über dem Wert 1 (Wilcoxon-Test, einseitig, $p < 0.05$). Die Bruchmomente von vier Rundhölzern erreichten den rechnerischen Grenzwert des Biegewiderstandes M_R knapp nicht mehr, bei einem Rundholz war dieser Wert deutlich unterschritten. Gegenüber den zulässigen Momenten M_{zul} lag der Median der Bruchmomente M_u ebenfalls signifikant um den Faktor 2.8 höher (Wilcoxon-Test, einseitig, $p < 0.05$).

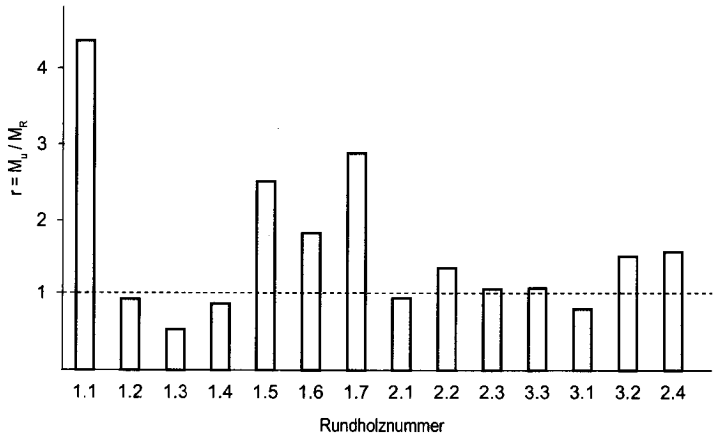


Abbildung 6.7: Darstellung der Quotienten r aus dem Bruchmoment M_u und dem rechnerischen Grenzwert des Biegewiderstands M_R für alle geprüften Rundhölzer. Die Rundholznummer entspricht der Bezeichnung der geprüften Rundhölzer in Tabelle 6.1.

Elf Rundhölzer brachen während der Krafteinleitung sowohl in der Mitte als auch im Bereich der beiden Einbindungen, zwei brachen in der Mitte und an einer Einbindung und eines wies nur in der Mitte eine Bruchstelle auf.

Tabelle 6.1: Messresultate der im Biegebruchversuch geprüften Rundhölzer. T: Mittlere horizontale Einbindungstiefe (= ½(T1+T2)), L: Länge des Balkens für die Momentenrechnung, L': Sichtbare Länge des Rundholzes, d: Durchmesser des Rundholzes in Balkenmitte, Q_u: Bruchkraft, M_u: Bruchmoment, M_{zul}: Zulässiger Biegewiderstand in Anlehnung an die Norm SIA 164 (Holz der Festigkeitsklasse III, σ_{zul} 7 = N/mm²), W_y: Widerstandsmoment des Querschnitts, M_r: Rechnerischer Grenzwert des Biegewiderstands, r: Quotient M_u/M_r, BS: Anzahl Bruchstellen. Lage: Lage der Bruchstellen, m: Mitte; l,r: linke bzw. rechte Einbindung aus Sicht des Betrachters (vergl. Abbildung 1).

Sperre / Rundholz	T [m]	L [m]	L' [m]	d [mm]	Q_u [kN]	M_u [kNm]	M_r [kNm]	M_{zul} [kNm]	r	BS	Lage
1.1	1.33	5.99	4.66	174	18.1	27.1	6.5	2.8	4.20	2	m, l
1.2	1.5	4.65	3.15	168	4.5	5.3	5.8	2.5	0.91	3	m, l, r
1.3	1.22	4.37	3.15	166	3.0	2.8	5.6	2.5	0.53	3	m, l, r
1.4	1.23	4.13	2.90	142	3.0	2.8	3.5	1.5	0.86	3	m, l, r
1.5	1.25	4.62	3.37	220	31.9	30.3	13.1	5.7	2.45	1	m
1.6	1.3	4.20	2.90	158	8.1	8.5	4.8	2.1	1.76	2	m, l
1.7	1.1	3.50	2.40	166	17.8	15.5	5.6	2.5	2.77	3	m, l, r
2.1	0.8	5.10	4.30	184	5.5	7.0	7.6	3.3	0.92	3	m, l, r
2.2	0.95	4.75	3.80	162	5.7	6.8	5.2	2.3	1.31	3	m, l, r
2.3	0.95	4.40	3.45	180	6.7	7.4	7.2	3.1	1.04	3	m, l, r
2.4	0.95	3.95	3.00	204	11.0	10.9	10.4	4.6	1.05	3	m, l, r
3.1	1.2	4.70	3.50	180	4.8	5.6	7.2	3.1	0.78	3	m, l, r
3.2	1.2	4.30	3.10	216	16.7	18.0	12.4	5.4	1.46	3	m, l, r
3.3	1.2	4.10	2.90	206	15.8	16.2	10.7	4.7	1.52	3	m, l, r

6.4 Diskussion

Die Feldversuche ergaben, dass der Median der Bruchmomente M_u der Rundhölzer von ca. 60 Jahre alten Wildbachsperren um einen Faktor 1.2 über dem rechnerischen Grenzwert des Biegewiderstands M_R lag. In der Literatur wird Fichten- und Tannenholz generell als wenig dauerhaft eingestuft (Panshin & Zeeuw 1970, Bosshard 1974a, Kucera & Gfeller 1994) und bei Holz in Erd- und Wasserkontakt von einer besonders kurzen Lebensdauer ausgegangen (Findlay 1962). Die ermittelten Bruchmomente weisen jedoch darauf hin, dass zumindest bei den untersuchten Objekten auch nach mehreren Jahrzehnten noch von einer genügenden Holzfestigkeit ausgegangen werden kann. Bei der Interpretation dieses Resultates ist zu berücksichtigen, dass die durchgeführten Versuche nicht in jeder Hinsicht den bei einer Bemessung verwendeten Modellvorstellungen entsprachen. Im Folgenden werden einige Aspekte diskutiert, welche die Versuchsergebnisse beeinflussen können.

6.4.1 Probenmaterial

Bei den geprüften Balken handelte es sich um Rundhölzer. Die Schweizer Holzbaunorm SIA 164 (1992) macht keinen Unterschied zwischen Schnittholz und Rundholz. Da beim Einschneiden

des Holzes unweigerlich Fasern angeschnitten werden, hat Rundholz bei gleicher Querschnittsfläche meist eine höhere Biegefestigkeit als Kantholz. Eine Studie mit schwedischer Kiefer ergab für Rundholz im Vergleich zu Kanthölzern eine um ca. 25 % höhere Bruchspannung (Thunnel 1957). Die Deutsche Norm DIN 1052 (1988) erlaubt für Rundholz eine Erhöhung der zulässigen Spannung um 20%.

Im Weiteren muss berücksichtigt werden, dass die Festigkeitsklassen der geprüften Rundhölzer nicht bekannt waren, was in der Verbaupraxis die Regel ist. Bei der Bemessung wird aus Sicherheitsüberlegungen die Festigkeitsklasse III (mit einer zulässigen Spannung σ_{zul} von 7 N/mm^2) verwendet. Geht man davon aus, dass die Rundhölzer beim Bau zumindest teilweise der Festigkeitsklasse II angehörten (σ_{zul} = 10 N/mm^2), so werden diese mit einer Bemessung anhand der Festigkeitsklasse III unterschätzt und weisen im Bruchversuch entsprechend hohe Bruchmomente resp. einen hohen Quotienten $r = M_u/M_R$ auf. Dies könnte eine Erklärung für den relativ hohen Quotienten r des Rundholz Nr. 1.1 liefern (vergl. Tabelle 1).

Diese beiden Überlegungen deuten darauf hin, dass einerseits bei der Bemessung von Bachsperren wahrscheinlich von einer höheren zulässigen Biegespannung ausgegangen werden darf als der aus der Holzbaunorm übernommene Grundwert für die Festigkeitsklasse III. Andererseits ist aber bei der Interpretation der im Feldversuch gemessenen Bruchmomente Vorsicht geboten, da die beschriebenen Faktoren, welche bei der Ermittlung des Grenzwerts des rechnerischen Biegewiderstands nicht berücksichtigt wurden, zu einem grösseren Bruchmoment beitragen können.

6.4.2 Statisches System

Die meisten Rundhölzer wiesen neben der Bruchstelle in Balkenmitte noch eine bis zwei weitere Bruchstellen an den seitlichen Einbindungen auf (Tabelle 1). Im Modell des beidseitig frei drehbar gelagerten Balkens gemäss Abbildung 6.2 treten jedoch an den Auflagern keine Biegemomente auf. Das zugrundegelegte statische Modell trifft also zumindest für einige der Rundhölzer nicht genau zu. Dies muss bei der Berechnung des Bruchmoments M_u aus der Bruchkraft Q_u berücksichtigt werden.

Grundsätzlich sind von frei drehbaren Auflagern (Abbildung 6.8a) bis hin zu einer beidseitigen Einspannung (Abbildung 6.8b) alle Fälle denkbar. Für eine gegebene Kraft Q nimmt im elastischen Bereich das maximale Biegemoment ab, je starrer die Rundhölzer im Boden eingebunden sind. Daraus folgt, dass bei der Bemessung unter der Annahme frei drehbarer Lagerungen bezüglich der effektiv auftretenden Spannungen von einem ungünstigeren Fall ausgegangen wird, als in Wirklichkeit zu erwarten ist.

Eine beidseitig (volle) Einspannung (Abbildung 6.8b) kommt aufgrund des tonigen Bodenmaterials kaum in Betracht. Das Auftreten von drei Bruchstellen bei 11 der 14 Rundhölzer (bei praktisch gleichzeitigen Brüchen), weist darauf hin, dass wahrscheinlich teilweise Einspannungen vorlagen. Die Einspannwirkung des Bodenmaterials ist jedoch schwierig abzuschätzen.

Ein Anhaltspunkt für die Grössenordnung der aus den realen Auflagerbedingungen resultierenden Momente ergibt sich aus der Annahme einer einseitigen Einspannung und einem frei drehbaren zweiten Auflager (Abbildung 6.8c). Die Sperre Nr. 1 mit einem Widerlager aus Blocksteinen an der linken Einbindung (vergl. Abbildung 1) könnten diese Verhältnisse näherungsweise zutreffen.

Aus diesen Auflagerbedingungen folgt für die Bemessungsaufgabe ein maximales (massgebendes) Moment M_{max} = -3/16·Q·L an der Einspannung, was vom Betrag her dem Mittel der maximalen Momenten bei frei drehbaren Auflagern (M_{max} = 1/4·Q·L) und bei beidseitiger Einspannung (M_{max} = 1/8·Q·L) entspricht. Beim Kollaps des Rundholzes unter der Bruchlast Q_u sind die Verhältnisse leicht unterschiedlich: Unter der Voraussetzung von über die ganze Balkenlänge konstanten Querschnitts- und Festigkeitskennwerten tritt dabei das Bruchmoment M_u sowohl an der Einspannung als auch in Balkenmitte auf (Abbildung 6.8d). Aus den Gleichgewichtsbedingungen ergibt sich dabei der Betrag des Bruchmoments zu M_u = 1/6·Q·L. Der Medianwert der Bruchmomente M_u aller Rundhölzer war bei Berechnung nach diesen Modellen nicht mehr signifikant grösser als jener der rechnerischen Grenzwerte des Biegewiderstandes M_R (Wilcoxon-Test, einseitig, $p > 0.05$).

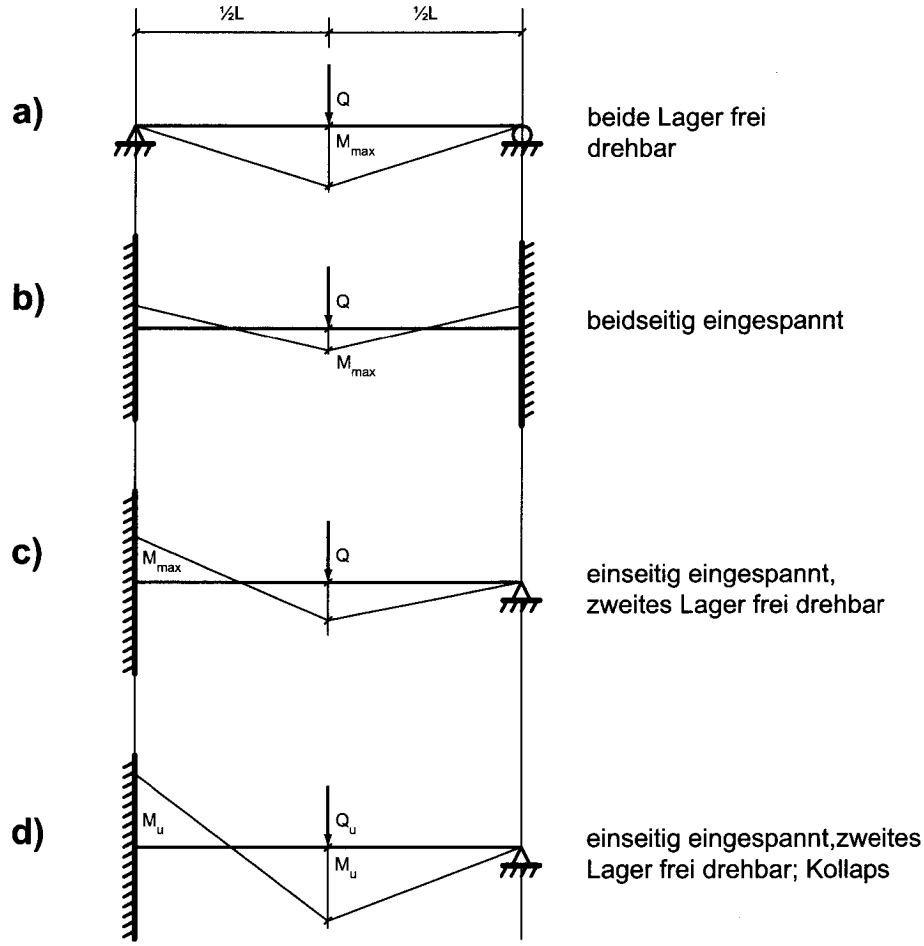


Abbildung 6.8: Mögliche Auflagerbedingungen der Rundhölzer und die daraus resultierenden Momentenlinien (schematisch).

a) Frei drehbare Lagerung, Modellannahme bei der Bemessung. M_{max} = 1/4·Q·L (= 24/96·Q·L).

b) Beidseitig volle Einspannung, aufgrund des tonigen Bodenmaterials nicht anzunehmen. $|M_{max}|$ = 1/8·Q·L (= 12/96·Q·L).

c) Einseitige Einspannung links und frei drehbare Lagerung rechts, Modellannahme für die Bemessung im elastischen Bereich. M_{max} = -3/16·Q·L (= -18/96·Q·L).

d) Balken bei Bruchzustand (plastischer Kollaps, Lagerbedingungen wie in c). Das Bruchmoment $|M_u|$ = 1/6·Q·L (= 16/96·Q·L) tritt sowohl an der Einspannstelle als auch in Balkenmitte auf (unter Q_u).

6.4.3 Versuchsanordnung

Der Einfluss der Methode der konzentrierten Krafteinleitung hat einen schwierig abzuschätzenden Einfluss auf das gemessene Bruchmoment. Einerseits wurde das Drahtseil direkt am Rundholz befestigt und konnte sich so bei zunehmender Kraft ins Holz einschneiden. Ein Reiter aus Hartholz konnte aus praktischen Gründen nicht angebracht werden. Dadurch auftretende Faserquetschungen auf der Druckseite führen zu einer Verringerung des lastaufnehmenden Querschnitts und somit zu einer verminderten Biegefestigkeit. Andererseits schlägt Madsen (1992) bei einer Einzellast in Balkenmitte im Vergleich zur Lastannahme bei der Bemessung (Linienlast) eine Erhöhung der Bruchspannung vor, da sich bei einer Linienlast aus statistischen Überlegungen Strukturstörungen stärker auswirken. Diese Angaben beziehen sich jedoch auf Kanthölzer, weshalb sie nicht direkt in die Auswertung der Versuche einbezogen wurden. Der oben beschriebene Effekt des Einschnitts des Drahtseils liess sich jedoch bei allen Rundhölzern beobachten. Deshalb wird davon ausgegangen, dass aus der Krafteinleitung mit der beschriebenen Methode weniger hohe Bruchkräfte resultieren, als wenn die Sperre mit einer Linienlast oder durch eine Krafteinleitung in den Drittelspunkten geschehen wäre.

Weiter konnte die Kraft, bedingt durch die einfache Windenmechanik, nicht immer mit konstanter Geschwindigkeit eingeleitet werden. Eine Verbesserung könnte mit einer Kraftübertragung an die Winde mit einem Hydrostatgetriebe oder über eine Flüssigkeitskupplung erreicht werden, wodurch eine konstante Geschwindigkeit der Krafteinleitung möglich würde.

6.4.4 Ansatz der Auswertung

Anstelle des in der Norm SIA 164 (1992) verwendeten Tragsicherheitsnachweises anhand der zulässigen Bemessungsspannung σ_{zul} wurden in der vorliegenden Arbeit Bruchmomente M_u mit rechnerisch bestimmten Grenzwerten für den Biegewiderstand M_R verglichen.

Da sich von den geprüften Balken aufgrund der nichtlinearen Spannungsverteilung keine Bruchspannungen ermitteln liessen, konnte die Streuung der Biegefestigkeit der Gesamtheit der geprüften Hölzer nicht bestimmt werden. Dies erschwert die generelle Angabe von Sicherheitsfaktoren gegen Versagen des verbauten Holzes auf Biegung. Stellt man trotzdem vereinfachend die gemessenen Bruchmomente M_u den aus der zulässigen Spannung resultierenden Biegewiderständen $M_{zul} = \sigma_{zul} \cdot W_y$ gegenüber, so ergibt sich ein mittlerer Quotient der Mediane aller Werte von M_u/M_{zul} von 2.8. Dabei liegt das Bruchmoment bei allen Rundhölzern über dem zulässigen Moment M_{zul}. Auch wenn die Sicherheitsreserve $r = M_u/M_R$ gegenüber Versagen auf Biegung (unter Bruchlasten) nur noch 1.2 beträgt, könnten alle geprüften Balken die Bemessungslast (unter Gebrauchslasten) auch nach 60 Jahren noch tragen.

6.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Frage nach der langfristigen Sicherheit stellt sich nicht nur im Falle von Wildbachsperren aus Holz. Bei allen Schutzbauwerken gegen Naturgefahren können sich sowohl die Einwirkungen als auch die Eigenschaften der Tragwerke verändern (Böll 2001). Im vorliegenden Fall waren die Biegewiderstände M_u (unter Bruchlast) von zwei Dritteln der verwendeten Rundhölzer nach 60 Jahren noch grösser als der für den Vergleich vorausgesetzte rechnerische Grenzwert des Biegewiderstands M_R („rechnerisches Biegebruchmoment"). Gegenüber dem zulässigen

Biegemoment M_{zul} nach Norm SIA 164 (1992) erfüllten alle Bauteile trotz ihrem Einsatz über Jahrzehnte unter den typischen wechselfeuchten Bedingungen im Wildbachverbau die geforderte Tragwirkung.

Nicht vergessen werden darf jedoch, dass die Lebensdauer einer Wildbachsperre aus Holz noch von anderen Prozessen als dem biologischen Abbau des Werkstoffes abhängt. Erwähnt seien hier mechanische Beschädigung durch Geschiebe, Murgänge oder Geländeverschiebungen. Geht man nach Zeller und Röthlisberger (1987) davon aus, dass Holzsperren nach etwa 40 Jahren saniert werden müssen, so erscheint eine Bemessung nach der Norm SIA 164 (1992) zumindest nach den vorliegenden Ergebnissen geeignet, die Tragsicherheit der Bauteile ausreichend lange zu gewährleisten.

Die Ergebnisse der vorliegenden Fallstudie müssen durch weitere Versuche bestätigt werden. Insbesondere interessieren auch Sperren in Gerinnen mit weniger günstigen Bedingungen, z.B. mit starker Besonnung und/oder nur temporärer Wasserführung. Der verwendete Ansatz der Feldprüfung ist für reine Holzfestigkeitsanalysen aus den oben diskutierten Gründen nur bedingt geeignet. Andererseits werden aber nur in einer derartig angelegten Studie sämtliche, am Standort auftretenden Besonderheiten, welche das Bruchverhalten beeinflussen können, adäquat berücksichtigt.

6.6 Zusammenfassung

An drei rund 60-jährigen einwandigen Wildbachsperren, welche im Rahmen eines Erneuerungsprojektes zum Abbruch vorgesehenen waren, wurde das Bruchmoment von 14 verbauten Rundhölzern mittels Bruchversuchen unter den realen Einbaubedingungen ermittelt. Dieses Bruchmoment wurde anschliessend mit einem rechnerischen Grenzwert für den Biegewiderstand verglichen, welcher aus den bei einer Bemessung verwendeten Normenwerken hergeleitet wurde.

Bei zwei Dritteln aller Rundhölzer wurde ein höheres Bruchmoment M_u ermittelt als der zugehörige rechnerische Grenzwert für den Biegewiderstand M_R. Der Median der Werte M_u lag dabei um einen Faktor 1.2 über demjenigen der Werte M_R. Verglichen mit den zulässigen Momenten nach der Schweizerischen Holzbaunorm SIA 164 (1992) betrug dieser Faktor 2.8. Die bei der Bemessung eingeführten Sicherheitsreserven der Rundhölzer waren somit nach 60 Jahren zwar nicht mehr uneingeschränkt gegeben, alle Rundhölzer hätten jedoch einer Lasteinwirkung auf dem Niveau der zulässigen Spannungen unter Gebrauchslasten widerstanden. Eine Bemessung nach der Norm SIA 164 (1992) wird als geeignet erachtet, die Tragsicherheit von Holzkonstruktionen über mehrere Jahrzehnte zu gewährleisten, wobei dies in weiteren Studien zu bestätigen ist.

7 Synthese

Dieses abschliessende Kapitel gibt einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und deren Bedeutung für konstruktive Merkmale von Wildbachsperren aus Holz. Für die detaillierte Diskussion der einzelnen Resultate wird auf die einzelnen Kapitel verwiesen.

7.1 Wichtigste Resultate

Dominierende Fäuleerreger und ihre Besiedlungsmuster an Wildbachsperren aus Holz (Kapitel 2)

An neun untersuchten Wildbachsperren auf der Alpennordseite gehörten rund 75% aller als Fruchtkörper oder Myzelien nachgewiesenen Basidiomyceten zu sechs Pilzarten. Es handelt sich um die Braunfäuleerreger *Fomitopsis pinicola*, *Antrodia serialis*, *Gloeophyllum sepiarium* und *Gloeophyllum odoratum*, den Weissfäuleerreger *Armillaria cepistipes* sowie um *Sistotrema brinkmannii*. Die genannten Fäuleerreger sind sehr häufige und weitverbreitete Arten auf Totholz. An den untersuchten Bauwerken traten sie viel häufiger an den Sperrenflügeln als an den Einbindungen und im Bereich des Wasserflusses auf. Die Thalli von *F. pinicola*, *A. serialis* und *G. sepiarium* waren meist klein, was auf eine überwiegende Infektion der Bauteile durch Basidiosporen schliessen lässt. Die Ausdehnung individueller Thalli im Holz beschränkte sich in den meisten Fällen auf ein einziges Rundholz. Bei *F. pinicola* wurde äusserst selten auch ein Übertritt von einem Rundholz auf ein benachbartes festgestellt.

Einfluss von Fäuleerregern und Umweltbedingungen auf den Holzzustand verbauter Rundhölzer im Wildbachverbau (Kapitel 3)

Für das Auftreten von Fäulen waren an den untersuchten Wildbachsperren primär die Braunfäuleerreger *Fomitopsis pinicola*, *Antrodia serialis*, *Gloeophyllum sepiarium* und *Gloeophyllum odoratum* verantwortlich. Die Fäulen traten vor allem an den Sperrenflügeln auf. Einbindungen und Fliesswasserbereich waren weit weniger stark betroffen und unterschieden sich nicht signifikant. Weiter waren Fäulen in nördlich exponierten Gerinnen sowie mit zunehmender Meereshöhe seltener als bei südlicher Gerinneexposition bzw. in tieferen Höhenlagen. Zudem begünstigen der Luft ausgesetzte Stirnflächen der verbauten Rundhölzer die Entwicklung von Fäulen. Die verbaute Holzart (Fichte oder Tanne), das Alter der Sperre (5 – 27 Jahre) und der Durchmesser der verbauten Rundhölzer korrelierten nicht mit dem Auftreten einer Fäule.

Einfluss wechselnder Feuchtebedingungen auf Fäuleerreger (Kapitel 4)

Der Holzabbau von frischen Rundholz-Proben (Fichte) in Bodenkontakt durch *Fomitopsis pinicola* wird durch eine temporäre Überflutung gehemmt. Die Dauer der Trockenperioden ist dabei direkt mit der Abbaurate korreliert. Der intensivste Abbau trat an nie überfluteten Rundhölzern auf. Mit zunehmender Überflutungsdauer nahm der Holzabbau ab und blieb bei ständiger Benetzung ganz aus. Dieser Befund deckt sich mit den Ergebnissen der Studie in Kapitel 3, wo jene Bauteile, welche dem Wasserfluss im Gerinne nicht ausgesetzt waren, den stärksten Zersetzungsgrad aufwiesen.

Wirkung von Eisen aus Verbindungsnägeln auf holzabbauende Pilze (Kapitel 5)

Vor 15 Jahren verbaute Rundhölzer (Fichte) wiesen im Bereich von Verbindungsnägeln einen stark erhöhten Eisengehalt auf. Dieser nimmt innerhalb von wenigen Millimetern von der Nageloberfläche stark ab, ist jedoch auch im Abstand von mehreren Zentimetern noch um ein Vielfaches höher als in frischem Holz. Der Eisengehalt von Holzproben hatte einen deutlichen Einfluss auf den Abbau durch den häufigsten Fäuleerreger an Wildbachsperren (*Fomitopsis pinicola*). Geringe Eisengehalte, wie sie im Abstand einiger Zentimeter von einem Nagel im Holz auftreten, führen verglichen mit unbehandeltem Fichtenholz zu verstärktem Holzabbau. Hohe Eisenkonzentrationen, wie sie unmittelbar an der Nageloberfläche auftreten, hemmen das Pilzwachstum hingegen stark.

Tragsicherheit von Holzkonstruktionen im Wildbachverbau (Kapitel 6)

Zwei Drittel der geprüften Rundhölzer von drei um 1940 gebauten Wildbachsperren wiesen rund 60 Jahre nach dem Einbau immer noch ein höheres Bruchmoment auf, als bei der Bemessung vorausgesetzt wird. Die mittlere Sicherheitsreserve bezüglich den Bemessungswerten betrug 1.2. Verglichen mit den zulässigen Momenten nach der Schweizerischen Holzbaunorm SIA 164 (1992) betrug dieser Faktor 2.8. Die bei der Bemessung eingeführten Sicherheitsfaktoren der Rundhölzer waren somit nach 60 Jahren zwar nicht mehr uneingeschränkt gegeben, alle Rundhölzer hätten jedoch einer Lasteinwirkung auf dem Niveau der zulässigen Spannungen auch nach mehreren Jahrzehnten noch standgehalten.

7.2 Überlegungen zur Verwendung von Holz im Wildbachverbau

Besiedlung der Sperren durch Fäuleerreger

Die mit Abstand am häufigsten nachgewiesenen Verursacher von Fäulen an Bachsperren sind keine auf extreme Feuchteverhältnisse spezialisierte Pilzarten. Es sind vielmehr Arten, welche auch in natürlichen Waldökosystemen als häufige Fäuleerreger an Totholz und als aggressive Holzzerstörer an Bauholz vorkommen (Jahn 1979, Butin 1996). Aufgrund der Biologie dieser Arten kann ein Befall von Wildbachsperren wohl an keinem Standort ausgeschlossen werden. Die Sperren werden vorwiegend über Basidiosporen aus der Luft besiedelt. Die Infektion der Bauwerke kann also gleichzeitig an mehreren Stellen eintreten. Eigentliche Ausgangspunkte oder "Eintrittspforten" wurden nicht festgestellt. Dies zeigt, dass sich eine Besiedlung der Sperren durch diese Arten wahrscheinlich nicht durch konstruktive Massnahmen verhindern lässt.

Übertritte durch Myzelwachstum der Fäuleerreger von einem Bauteil auf ein anderes sind sehr selten (Ausnahme: *Armillaria cepistipes*, welche sich über Rhizomorphen ausbreiten kann). Ein Rundholz wird also kaum von einem benachbarten, befallenen Balken aus infiziert. Dies ist im Bezug auf die Auswechslung befallener Rundhölzer, wie sie von verschiedenen Autoren empfohlen wird (Zeller & Röthlisberger 1987, Böll *et al.* 1999), von grosser Bedeutung: Wenn einzelne Rundhölzer im Rahmen von Unterhaltsarbeiten ersetzt werden, besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass ein Fäuleerreger von einem benachbarten Rundholz auf ein ausgewechseltes Bauteil übertritt.

Gefährdete Bauteile

Werden frisch verbaute Rundhölzer von einem der häufigsten Braunfäuleerreger (*Fomitopsis pinicola, Antrodia serialis*, *Gloeophyllum sepiarium* oder *Gloeophyllum odoratum*) besiedelt, kann der Holzkörper unter geeigneten ökologischen Bedingungen innert weniger Jahre vollständig zerstört werden. Die Abbaudynamik war an den untersuchten Sperren je nach Bauteil sehr unterschiedlich. Die Sperrenflügel sind am stärksten durch Pilzbefall gefährdet. Dagegen sind ständig überflossene Bauteile gegenüber den am häufigsten festgestellten, aggressiven Fäuleerregern während Jahrzehnten praktisch geschützt. Die seitlichen Einbindungen der Sperren nehmen eine Zwischenstellung ein, wobei die Fäuleprozesse hier deutlich langsamer ablaufen als an den Sperrenflügeln und nur unwesentlich rascher als an überflossenen Bauteilen.

Der festgestellte, geringe Unterschied zwischen ständig überflossenen Bauteilen und den Einbindungsbereichen zeigt, dass für den Sperrenkörper insgesamt eine wesentlich längere Funktionsdauer erwartet werden darf als für die Flügel. Die Empfehlung, Sperrenflügel aus Holz auswechselbar zu konstruieren, erscheint unter diesem Gesichtspunkt sinnvoll (Zeller 1987, Rickli 1997). Der Sperrenkörper könnte dann über zwei oder mehrere „Generationen" der Sperrenflügel verwendet werden. Ein Alternative stellt die Verwendung von Steinkörben oder Blocksteinen als Sperrenflügel dar (Abbildung A.4 in Anhang VII). Dabei muss jedoch dem höheren Gewicht der Flügel Rechnung getragen werden. Eine gute Verfüllung der Holzkasten mit Steinmaterial sowie ein stabiler Untergrund sind Voraussetzungen für die Verwendung von Steinbauten als Sperrenflügel.

Faktoren, welche die Fäuledynamik beeinflussen

Der Hauptgrund für die unterschiedliche Fäuledynamik an den verschiedenen Bauteilen ist der Wassergehalt des Holzes und dessen zeitliche Variation. Unter den typischen Bedingungen an Bachsperren sinkt der Wassergehalt frisch verbauten Holzes an keinem Bauteil in einen Bereich, in welchem die Entwicklung einer Fäule nicht mehr möglich ist. Die trockensten Bauteile an Sperren werden am häufigsten durch Fäuleerreger besiedelt und weisen auch die grösste Abbaurate auf. Letzteres wurde experimentell deutlich bestätigt. Auch ein temporäres Überfliessen der Rundhölzer an Bachsperren hat deshalb eine positive Wirkung auf den Holzzustand, da so zumindest zeitweise zu feuchte Verhältnisse für den Holzabbau durch die häufigsten Fäuleerreger herrschen.

Zwischen den am Alpen-Nordhang meist verwendeten Holzarten Tanne und Fichte konnte kein Unterschied in der Fäuleresistenz festgestellt werden. Andere Faktoren – insbesondere die Feuchteverhältnisse – haben einen deutlich grösseren Einfluss auf die Fäuledynamik als die Holzart.

Die Verwendung sogenannt dauerhafter Holzarten wie Eiche, Lärche oder Robinie wurde in vorliegender Studie nicht experimentell untersucht. Aufgrund der vorhandenen Literatur kann jedoch für diese Arten eine grössere Fäuleresistenz auch unter den spezifischen Bedingungen im Wildbachverbau angenommen werden. Sofern die genannten Holzarten vor Ort vorhanden sind, erscheint es beim jetzigen Wissensstand sinnvoll, sie anstelle von Tanne/Fichte für den Verbau zu verwenden. Dennoch sollte abgeklärt werden, wie sich die Verwendung ganzer Rundhölzer auf die Dauerhaftigkeit auswirkt, da zwischen Kern und Splintholz dieser Arten

erhebliche Unterschiede in der Abbauresistenz bestehen (Wälchli 1976). Bei einem Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Lärche oder Fichte mit Tanne/Fichte müssen jedoch auch die Kosten für die Bereitstellung und einen allfälligen Transport sowie Fragen zur Ökobilanz in die Überlegungen mit einbezogen werden. Erst dann können letztlich Empfehlungen über die Verwendung nicht lokal verfügbarer, dafür aber dauerhafterer Holzarten abgegeben werden. Ein langfristiger Ansatz in verbauten Wildbach-Einzugsgebieten wäre es – wo es die standörtlichen Verhältnisse zulassen – das waldbauliche Konzept auf dauerhaftere Holzarten auszurichten.

Die Empfehlung, Holz vor allem in nordexponierten Gerinnen einzusetzen, kann aufgrund der vorliegenden Daten bestätigt werden. Zudem scheint sich auch eine grössere Höhenlage günstig auf den Holzzustand auszuwirken. Dabei spielt an schattigen, hochgelegenen Standorten einerseits die niederige Temperatur eine wichtige Rolle, andererseits die geringere Verdunstung an der Holzoberfläche. Beides wirkt sich direkt auf den Wassergehalt und damit auf die Abbaudynamik durch Pilze aus (Rayner & Boddy 1988). Eine ähnlich Wirkung hat wahrscheinlich auch eine Beschattung der Bauwerke, so dass sich die Empfehlung einer Bepflanzung der Gerinneflanken nach dem Bau (Rickli 1997) bestätigen lässt. Eine Bepflanzung der Sperrenflügel mit sprosswurzelbildenden Pflanzen (z.B. Weidenstecklinge) kann ebenfalls zu einer möglichst frühzeitigen Beschattung dieser Bauteile beitragen (F. Florineth, pers. Mitteilung).

Zwischen dem Holzzustand und dem Durchmesser der verbauten Rundhölzer wurde kein Zusammenhang festgestellt. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die im Holzverbau oft vorliegende Überdimensionierung nicht zu einem rascheren Abbau des Holzes führt.

Verbindungen durch Nägel

Ein erhöhter Eisengehalt (erzeugt durch eine Tränkung mit einer $FeCl_3$-Lösung) im Holz förderte das Wachstum und den Holzabbau durch den häufigsten Fäuleerreger an Bachsperren (*Fomitopsis pinicola*). Ob Korrosionsprodukte aus Stahlnägeln dieselbe Wirkung haben, ist noch nachzuweisen. Korrosionsprodukte werden im Holz in Faserrichtung über mehr als 10 cm verlagert. Verletzungen des Holzkörpers erhöhen die Durchlässigkeit und damit die Verlagerungsrate. Unter dem Aspekt der Förderung von Fäuleprozessen durch freigesetztes Eisen aus Verbindungsnägeln, ist es deshalb zu empfehlen, möglichst geringe Holzverletzungen beim Einschlagen der Nägel anzustreben. Dies wird – falls keine rostfreien Nägel eingesetzt werden – vermutlich am besten durch ein Vorbohren der Rundhölzer und ein Zuspitzen der Nägel erreicht.

Betrachtungen zur Funktionsdauer

Nach welchem Zeitraum eine Sperre aufgrund ihres Holzzustandes nicht mehr funktionstauglich ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Einerseits können Bachsperren, unter der Voraussetzung, dass Hochwasserereignisse oder Murgänge ausbleiben, ihre Funktion noch über Jahrzehnte erfüllen, auch wenn Teile davon grösstenteils zersetzt sind (vergl. Kapitel 3.4.3, Sperre Chamlisboden). Andererseits stellt sich die Frage nach der Sicherheit des ganzen Systems. Wenn die Sperrenflügel einem Hochwasser nicht mehr standhalten können bzw. überflossen werden, besteht an den talseitigen Gerinneflanken Erosionsgefahr, was ein Kippen oder Gleiten der Sperre zur Folge haben kann (Böll 2001). Der Ausfall einer Sperre kann zudem die Stabilität der nächst oberen Sperre gefährden und somit einen Einfluss auf die Sicherheit einer ganzen Verbauung haben (Zeller & Röthlisberger 1987).

Die Ergebnisse der Fallstudie an 60-jährigen Bachsperren (Kapitel 6) zeigen, dass der Sperrenkörper die Aufnahme der Bemessungslast (vollständiger Einstau der nicht hinterfüllten Sperre) wahrscheinlich unbeschadet überstanden hätte. Auch wenn diese Ergebnisse durch weitere Versuche unter anderen Standortsbedingungen bestätigt werden müssen, scheint eine Bemessung der Rundhölzer nach der Schweizerischen Holzbaunorm (SIA 164 1992) geeignet, auch nach mehreren Jahrzehnten eine genügende Sicherheit gegenüber Versagen auf Biegung zu gewährleisten. Die fehlenden Sperrenflügel (vergl. Abbildung 6.1, S. 88) stellen jedoch die Sicherheit aus den genannten Gründen in Frage. Unter diesem Gesichtspunkt zeigt sich wiederum, dass für die Erhaltung der Substanz von Holzsperren – und einer angemessenen Sicherheit des ganzen Systems – die Auswechslung der Sperrenflügel, wenn sie aus Holz erstellt werden, beim Bau berücksichtigt werden sollte. Ein Überwachungs- und Unterhaltskonzept wie es bei Böll *et al.* (1999) beschrieben ist, stellt deshalb einen notwendigen Bestandteil der Projektierung von Bachverbauungen aus Holz dar. Unter Berücksichtigung der erläuterten Einflussfaktoren sowie unter dem Einbezug möglicher Reparaturarbeiten erscheint für Holzsperren aus Fichte oder Tanne eine Funktionsdauer von über 50 Jahren aus Sicht der Materialqualität realistisch.

7.3 Schlussbemerkungen

Die vorliegende Arbeit brachte verschiedene neue Erkenntnisse über die Auswirkungen von Pilzbefall auf die technische Eigenschaften von Wildbachsperren aus Holz. Erfahrungen und Modellvorstellungen aus der Praxis wurden teilweise quantitativ belegt, teilweise aber auch relativiert. Eine Frage, welche an dieser Stelle nicht abschliessend beantwortet werden kann, ist jene nach der Zeitspanne, nach welcher Holzsperren unter verschiedenen ökologischen Bedingungen repariert bzw. erneuert werden müssen. Diese Frage ist für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Holzverbauungen im Vergleich mit anderen Werkstoffen besonders wichtig. Sie kann jedoch nur unter Einbezug verschieden alter Sperren oder in langfristigen Beobachtungen von Holzsperren beantwortet werden.

Auch die Frage nach den Vor- und Nachteilen des Einsatzes dauerhafterer Holzarten wie Lärche oder Eiche und dessen Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von Bachsperren aus Holz war nicht Gegenstand dieser Arbeit und sollte separat untersucht werden. Auch die Zeiträume, während denen – in Abhängigkeit von den massgebenden ökologischen Faktoren für das Pilzwachstum – von einer genügenden Holzfestigkeit ausgegangen werden kann, sollten ebenfalls präziser bestimmt werden. In diesem Zusammenhang sind auch weitere Pilzarten (Ascomyceten, Deuteromyceten) in die Untersuchungen einzubeziehen, welche Holz viel langsamer abbauen als Basidiomyceten, letztlich aber die gleiche Wirkung haben. Zudem sollte die Bedeutung von weiteren ökologischen Faktoren, welche durch konstruktive bzw. begleitende Massnahmen umgesetzt werden können (z.B. die Minimierung der Sonneneinstrahlung durch Bepflanzung der Gerinneflanken) quantifiziert werden.

Holz hat als Baumaterial für Wildbachsperren verschiedene technische, wirtschaftliche und ökologische Vorteile. Fäulen, und damit eine Verkürzung der Funktionsdauer der Bauwerke, können nicht verhindert werden. Zwischen den einzelnen Bauteilen sowie verschiedenen Standorten konnten in der vorliegenden Arbeit jedoch erhebliche Unterschiede bezüglich der Aktivität holzzerstörender Pilze nachgewiesen werden. Beim Verbau von Wildbachgerinnen mittels Holzsperren müssen deshalb neben hydrologischen, geotechnischen und baustatischen Kriterien immer auch pilzökologische Überlegungen mit einbezogen werden. Zumindest Fälle, welche bereits nach wenigen Jahren einen intensiven Pilzbefall aufweisen, lassen sich durch die adäquate Berücksichtigung der dargestellten Einflussgrössen sehr wahrscheinlich vermeiden. Gerade derartige Fälle sind es jedoch, welche Holz in der Diskussion um die Wahl des Werkstoffs als zweifelhaft erscheinen lassen. Es ist deshalb auch künftig von grösster Bedeutung, bei der Projektierung abzuklären, ob Holzsperren unter den gegebenen Standortsverhältnissen in Frage kommen und welche Konstruktionsart sich im Hinblick auf eine möglichst lange Funktionsdauer am besten eignet. Nur so kann letztlich auch das Vertrauen in den – in verschiedener Hinsicht optimalen – Werkstoff Holz erhalten werden.

8 Literaturverzeichnis

Abe, Y. (1989): Effect of moisture content on wood decay by xylariaceous and diatrypaceous fungi and quantitative changes in the chemical components of decayed wood. Transactions of the Mycological Society of Japan 30(2): 169-181.

Ackerman, J. K., Shenefelt, R. D. (1973): Organisms, especially insects, associated with wood rotting higher fungi (Basidiomycetes) in Wisconsin Forests. Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters 61: 185-206.

Adams, D. H., Lewis, F. R. (1967): Demarcation lines in paired cultures of *Fomes cajanderi* as a basis for detecting genetically distinct mycelia. Canadian Journal of Botany 45: 1583-1589.

Ammann, F. (1997): Ingenieurbiologische Verbaumethoden - Holzkastenverbau und Hangroste. Ingenieurbiologie 4: 4-8.

Ammer, U. (1964): Über den Zusammenhang zwischen Holzfeuchtigkeit und Holzzerstörung durch Pilze. Holzforschung 22(2): 47-51.

Armstrong, F. H., Savory, J. G. (1959): The Influence of Fungal Decay on the Properties of Timber. Holzforschung 13(3): 84-89.

Arnold, B., Schweingruber, F. H. (1975): Etudes archéologiques et botaniques sur les pilotis de la palisade de la station nord d'Auvernier (Lac de Neuchâtel). Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles 98: 175-193.

ASF (1973): Eidgenössisches Amt für Strassen- und Flussbau: Dimensionierung von Wildbachsperren aus Beton und Stahlbeton. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern, 3 S.

Aulitzky, H., Heuberger, H., Patzelt, G. (1994): Mountain Hazard Geomorphology of Tyrol and Vorarlberg, Austria. Mountain Research and Development 14(4): 273-305.

Baker, A. (1974): Degradation of wood by products of metal corrosion. U.S.D.A Forest Service Research Paper FPL 229: 6 S.

Baker, A. (1992): Corrosion of nails in CCA- and ACA-treated wood in two environments. Forest Products Journal 42(9): 39-41.

Barrett, D. K., Uscuplic, M. (1971): The field distribution of interacting strains of *Polyporus schweinitzii* and their origin. New Phytologist 70: 581-598.

Bauch, J., Höll, W., Endeward, R. (1975): Some Aspects of Wetwood Formation in Fir. Holzforschung 29(6): 198-205.

Bavendamm, W., Reichelt, H. (1938): Die Abhängigkeit des Wachstums holzzersetzender Pilze vom Wassergehalt des Nährsubstrates. Archives of Microbiology 9: 486-544.

Bazzigher, G., Kanzler, E., Ferlin, P., Zürcher, S. (1985): Fäulebefall in Fichten und Lärchenbeständen im Goms (Kt. Wallis). Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 136(6): 493-497.

Bernhart, A. (1964): Über die Rohdichte von Fichtenholz. Holz als Roh- und Werkstoff 22: 215-228.

Bernhart, A. (1965): Frischfeuchtigkeit und Schwindverhalten von Fichtenholz. Forstwissenschaftliches Centralblatt 84: 347-356.

Berns, H. (1993): Stahlkunde für Ingenieure, 2. Auflage. Springer, Berlin, 271 S.

Bethge, K., Mattheck, C., Hunger, E. (1996): Equipment for detection and evaluation of incipient decay in trees. Arboricultural Journal 20(1): 13-37.

Bjurman, J. (1985): Conditions of Basidiospore Production in the Brown Rot Fungus *Gloeophyllum sepiarium* in Axenic Culture. Material und Organismen 20(1): 121-131.

Blanchette, R. A., Obst, J. R., Timell, T. E. (1994): Biodegradation of Compression Wood and Tension Wood by White and Brown Rot Fungi. Holzforschung 48(1): 34-42.

Bock, H., Wehrmann, A., Weber, A. (1949): Wildbach- und Lawinenverbauung: Eine Gemeinschaftsarbeit, 2. Auflage. Forstwirtschaftliche Arbeitsgemeinschaft an der Hochschule für Bodenkultur, Wien, 35 S.

Boddy, L. (1983): Effect of temperature and water potential on growth rate of wood rotting basidiomycetes. Transactions of the British Mycological Society 80: 141-149.

Boddy, L. (1986): Water and decomposition processes in terrestrial ecosystems. In: Ayres, P. G., Boddy, L. (Hrsg.): Water, Fungi and Plants. Cambridge University Press, Cambridge, 375-398.

Boddy, L., Owens, E. M., Chapela, I. H. (1989): Small scale variation in decay rate within logs one year after felling: Effect of fungal communitiy structure and moisture content. FEMS Microbiology Ecology 62: 173-184.

Bohl, H. (1996): Eichung von TDR zur Wassergehaltsbestimmung in Böden auf Basis gemischt-dielektrischer Modelle. Dissertation an der Technischen Universität Berlin, Berlin.

Böll, A. (1988): Holz im Wildbach- und Hangverbau. Wald und Holz 70(6): 428-433.

Böll, A. (1997): Wildbach- und Hangverbau. Bericht der Eigenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft 343, Birmensdorf, 123 S.

Böll, A., Gerber, W., Graf, F., Rickli, C. (1999): Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 60 S.

Böll, A. (2001): Sicherheitsaspekte bei der Bemessung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren. Proc. FAN-Kurs 2001, Typenprüfung, Walenstadt (SG), 19 S.

Bosshard, H. H. (1974a): Holzkunde, Band 2, Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. Birkhäuser, Basel, 312 S.

Bosshard, H. H. (1974b): Holzkunde, Band 3, Aspekte der Holzbearbeitung und Holzverwertung. Birkhäuser, Basel, 286 S.

Braschler, U. (1995): Hochwasserschutz in Nidwalden. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 146(7): 525-530.

Breitenbach, J., Kränzlin, F. (1986a): Pilze der Schweiz, Band 2. Verlag Mykologia, Luzern, 416 S.

Breitenbach, J., Kränzlin, F. (1986b): Pilze der Schweiz, Band 3. Verlag Mykologia, Luzern, 364 S.

Briemle, G. (1997): Der richtige Zeitpunkt beim Holzeinschlag. Wald und Holz 78(1): 19-21.

Brown, S., Mo, J. M., McPherson, J. K., Bell, D. T. (1996): Decomposition of woody debris in Western Australian forests. Canadian Journal of Forest Research 26(6): 954-966.

Brunner, I., Frey, B. (2000): Detection and localization of aluminium and heavy metals in ectomycorrizal Norway spruce seedlings. Environmental Pollution 108: 121-128.

Büchele, K. (1995): Festigkeitsuntersuchungen von altem Nadelholz. Diplomarbeit im Fachbereich Biologie, Universität Hamburg, 145 S.

Bues, C. T. (1993): Qualität von beregnetem Fichtenholz nach Auslagerung und Einschnitt. Holz-Zentralblatt 119(34): 524-526.

Buller, A. H. R. (1958): Researches on Fungi, Band IV, Reprint. Hafner, New York, 329 S.

Bunnell, F. L., Dowding, P. (1974): ABISKO - A generalised decomposition model for comparison between Tundra sites. In: Holding, A. J. *et al.* (Hrsg.): Soil Organisms and Decomposition in Tundra. Tundra Biome Steering Commitee, Stockholm, 227-248.

Burmester, A. (1980): Holzfeuchtigkeit in Nadelhölzern. Jahreszeitliche Einflüsse auf die Eigenschaften des Splint- und Kernholz von Nadelbäumen. Holz-Zentralblatt 106: 1303-1304.

Butin, H. (1996): Krankheiten der Wald- und Parkbäume Diagnose, Biologie, Bekämpfung, 3. Auflage. Thieme, Stuttgart, 261 S.

Capretti, P., Mugnai, L. (1989): *In vitro* tests of antagonism against *Heterobasidion annosum.* Phytopathologia mediterranea 28(2): 150-154.

Carmichael, J. W., Bryce Kendrick, W., Conners, I. L., Sigler, L. (1980): Genera of Hyphomycetes. The University of Alberta Press, Edmonton, 386 S.

Carrl, C. G., Highley, T. L. (1999): Decay of Wood and Wood-Based Products Above Ground in Buildings. Journal of Testing and Evaluation 27(2): 150-158.

Carroll, G. C., Wicklow, D. T. (1992): The fungal community. Its organization and role in the ecosystem, 2. Auflage. Dekker, New York, 976 S.

Cartwright, K. S. G., Findlay, W. P. K., Chaplin, C. J., Campbell, W. G. (1931): The effect of progressive decay by *Trametes serialis* Fr. on the mechanical strength of the wood of Sitka Spruce: Forest Products Research Bulletin No. 11. His Majesty's Stationary Office, London, 18 S.

Cartwright, K. S. G., Findlay, W. P. K. (1958): Decay of timber and its prevention, 2. Auflage. Her Majesty's Stationery Office, London, 332 S.

Clausen, C. A. (1996): Bacterial associations with decaying wood: A review. International Biodeterioration & Biodegradation 37(1-2): 101-107.

Coates, D., Rayner, A. D. M., Todd, N. K. (1981): Mating behaviour, mycelial antagonism and the establishment of individuals in *Stereum hirsutum.* Transactions of the British Mycological Society 76(1): 41-51.

Coleman, J. S., Murdoch, C. W., Campana, R. J., Smith, W. H. (1985): Decay resistance of elm wetwood. Canadian Journal of Plant Pathology 7: 151-154.

Conover, W. J. (1999): Practical Nonparametric Statistics, 3. Auflage. John Wiley & Sons, New York, 584 S.

Cooke, R. C., Rayner, A. D. M. (1984): Ecology of saprotrophic fungi. Longman, London, 415 S.

Cooke, W. B. (1979): The ecology of the fungi. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 274 S.

Corbett, N. H. (1965): Micro-morphological studies on the degradation of lignified cell walls by Ascomycetes and Fungi imperfecti. Journal of the Institute of Wood Science 3(14): 18-29.

Courtois, H. (1970): Einfluss von Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Jahrringbreite auf den Abbau des Nadelholzes durch *Fomes annosus* (Fr.) Cke. Holz als Roh- und Werkstoff 28(2): 67-75.

Cowling, E. B. (1961): Comparative Biochemistry of the Decay of Sweetgum Sapwood by White-Rot and Brown-Rot Fungi. USDA Forest Service, Technical Bulletin No. 1258: 79 S.

Cox, D. R., Snell, E. J. (1989): Analysis of Binary Data, 2. Auflage. Chapman and Hall, London, 236 S.

Curling, S. F., Clausen, C. A., Winandy, J. E. (2002): Experimental method to quantify progressive stages of decay of wood by basidiomycete fungi. International Biodeterioration & Biodegradation 49(1): 13-19.

Daniel, G., Volc, J., Nilsson, T. (1992): Soft Rot and Multiple T-Branching by the Basidiomycete *Oudemansiella-Mucida*. Mycological Research 96: 49-54.

Danninger, E. (1980): Untersuchungen über Abbaumechanismen holzzerstörender Pilze. Dissertation der Technischen Universität Wien, 110 S.

Dawson-Andoh, B. E., Morrell, J. J. (1991): Screening of *Trichoderma* isolates as potential bioprotectants against *Postia placenta* in Douglas-fir heartwood. Material und Organismen 26(4): 243-246.

Dimitri, L. (1968): Ermittlung der Stammfäule von Fichten (*Picea abies* Karst.) durch Bohrspanentnahme. Forstarchiv 39: 221-224.

DIN 1052 (1988): Holzbauwerke. Beuth, Berlin, 358 S.

DIN 4074 (1989): Teil 1, Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit: Nadelschnittholz. In: DIN-Taschenbuch 31, Normen über Holz. Beuth, Berlin, 12-18.

DIN 19663 (1985): Wildbachverbauung; Begriffe, Planung, Bau. In: DIN Taschenbuch 211. Beuth, Berlin.

DIN 52183 (1977): Prüfung von Holz, Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes. In: DIN Taschenbuch 31, 2000. Beuth, Berlin.

DIN 52185 (1976): Prüfung von Holz, Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser. In: DIN Taschenbuch 31, 2000. Beuth, Berlin.

DIN V ENV (1995): Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau. In: Schneider, K.-J. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Werner, Düsseldorf, 9.1-9.48.

Dix, N. J. (1984): Moisture content and water potential of abcissed leaves in relation to decay. Soil Biology and Biochemistry 16(4): 367-370.

Dix, N. J., Webster, J. (1995): Fungal Ecology. Chapman and Hall, London, 549 S.

Dobrý, J., Rypàcek, V. (1991): Axial growth of wood-destroying fungi in relation to wood sample dimension. Material und Organismen 26(4): 259-268.

Donnelly, D. P., Boddy, L. (1997): Development of mycelial systems of *Stropharia caerulea* and *Phanerochaete velutina* on soil: effect of temperature and water potential. Mycological Research 101(6): 705-713.

Dowson, C. G., Rayner, A. D. M., Boddy, L. (1989): Spatial dynamics and interactions of the woodland fairy ring fungus *Clitocybe nebularis*. New Phytologist 111(4): 699-705.

Dubas, P. (1981): Einführung in die Norm SIA 164 (1981), Autographie zum Fortbildungskurs für Bauingenieure. Lehrstuhl für Baustatik und Stahlbau, ETH Zürich, 334 S.

Duncan, C. G. (1960): Deterioration of wood by lower fungi. Developments in industrial microbiology 1: 147-156.

Eckstein, D., Sass, U. (1994): Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation. Holz als Roh- und Werkstoff 52: 279-286.

Edlund, M.-L. (1998): Durability of wood in ground contact tested in field and laboratory. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 110 S.

Edman, M., Jonnsson, B. G. (2001): Spatial pattern of downed logs and wood-decaying fungi in an old growth *Picea abies* forest. Journal of Vegetation Science 12(5): 609-620.

Egenter, C. (2000): Artenvielfalt und Sukzession holzabbauender Pilze auf Vivian-Sturmschadenflächen. Unveröffentlicher Studienbericht, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 25 S.

Ehlert, I. (1967): Untersuchungen über die Korrosion von Eisen durch säurebildende Bakterien. Materials and Organisms 2: 297-318.

Ejechi, B. O. (1997): Biological Control of Wood Decay in an Open Tropical Environment with *Penicilium sp.* and *Trichoderma viride*. International Biodeterioration and Biodegradation 39(4): 295-299.

Ekman, R., Weissenberg, K. v. (1981): Association between some silvicultural, physical and chemical properties of *Picea abies* and spread of *Fomes annosus*. Acta Academiae Aboensis, Series B 41(2): 1-22.

Emery, T. (1987): Reductive Mechanisms of Iron Assimilation. In: Winkelmann, G. *et al.* (Hrsg.): Iron Transport in Microbes, Plants and Animals. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 235-250.

Enoki, A., Tanaka, H., Fuse, G. (1989): Relationship between degradation of wood and production of H2O2-producing or one-electron oxidases by brown-rot fungi. Wood Science and Technology 23: 1-12.

Eriksson, K.-E. L., Blanchette, R. A., Ander, P. (1990): Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Springer, Berlin, 407 S.

Eslyn, W. E., Lombard, F. F. (1983): Decay in mine timbers. Part II. Basidiomycetes associated with dacay of coal mine timbers. Forest Products Journal 33: 19-23.

Eslyn, W. E. (1986): Utility Pole Decay, Part 4: Growth-Temperature Relations and Decay Capabilities of Eleven Major Utility Pole Decay Fungi. Holzforschung 40(2): 69-77.

Etheridge, D. E. (1962): Selective action of fungus-inhibitory properties of balsam fir heartwood. Canadian Journal of Botany 40: 1459-1462.

Farber, E. (1954): Chemical Deterioration of Wood in the Presence of Iron. Industrial and Engineering Chemistry 46(9): 1968-1972.

Fekete, F. A., Chandhoke, V., Jellison, J. (1989): Iron-Binding Compounds Produced by Wood decaying Basidiomycetes. Applied and Environmental Microbiology 55(10): 2720-2722.

Fengel, D., Wegener, G. (1984): Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Gruyter, Berlin, 613 S.

Findlay, W. (1962): The preservation of timber. A & C Black. Ltd., London, 162 S.

Findlay, W. P. K. (1966): Ecology of Wood-destroying and Wood-inhabiting Fungi. In: Becker, G., Liese, W. (Hrsg.): Holz und Organismen (Beihefte zu Material und Organismen 1). Duncker & Humblot, Berlin, 199-211.

Fischer, H. B., Rinn, F. (1995): Verbesserte Untersuchung des Zustands hölzerner Konstruktionen. BDB Nachrichten Nordhessen / Thüringen 1995(2): 37-42.

Florineth, F. (1990): Holzverwendung bei der biologischen Hang- und Ufersicherung. In: Ingenieurbiologie - Hilfsstoffe im Lebendverbau (Band 5), 85-98.

Florineth, F. (2000): Ingenieurbiologische Hangsicherung. Wildbach und Lawinenverbau 142: 29-42.

Flynn, I. (2000): Schlafen Bäume? Und ist Mondholz wirklich besser? Die Weltwoche 33(51): 509.

Fogel, R., Cromack, K. (1977): Effect of habitat and substrate quality on Douglas-fir litter decomposition in western Oregon. Canadian Journal of Botany 55(12): 1632-1640.

Fontana, M. G., Greene, N. D. (1978): Corrosion Engineering. McGraw-Hill Book Company, New York, 465 S.

Frei, M., Böll, A. (2001): Holz wieder entdeckt: Holzkonstruktionen im Wildbachverbau. tec21 127(41): 13-17.

Frey, B., Scheidegger, C., Günthardt-Georg, M. S., Matyssek, R. (1996): The effects of ozone and nutrient supply on stomatal response in birch leaves (betula pendula) as determined by digital image analysis and X-ray microanalysis. New Phytologist 132: 135-143.

Garraway, M. O., Hüttermann, A., Wargo, P. (1991): Ontogeny and Physiology. In: Shaw, C. G., Kile, G. A. (Hrsg.): *Armillaria* Root Disease, Agriculture Handbook No. 691. USDA Forest Service, Washington D.C., 102-121.

Gäumann, E. (1930): Untersuchungen über den Einfluss der Fällungszeit auf die Eigenschaften des Fichten- und Tannenholzes. Beiheft zu den Zeitschriften des Schweizerischen Forstvereins 6: 155.

Gäumann, E. (1947): Der Einfluss der Meereshöhe auf die Dauerhaftigkeit des Lärchenholzes. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen 25(2): 327-393.

Gersonde, M., Meyer, R. (1964): Das Vorkommen von Moderfäule in Holzmasten. Holz als Roh- und Werkstoff 22(2): 42-47.

Gieck, K., Gieck, R. (1995): Technische Formelsammlung, 30. Auflage. Gieck-Verlag, Germering

Gilbert, B. C., King, D. M., Thomas, C. B. (1984): The oxidation of some polysaccharides by the hydroxyl radical: an e.s.r investigation. Carbohydrate Research 125: 217-235.

Gilbertson, R. L., Ryvarden, L. (1986): North American polypores, Band 1. Fungiflora, Oslo, 433 S.

Gindl, W., Grabner, M., Wimmer, R. (2001): Effects of altitude on tracheid differentiation and lignification of Norway spruce. Canadian Journal of Botany 79: 815-821.

Goodell, B., Jellison, J., Liu, J., Daniel, G., Paszczynski, A., Fekete, F., Krishnamurthy, S., Jun, L., Xu, G. (1997): Low molecular weight chelators and phenolic compounds isolated from wood decay fungi and their role in the fungal biodegradation of wood. Journal of Biotechnology 53: 133-162.

Goos, R. D., Tubaki, K. (1973): Conidium ontogeny in *Riessia semiophora*. Canadian Journal of Botany 51(8): 1439-1442.

Görlacher, R. (1987): Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein „*in situ*"-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte. Holz als Roh- und Werkstoff 45: 273-278.

Görlacher, R., Hättich, R. (1990): Untersuchung von altem Konstruktionsholz: Die Bohrwiderstandsmessung. Bauen mit Holz 90(6): 455-459.

Gottschling, H. (1998): Die Murenkatastrophen vom Juni 1996 im Raume Ferlach - Zell Pfarre (Karawanken) und am Vorderberger Wildbach (Karnische Alpen). Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt Wien 141(2): 167-178.

Graf, E. (1997a): Biogene Gefährdung und Schutzmöglichkeiten für Holz im Aussenbau. Wald und Holz 78(10): 15-18.

Graf, E. (2001): Biologische und biotechnologische Verfahren gegen holzbewohnende Pilze - Eine Übersicht. Holz als Roh- und Werkstoff 59: 356-362.

Graf, E., Meili, M. (2001): Holzzerstörende Pilze und Insekten. Lignatec 14: 1-27.

Graf, F. (1997b): Holzzerstörende Pilze. Proceedings FAN-Kurs 1997, Forstlicher Bachverbau, Stalden (OW), 17 S.

Grammel, R. (1990): Zusammenhänge zwischen Wachstumsbedingungen und holztechnologischen Eigenschaften. Forstwissenschaftliches Centralblatt 109: 119-129.

Gray, A. N., Spies, T. A. (1995): Water content measurements in forest soils and decayed wood using time domain reflectometry. Canadian Journal of Forest Research 25(3): 376-385.

Gregory, S. C. (1984): Micro-organisms isolated from Wounde stems of *Picea sitchensis*. Transactions of the British Mycological Society 83(4): 683-686.

Greig, B. J. W. (1998): Field Recognition and Diagnosis of *Heterobasidion annosum*. In: Woodward, B. *et al.* (Hrsg.): *Heterobasidion annosum*: Biology, Ecology, Impact and Control. CAB International, Wallingford, 35-41.

Greve, U. (1984): Holzbiologische Untersuchungen an Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) unterschiedlicher Immissionstoleranz und Immissionsbelastung. Dissertation Fachbereich Biologie, Universität Hamburg, 137 S.

Griffin, D. H. (1994): Fungal Physiology, 2. Auflage. John Wiley & Sons, New York, 458 S.

Griffin, D. M. (1977): Water potential and wood-decaying fungi. Annual Review of Phytopathology 15: 319-329.

Griffith, G. S., Boddy, L. (1991): Fungal decomposition of attached angiosperm twigs: III. Effect of water potential and temperature on fungal growth, survival and decay on wood. New Phytologist 117: 259-269.

Grinda, M. (1975): Abhängigkeit des Holzabbaus durch Basidiomyceten von der Temperatur. Material und Organismen, Beiheft 3: 187-196.

Gross, M., Metzler, B. (1995): Auftreten und Ausbreitung von Hallimasch in Beregnungspolter. Holz als Roh- und Werkstoff 52: 147-153.

Gross, M., Metzler, B., Schumacher, P. (1996): Hallimaschbefall an beregnetem Sturmholz. AFZ / Der Wald 51(6): 329-332.

Grosser, D. (1985): Pflanzliche und tierische Bau- und Werkholzschädlinge. DRW, Leinfelden-Echterdingen, 159 S.

Gruber, E. (2000): Vergleichende Messergebnisse zur Identifizierung von Schadstellen im Fichtenholz (*Picea abies* (L.) Karst.) mit den Bohrmessgeräten Teredo, Resistograph 1410 und Impulshammer-Schallmesssysem. Schallmessungen und Bohrdiagramme an intaktem Holz. Allgemeine Forst- und Jagdzeitschrift 171(12): 223-227.

Gruber, E. (2001): Vergleichende Messergebnisse zur Identifikation von Schadstellen im Fichtenholz (*Picea abies* (L.) Karst.) mit den Bohrgeräten Teredo, Resistograph 1410 und Impulshammer-Schallmesssystem. Bohrdiagramme an rotfaulem Holz und Diskussion. Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung 172(1): 1-7.

Guerinot, M. L. (1994): Microbial Iron Transport. Annual Review of Microbiology 48: 743-772.

Guillaumin, J. J., Anderson, J. B., Legrand, P., Ghahari, S., Berthelay, S. (1996): A comparison of different methods for the identification of genets of *Armillaria* spp. New Phytologist 133: 333-343.

Habermehl, A., Ridder, H. W. (1992): Methodik der Computer-Tomographie zur zerstörungsfreien Untersuchung des Holzkörpers von stehenden Bäumen. Holz als Roh- und Werkstoff 50: 465-474.

Hale, M. D., Eaton, R. A. (1985a): The Ultrastructure of Soft Rot Fungi .2. Cavity-Forming Hyphae in Wood Cell-Walls. Mycologia 77(4): 594-605.

Hale, M. D., Eaton, R. A. (1985b): Oscillatory Growth of Fungal Hyphae in Wood Cell-Walls. Transactions of the British Mycological Society 84(MAR): 277-288.

Hallenberg, N. (1984): A taxonomic analysis of the *Sistotrema brinkmannii* complex. Mycotaxon 21: 389-411.

Hampel, R. (1974): Die Wirkungsweise von Wildbachsperren. Wildbach und Lawinenverbau 38(1): 1-79.

Hansen, E. M., Stenlid, J., Johansson, M. (1993): Genetic-control of somatic incompatibility in the root-rotting basidiomycete *Heterobasidion annosum*. Mycological Research 97: 1229-1233.

Hapla, F. (1992): Holzqualität von Kiefern aus einem Waldschadensgebiet nach fünfjähriger Nasslagerung. Holz als Roh- und Werkstoff 50: 268-274.

Harju, A. M., Venäläinen, M., Beuker, E., Velling, P., Viitanen, H. (2001): Genetic variation in the decay resistance of Scots pine wood against brown rot fungus. Canadian Journal of Forest Research 31: 1244-1249.

Harmon, M. E. (1982): Decomposition of Standing Dead Trees in the Southern Appalachian Mountains. Oecologia 52: 214-215.

Harmon, M. E., Franklin, J. F., Swanson, F. J., Sollins, P., Gregory, S. V., Lattin, J. D., Anderson, N. H., Cline, S. P., Aumen, N. G., Sedell, J. R., Lienkaemper, G. W., Cromack, K., Cummins, K. W. (1986): Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. Advances in Ecological Research 15: 133-302.

Harmon, M. E., Sexton, J. (1995): Water balance of conifer logs in early stages of decomposition. Plant and Soil 172: 141-152.

Hedley, M. E., Drysdale, J. A. (1985): Decay of Preservative Treated Softwood Posts Used in Horticulture in New Zealand. Material und Organismen 20: 35-51.

Heim, A., Luster, J., Brunner, I., Frey, B., Frossard, E. (2000): Effects of aluminium treatment on Norway spruce roots: Aluminium binding forms, element distribution, and release of organic substances. Plant and Soil 216: 103-116.

Heiz, U. (2001): Mechanische Stabilität ausgewählter Baumarten unter quasistatischer Windeinwirkung. Unveröff. Diplomarbeit Departement Forstwissenschaften, ETH Zürich, 166 S.

Helinska-Raczkowska, L., Raczkowski, J. (1978): Creep in Pine Wood Subjected Previousliy to Atmorspheric Corrosion in Contact with Rusting Iron. Holzforschung und Holzverwertung 30(3): 50-54.

Helms, D., Niemz, P. (1994): New applications of the drill resistance method for quality evaluation of wood and wood products. 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 95-102.

Hess, J., Wüthrich, R. (1997): Exkursionsführer. Proceedings FAN-Kurs 1997, Forstlicher Bachverbau, Stalden (OW), 24 S.

Hess, J. (1998): Die Unwetterkatastrophe vom 15. August 1997 in Sachseln, Kt. Obwalden. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 149(9): 707-714.

Highley, T. L. (1980): Degradation of Cellulose by *Poria placenta* in the Presence of Compounds that Affect Hydrogen Peroxide. Material und Organismen 15(2): 81-90.

Highley, T. L., Bar-Lev, S. S., Kirk, T. K., Larsen, M. L. (1983): Influence of O_2 and CO_2 on Wood Decay by Heartrot and Saprot Fungi. Phytopathology 73: 630-633.

Highley, T. L. (1984a): Protecting piles from decay - end treatments. Material und Organismen 19(2): 149-156.

Highley, T. L. (1984b): Protecting piles from decay: End Treatments. Materials and Organisms 19(1): 149-156.

Highley, T. L., Scheffer, T. C. (1991): In-place treatments for preventing decay in waterfront structures. Material und Organismen 26(1): 1-11.

Highley, T. L. (1995): Comparative Durability of Untreated Wood in Use Above Ground. International Biodeterioration and Biodegradation 35(4): 409-419.

Highley, T. L. (1999): Biodeterioration of Wood. In: USDA Forest Service, F. P. L. (Hrsg.): Wood handbook - Wood as an engineering material (Band FPL-GTR 113)Madison WI, 463.

Hintikka, V. (1969): Acetic tolerance in wood and litter-decomposing Hymenomycetes. Karstenia X: 177-183.

Hirt, R. (1990): Holzbauwerke in der Ingenieurbiologie. In: Ingenieurbiologie - Hilfsstoffe im Lebendverbau (Band 5), 79-83.

Hjortstam, K., Larsson, K.-H., Ryvarden, L. (1988): The Corticiaceae of North Europe, Band 1. Fungiflora, Oslo, 60 S.

Högberg, N., Holdenrieder, O., Stenlid, J. (1999): Population structure of the wood decay fungus *Fomitopsis pinicola*. Heredity 83: 354-360.

Holdenrieder, O., Baumann, E., Schmid-Haas, P. (1994): Isolation of decay fungi from increment cores: Frustrating experiences from Switzerland. Proceedings of the Eight International Conference on Root and Butt Rots, 577-581.

Holdenrieder, O., Greig, B. J. W. (1998): Biological Methods of Control. In: Woodward, B. *et al.* (Hrsg.): *Heterobasidion annosum*: Biology, Ecology, Impact and Control. CAB International, Wallingford, 235-258.

Holmer, L., Stenlid, J. (1993): The importance of inoculum size for the competitive ability of wood decomposing fungi. FEMS Microbiology Ecology 12: 169-176.

Holmer, L., Nitare, L., Stenlid, J. (1994): Population structure and decay pattern of *Phellinus tremulae* in *Populus tremula* as determined by somatic incompatibility. Canadian Journal of Botany 72: 1391-1396.

Honold, A., Rexer, K. H., Oberwinkler, F. (1994): Pilz-Baum-Interaktionen in Sturmwurfflächen und stehenden Nachbarbeständen. Veröffentlichungen PAÖ 8: 401-414.

Honold, A., Oberwinkler, F. (1999): Sukzession saprophytischer und parasitischer Pilze im Fichtentotholz von Sturmwurfflächen; Abschlussbericht PAÖ N 97 003. Spezielle Botanik / Mykologie, Universität Tübingen, 22 S.

Hughes, M. N., Poole, K. (1991): Metal speciation and microbial growth - the hard (and soft) facts. Journal of General Microbiology 137(1): 725-734.

Hyde, S. M., Wood, P. M. (1997): A mechanism for production of hydroxyl radicals by the brown-rot fungus *Coniophora puteana*: Fe(III) reduction by cellobiose dehydrogenase and Fe(II) oxidation at a distance from the hyphae. Microbiology 143: 259-266.

IML (2000): B-Tools Pro. Wiesloch (D) Instrumenta Mechanik Labor GmbH: Version 1.8.

Jacobson, K. M., Miller, O. K., Turner, B. J. (1993): Randomly amplified polymorphic DNA-markers are superior to somatic incompatibility tests for discriminating genotypes in natural populations of ectomycorrhizal fungus *Suillus granulatus*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the united States of America 90(19): 9159-9163.

Jahn, E. (1967): Beiträge zur Biologie holzzerstörender Pilze. II. Abbau von Buchenholz (*Fagus silvatica* L.) verschiedener Herkunft durch Weissfäulepilze. Archiv für Forstwesen 16(10): 1033-1047.

Jahn, H. (1979): Pilze die an Holz wachsen. Busse, Herford, 268 S.

Janotta, O. (1999): Anforderungen an den konstruktiven und chemischen Holzschutz. Holzforschung und Holzverwertung 51(2): 23.

Jellison, J., Chen, Y., Fekete, F. (1997a): Hyphal Sheath and Iron-Binding Compound Formation in Liquid Cultures of Wood Decay Fungi *Gloeophyllum trabeum* and *Postia placenta*. Holzforschung 51(6): 503-510.

Jellison, J., Connolly, J., Goodell, B., Doyle, B., Illman, B., Fekete, F., Ostrofsky, A. (1997b): The Role of Cations in the Biodegradation of Wood by the Brown Rot Fungi. International Biodeterioration and Biodegradation 39(2/3): 165-179.

Jensen, F. K. (1967): Oxygen and carbon dioxide affect the growth of wood-decaying fungi. Forest Science 13: 384-389.

Johannesson, H., Stenlid, J. (1999): Molecular identification of wood-inhabiting fungi in an unmanaged *Picea abies* forest in Sweden. Forest Ecology and Management 115: 203-211.

Johnson, G. C., Martin, A. K. (1992): Survival of wood-inhabiting fungi stored for 10 years in water and under oil. Canadian Journal of Microbiology 38: 861-864.

Jones, J. G. (1986): Iron Transformation by Freshwater Bacteria. Advances in Microbial Ecology 9: 149-185.

Josefsson, H. (2002): Long-distance dispersal in wood-decaying basidiomycetes. Department of Ecology and Environmental Science, Umeå University, 20 S.

Jülich, W. (1984): Die Nichtblätterpilze, Gallertpilze und Bauchpilze: Aphyllophorales, Heterobasidiomycetes, Gastromycetes. Fischer, Stuttgart, 626 S.

Käärik, A. (1968): Colonisation of pine and spruce poles by soil fungi after twelve and eighteen months. Materials and Organisms 3: 185-198.

Käärik, A. (1974): Decomposition of wood. In: Dickinson, C. H., Pugh, G. J. F. (Hrsg.): Biology of Plant Litter Decomposition (Band 1), 129-174.

Kallio, T., Hallaksela, A. M. (1979): Biological control of *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. (*Fomes annosus*) in Finland. European Journal of Forest Pathology 9: 298-308.

Kappenberger, G., Kerkmann, J. (1998): Il tempo in montagna: Manuale di meteorologia alpina, 2. Auflage. Zanichelli, Bologna, 255 S.

Kienholz, H., Keller, H. M., Ammann, W., Weingartner, R., Germann, P. F., Hegg, C., Mani, P., Rickenmann, D. (1998): Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich, 209 S.

Kile, G. A., McDonald, G. I., Byler, J. W. (1991): Ecology and Disease in Natural Forests. In: Shaw, C. G., Kile, G. A. (Hrsg.): *Armillaria* Root Disease, Agriculture Handbook No. 691. USDA Forest Service, Washington D.C., 102-121.

Kim, Y. S., Barnes, H. M., Lyon, D. E. (1994): Effect of Decay on the Mechanical Properties of full-Sized Lumber. Holzforschung 48(2): 145-149.

Kirk, P. M., Cannon, P., David, J. C., Stalpers, J. A. (2001): Ainsworth and Bisby's Dictionary of the Fungi, 9. Auflage. CABI Biosciences, Egham, 624 S.

Kirk, T. K. (1973): The Chemistry and Biochemistry of Decay. In: Nicholas, D. D., Loos, W. E. (Hrsg.): Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Syracuse University Press, Syracuse, 149-181.

Knigge, W., Schulz, H. (1966): Grundriss der Forstbenutzung. Parey, Hamburg, Berlin, 584 S.

Koenigs, J. W. (1972): Produciton of Extracellular Hydrogen Peroxide and Peroxidase by Wood-Rotting Fungi. Phytopathology 62(1): 100-110.

Koenigs, J. W. (1974a): Hydrogen peroxide and iron: A proposed system for decomposition of wood by brown-rot basidiomycetes. Wood and Fiber 6(1): 66-80.

Koenigs, J. W. (1974b): Produciton of Hydrogen Peroxide by Wood-Rotting Fungi in Wood and Its Correlation with Weight Loss, Depolymerization and pH Changes. Archives of Microbiology 99: 129-145.

Kollmann, F., Schneider, A. (1959): Sorptionsmessungen an mit Salzen imprägnierten Hölzern. Holz als Roh- und Werkstoff 17(1): 212-219.

Korhonen, K. (1978): Interfertility and colonal size in the *Armillaria mellea* complex. Karstenia 18: 31-42.

Kotoulas, D. (1972): Die Wildbäche Süddeutschlands und Griechenlands: Teil 1. Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München, Bericht Nr. 25, 177 S.

Kramer, H., Akça, A. (1995): Leitfaden zur Waldmesslehre, 3. Auflage. Sauerländer, Frankfurt, 266 S.

Kubler, H. (1992): Corrosion of nails in wood construction interfaces. Forest Products Journal 42(1): 47-49.

Kucera, L., Gfeller, B. (1994): Einheimische und fremdländische Nutzhölzer. Merkmale und Eigenschaften der in der Schweiz gebräuchlichsten Holzarten. Professur Holzwissenschaften, Zürich, 144 S.

Kucera, L. J., Bosshard, H. H. (1989): Holzeigenschaften geschädigter Fichten. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin, 182 S.

Kuprik, W., Wazny, J. (1978): Letaltemperaturen für die holzzerstörenden Pilze *Coniophora puteana* Fr. und *Gloeophyllum sepiarium* (Wulf.) Karst. Material und Organismen 13(4): 1-12.

Lambert, R. L., Lang, G. E., Reiners, W. A. (1980): Loss of mass and chemical changes in decaying boles of a subalpine balsam fir forest. Ecology 61(6): 1460-1473.

Lamprecht, J. (1992): Biologische Forschung: Von der Planung bis zur Publikation. Parey, Berlin, 158 S.

Länger, E. (1999): Die Entwicklung der Wildbachverbauungstätigkeit in Österreich mit besonderer Berücksichtigung der Erhaltungsarbeiten und der Lebensdauer der Verbauungen. Wildbach und Lawinenverbau 139: 7-26.

Legrand, P., Guillaumin, J. J. (1993): *Armillaria* species in the forest ecosystems of the Auvergne (Central France). Acta Oecologica 14(3): 389-403.

Levi, M. P. (1973): Control Methods. In: Nicholas, D. D. (Hrsg.): Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Syracuse University Press, Syracuse, 183-216.

Levy, J. F., Lloyd, F. J. (1960): A study of the fungi present in timbers in Tywarnhale Mine. Journal of the Institute of Wood Science 6: 14-25.

Levy, J. F., Stevens, M. (1965): The initiation of attack by soft rot fungi in wood. Journal of the Institute of Wood Science 3(16): 49-55.

Levy, J. F. (1968): Studies on the ecology of fungi in wooden fence posts. In: Walters, A. H., Elphick, J. J. (Hrsg.): Biodeterioration of materials. Elsevier, Amsterdam, 424-429.

Levy, J. F. (1982): The place of basidiomycetes in the decay of wood in contact with the ground. In: Frankland, J. C. *et al.* (Hrsg.): Decomposer basidiomycetes: Their biology and ecology. Cambridge University Press, Cambridge, 161-178.

Lienert, S. (1991): Rutschung und Verbauungsprojekt „Ruostel". Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 142(7): 554-463.

Liese, W., von Pechmann, H. (1959): Untersuchungen über den Einfluss von Moderfäulepilzen auf die Holzfestigkeit. Forstwissenschaftliches Centralblatt 78: 271-279.

Liese, W. (1963): Neue Befunde über den Abbau des Holzes durch Pilze. Holz-Zentralblatt 89(34): 505-507.

Liese, W. (1964): Über den Abbau verholzter Zellwände durch Moderfäulepilze. Holz als Roh- und Werkstoff 22(8): 289-295.

Liese, W., Ammer, U. (1964): Über den Befall von Buchenholz durch Moderfäulepilze in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. Holzforschung 18(4): 97-102.

Liese, W., Peek, R. D. (1987): Erfahrungen bei der Lagerung und Vermarktung von Holz im Katastrophenfall. Allgemeine Forstzeitschrift 42: 909-912.

Lohwag, K. (1963): Mykologische Testung von Holz. Holzforschung und Holzverwertung 15(4): 110-111.

Lohwag, K. (1965): Zur Abbauintensität des Pilzes *Polystictus abietinus* (Dicks.) Fr. Holz als Roh- und Werkstoff 23: 1-2.

Lundborg, A. (1988): Deformation of agar by wood decaying fungi - a possible indication of the ocurrence of radicals. Material und Organismen 23(4): 259-269.

Luschka, N. (1993): Die Pilze des Nationalpark Bayrischer Wald. Hoppea 53: 374 S.

Machado, J. L., Reich, P. B. (1999): Evaluation of several measures of canopy openness as predictors of photosynthetic photon flux density in deeply shaded conifer-dominated forest understory. Canadian Journal of Forest Research 29(9): 1438-1444.

MacMillan, P. C. (1988): Decomposition of coarse woody debris in an old-growth Indiana forest. Canadian Journal of Forest Research 18(11): 1353-1362.

Madsen, B., Buchanan, A. H. (1986): Size effects in timber explained by a modified weakest link theory. Canadian Journal of Civil Engineering 13: 218-232.

Madsen, B. (1992): Structural Behaviour of Timber. Timber Engineering Ltd, Vancouver, 405 S.

Malik, M., Vilgalys, R. (1999): Somatic Incompatibility in Fungi. In: Worrall, J. J. (Hrsg.): Structure and Dynamics of Fungal Populations. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 123-138.

Mandallaz, D., Schlaepfer, R., Arnould, J. (1986): Dépérissement des forêts: essai d'analyse des dépendances. Annales des sciences forestières 43(4): 441-458.

Mani, P. (1999): Das System Wildbach - Analyse mit Hilfe der Systemdynamik. Proceedings der Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, Bramois (Kt. Wallis), 7-15.

Marian, J. E., Wissing, A. (1960a): The Chemical and Mechanical Deterioration of Wood in Contact with Iron: Part 1. Mechanical Deterioration. Svensk Papperstidning 63(3): 47-57.

Marian, J. E., Wissing, A. (1960b): The Chemical and Mechanical Deterioration of Wood in Contact with Iron: Part 2. Chemical Decomposition. Svensk Papperstidning 63(4): 98-106.

Marui, H. (1996): Grundgedanken für landschaftsökologisch gerechte Wildbachverbauung. Internationales Symposion Interpraevent 5, Garmisch-Partenkirchen, 109-118.

Mattheck, C., Bethge, K., Albrecht, W. (1997): How to read the results of Resistograph M. Arboricultural Journal 21: 331-346.

Mattheck, C., Hötzel, H.-J. (1997): Baumkontrolle mit VTA. Rombach, Freiburg im Breisgau, 187 S.

Matzanke, B. F. (1994): Iron Storage in Fungi. In: Winkelmann, G., Winge, D. R. (Hrsg.): Metal Ions in Fungi. Dekker, New York, 179-214.

Meierhofer, U. A., Zumoberhaus, M. (1992): Holzkonstruktionen im Wanderwegbau, Band 153. BUWAL, 1-110 S.

Meijer, G., Megnegneau, B., Linders, E. (1994): Variability for isoenzyme, vegetative compatibility and RAPD markers in natural populations of *Phomopsis subordinaria*. Mycological Research 98(3): 267-276.

Meredith, D. S. (1960): Further Observations on Fungi Inhabiting Pine Stumps. Annals of Botany N.S. 24: 63-78.

Metzler, B. (1994): Die Luftversorgung des Hallimasch in nassem Fichtenholz. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes 6: 292-294.

Mischler-Schrepfer, V. (2000): Der Einfluss der Waldlagerung von Fichten-Rundholz auf die Längs-Zugeigenschaften des Schnittholzes. ETH Zürich,Zürich. 238 S.

Mizumoto, S. (1966): The Effect of Decay caused by *Gloeophyllum trabeum* on the Strength Properties of Japanese Red Pine Sap-wood. Japanes Journal of the Forestry Society 48(1): 7-11.

Molnar, S. (1993): Die technischen Eigenschaften von Robinienholz. In: Gehri, E., Kucera, L. (Hrsg.): Das Holz der Robinie. Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten. Professur für Holztechnologie, ETH Hönggerberg, Zürich, 21-39.

Morrell, J. J., Zabel, R. A. (1985): Wood strength and weight losses caused by soft rot fungi isolated from treated southern pine utility poles. Wood and Fiber 17(1): 132-143.

Morrell, J. J., Graham, R. D., Helsing, G. G. (1993): Protecting Douglas-fir pile tops from internal decay - a 15-year field trial. Forest Products Journal 43(6): 63-65.

Morrell, J. J., Freitag, C. M., Smith, S. M., Corden, M. E., Graham, R. D. (1996): Basidiomycete colonization in Douglas-fir poles after 3 or 6 months of air-seasoning. Forest Products Journal 46(5): 56-63.

Morrison, D. J., Williams, R. E., Whitney, R. D. (1991): Infection, Disease Development, Diagnosis, and Detection. In: Shaw, C. G., Kile, G. A. (Hrsg.): *Armillaria* Root Disease, Agriculture Handbook No. 691. USDA Forest Service, Washington D.C., 62-75.

Mounce, I. (1929): Studies in forest pathology: II. The biology of *Fomes pinicola* (SW.) Cooke. Canada, Department of Agriculture: Bulletin No. 111 New Series: 75.

Müller, R. (1943): Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. Dissertation der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 193 S.

Murmanis, L., Highley, T. L., Palmer, J. G. (1988): The action of isolated brown-rot cell-free culture filtrate, H_2O_2-Fe^{++}, and the combination of both on wood. Wood Science and Technology 22: 59-66.

Næsset, E. (1999): Decomposition rate constants of *Picea abies* logs in southeastern Norway. Canadian Journal of Forest Research 29(3): 372-381.

Narayanamurti, D., Verma, G. M. (1963): The Effect of Size of Timber Specimens on their Decay Resistance. Holzforschung und Holzverwertung 15(2): 30-33.

Negrutskiy, M. N., Soukhomlin, M. M., Zaporozchenko, Y. V., Demechenko, S. I. (1998): The influence of Fe^{++} and Fe^{+++} upon physiology and development of wood-attacking fungi. 9th International Conference on Root and Butt Rots, Carcans-Maubuisson (F), 341-347.

Neilands, J. B., Konopka, K., Schwyn, B., Coy, M., Francis, R. T., Paw, B. H., Bagg, A. (1987): Comparative biochemistry of microbial iron assimilation. In: Winkelmann, G. *et al.* (Hrsg.): Iron Transport in Microbes, Plants and Animals. VCH Verlagsgesellschaft, New York, 3-33.

Niemz, P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW, Leinfelden-Echterdingen, 243 S.

Niemz, P., Zürcher, E., Kucera, L. J., Bernatowicz, G. (1997): Prüfung von vor 160 Jahren unter Wasser verbautem Holz. Schweizer Ingenieur und Architekt 115(48): 19-22.

Niemz, P., Bodmer, H.-C., Kucera, L. J., Ridder, H.-W., Habermehl, A., Wyss, P., Zürcher, E., Holdenrieder, O. (1998a): Eignung verschiedener Diagnosemethoden zur Erkennung von Stammfäule bei Fichte. Scheizerische Zeitschrift für Forstwesen 149(8): 615-630.

Niemz, P., Kucera, L., Bernatowicz, G. (1998b): Untersuchungen zur Holzqualität von rotfaulem Fichtenholz. Drevarsky Vyskum 43(1): 1-12.

Niemz, P., Graf, E., Lanz, B. (2001): Einfluss von Pilzbefall auf Fichten- und Buchenholz. Holz-Zentralblatt 127(153): 1952.

Niemz, P., Bues, C. T., Herrmann, S. (2002): Die Eignung von Schallgeschwindigkeit und Bohrwiderstand zur Beurteilung von simulierten Defekten in Fichtenholz. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 153(6): 201-209.

Nilsson, T., Daniel, T. K., Kirk, T. K., Obst, J. R. (1989): Chemistry and microscopy of wood decay by some higher Ascomycetes. Holzforschung 43(11-18)

Noetzli, C. (1999): Sind Murgänge zähmbar? Prättigauer und Herrschäftler 99(94): 4-5.

Norden, B. (1997): Genetic variation within and among populations of *Fomitopis pinicola* (Basidiomycetes). Nordic Journal of Botany 17(3): 319-329.

Økland, B., Hågvar, S. (1994): The insect fauna associated with carpophores of the fungus *Fomitopsis pinicola* (Fr.) Karst. in a southern Norwegian spruce forest. Fauna Norvegica Serie B 41: 29-42.

Ostrofsky, A., Jellison, J., Smith, K., Shortle, W. (1997): Changes in cation concentrations in red spruce wood decayed by brown rot fungi and white rot fungi. Canadian Journal of Forest Research 27: 567-571.

Ott, E. K., Frehner, M., Lüscher, P. (1997): Gebirgsnadelwälder: ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Haupt, Bern, 287 S.

Pagnoncini, C. (1988): Holzverwendung in der Ingenieurbiologie. Wald und Holz 70: 580-587.

Panshin, A. J., Zeeuw, C. (1970): Textbook of Wood Technology, Band 1, 3. Aufl. Auflage. McGraw-Hill Book Company, New York, 704 S.

Park, D. (1968): The Ecology of Terrestrial Fungi. In: Ainsworth, G. C., Sussman, A. S. (Hrsg.): The Fungi (Band 3: The Fungal Population). Academic Press, New york, 5-39.

Pasanen, A. L., Kasanen, J. P., Rautiala, S., Ikäheimo, M., Rantamäki, J., Kääriäienen, H., Kalliokoski, P. (2000): Fungal growth and survival in building materials under fluctuating moisture and temperature conditions. International Biodeterioration & Biodegradation 46: 117-127.

Paszczynski, A., Crawford, R. L., Blanchette, R. A. (1988): Delignification of Wood Chips and Pulps by Using Natural and Synthetic Porphyrins: Models of Fungal Decay. Applied and Environmental Microbiology 54(1): 62-68.

Peralta, P. N., Syme, J. H., Mcallister, R. H. (1993): Water storage and plywood processing of hurricane-downed southern pine timber. Forest Products Journal 43: 53-58.

Phillips, E. W. J. (1970): Identification of Softwoods: Forest Products Research Bulletin No. 22. Her Majesty's Stationary Office, London, 56 S.

Plattner, E. (1974): 90 Jahre Wildbach und Lawinenverbauung. Wildbach und Lawinenverbau 38(2): 85-89.

Purslow, D. F. (1962): The effect of specimen size on the life of timber in contact with the ground. Wood 27: 99-100.

Rapp, A. O., Peek, R. D., Sailer, M. (2000): Modelling the Moisture Induced Risk of Decay for Treated and Untreated Wood Above Ground. Holzforschung 54: 111-118.

Raymond, K. N., Carrano, C. J. (1979): Coordination Chemistry and Microbial Iron Transport. Accounts of Chemical Research 12: 183-190.

Rayner, A. D. M., Todd, N. K. (1979): Population and Community Structure and Dynamics of Fungi in Dacaying Wood. Advances in Botanical Research 7: 380-420.

Rayner, A. D. M., Boddy, L. (1988): Fungal Decomposition of Wood: Its Biology and Ecology. John Wiley & Sons, Chichester, 587 S.

Rayner, A. D. M., Beeching, J. R., Crowe, J. D., Watkins, Z. R. (1999): Defining Individual Fungal Boundaries. In: Worrall, J. J. (Hrsg.): Structure and Dynamics of Fungal Populations. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 19-42.

Reinhardt, H. W. (1973): Ingenieurbaustoffe. Ernst, Berlin, 270 S.

Rennerfelt, E. (1948): Some investigations on the capacity of some decay fungi to attack sapwood and heartwood of Scots pine. Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut 36(9): 1-124.

Richards, D. B. (1954): Physical Changes in Decaying Wood. Journal of Forestry: 260-265.

Rickli, C. (1997): Holzbauwerke im forstlichen Bachverbau. Proceedings FAN-Kurs 1997, Forstlicher Bachverbau, Stalden (OW), 20 S.

Rickli, C. (2001): Vegetationswirkungen und Rutschungen. Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 97 S.

Rinn, F., Becker, B., Kromer, B. (1990): Penetration-resistance measurements: density profiles of conifers and deciduous trees. Proceedings of the International Dendrochronological Symposium, Ystad, South Sweden, 274-276.

Rinn, F. (1994a): Baum- und Bauholzinspektionen mit dem RESISTOGRAPH: Anwendung und Auswertung: Messprofile und ihre Interpretation. Proceedings of the First European Symposium on Nondestructive Evaluation of Wood, September 21-23. University of Sopron, Hungary, 95-104.

Rinn, F. (1994b): Catalog of relative density profiles of trees, poles, and timber derived from Resistograph micro-drillings. 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Madison, Wisconsin, U.S.A, 61-67.

Rinn, F., Schweingruber, F. H., Schär, E. (1996): RESISTOGRAPH and X-Ray Density Charts of Wood: Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-Ray Density Charts of Different Wood Species. Holzforschung 50: 303-311.

Ritschkoff, A. (1996): Decay mechanisms of brown-rot fungi. VTT Publications 268, Technical Research Center of Finland, , Espoo, 186 S.

Ritter, G. (1990): Der wellige Streifenporling, ein Bergwerkspilz an nassem Grubenholz. Holztechnologie 30(5): 261-263.

Rizzo, D. M., Harrington, T. C. (1988): Root and Butt Rot Fungi on Balsam Fir and Red Spruce in the White Mountains, New Hampshire. Plant Disease 72: 329-331.

Rohmeder, E. (1937): Die Stammfäule (Wurzelfäule und Wundfäule) der Fichtenbestockung. Mitteilungen der Landforstverwaltung Bayerns, Heft 23, München, 166 S.

Roll-Hansen, F., Roll-Hansen, H. (1980): Microorganisms which invade *Picea abies* in seasonal stem wounds: I. General aspects, Hymenomycetes. European Journal of Forest Pathology 10: 321-339.

Ruddick, J. N. R., Kundzewicz, A. W. (1991): Bacterial movement of iron in waterlogged soil and its effect on decay in untreated wood. Material und Organismen 26(3): 171-181.

Ruske, W. (1983): Holz im Wasserbau. Tiefbau - Ingenieurbau - Strassenbau 9: 510-512.

Rypácek, V., Jahn, E. (1966): Biologie holzzerstörender Pilze. Fischer, Jena, 211 S.

Ryvarden, L., Gilbertson, R. L. (1993): European polypores, Band 1. Fungiflora, Oslo, 387 S.

Savory, J. G. (1954): Breakdown of timber by Ascomycetes and fungi imperfecti. Annals of Applied Biology 41(2): 336-347.

Schánel, L. (1976): Role of carbon dioxide in growth and decaying activity of wood-rotting fungi. Universita J.E. Purkyne v Brne, Brno, 54 S.

Scheffer, T. C., Livingston, B. E. (1937): Relation of oxygen pressure and temperature to growth and carbon-dioxide production in the fungus *Polystictus versicolor*. American Journal of Botany 24(3): 109-119.

Scheffer, T. C., Cowling, E. B. (1966): Natural resistance of wood to microbial deterioration. Annual Review of Phytopathology 4: 147-170.

Scheffer, T. C. (1973): Microbiological Degradation and the Causal Organisms. In: Nicholas, D. D., Loos, W. E. (Hrsg.): Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Syracuse University Press, Syracuse, 31-106.

Scheffer, T. C. (1986): O_2 requirements for growth and survival of wood-decaying an sapwood-staining fungi. Canadian Journal of Botany 64: 1957-1963.

Schickhofer, G., Hasewend, B. (1999): Entwicklung widerstandsfähiger Holzbauprodukte mit dem Hartholz Robinie. Abschlussbericht Nr. LR 9801/4. Technische Universität Graz / Lignum Research, Graz, 7 S.

Schindler, A. (1888): Die Wildbach- und Fluss-Verbauung nach den Gesetzen der Natur. Hofer & Burger, Zürich, 81 S.

Schmidt, O., Dietrichs, H.-H. (1975): Zur Aktivität von Bakterien gegenüber Holzkomponenten. Material und Organismen, Beiheft 3: 91-102.

Schmidt, O. (1994): Holz- und Baumpilze: Biologie, Schäden, Schutz, Nutzen. Springer, Berlin, 246 S.

Schmidt, O., Schmitt, U., Moreth, U., Potsch, T. (1997): Wood Decay by the White-Rotting Basidiomycete *Physisporinus vitreus* from a Cooling Tower. Holzforschung 51: 193-200.

Schmidt-Vogt, H. (1986): Die Fichte, Band II/1. Parey, Hamburg, 607 S.

Schmitt, M. (2000): Überprüfung der Holzmasten mittels Resistographen, In: ENBW Energie AG, Forschungsbericht 2000, 32 S.

Schmitz, H., Kaufert, F. (1938): Studies in Wood Decay, VII - How long can wood-destroying fungi endure immersion in water. Proceedings of the Thirty-Fourth Annual Meeting of the American Wood-Preservers' Association, 83-87.

Schoeman, M. W., Webber, J. F., Dickinson, D. J. (1996): The effect of diffusible metabolites of *Trichoderma harzianum* on in vitro interactions between basidiomycete isolates at two different temperature regimes. Mycological Research 100(12): 1454-1458.

Schütz, J. P., Brang, P. (1995): L'horizontoscope: un étonnant outil pratique de sylviculture, notamment en haute montagne. ONF Bulletin Technique 28: 1-9.

Schwarze, F. (1995): Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzzersetzenden Pilzen in lebenden Bäumen und *in vitro*. svk-Verlag, Erndtebrück, 163 S.

Schwarze, F. W. M. R., Fink, S. (1994): Ermittlung der Holzzersetzung am lebenden Baum: Möglichkeiten und Grenzen verschiedener Diagnosemethoden zur Erfassung von Holzzersetzungsmustern. Neue Landschaft 39: 182-193.

Schwarze, F. W. M. R., Lonsdale, D., Mattheck, C. (1995): Detectability of wood decay caused by Ustulina deusta in comparison with other tree-decay fungi. European Journal of Forest Pathology 25: 327-341.

Schwarze, F. W. M. R., Baum, S., Fink, S. (2000a): Dual modes of degradation by *Fistulina hepatica* in xylem cell walls of *Quercus robur*. Mycological Research 104(7): 846-852.

Schwarze, F. W. M. R., Engels, J., Mattheck, C. (2000b): Fungal strategies of wood decay in trees. Springer, Berlin, 185 S.

Schwarze, F. W. M. R., Landmesser, H. (2000): Preferential degradation of pit membranes within tracheids by the basidiomycete Physisporinus vitreus. Holzforschung 54(5): 461-462.

Schweingruber, F. H. (1980): Dichteschwankungen in Jahrringen von Nadelhölzern in Beziehung zu klimatisch-ökologischen Faktoren, oder das Problem falscher Jahrringe. Bericht der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen 213, Birmensdorf, 35 S.

Schweingruber, F. H. (1990): Anatomie europäischer Hölzer. Haupt, Bern, 800 S.

Schwyn, B., Neilands, J. B. (1987): Universal Chemical Assay for the Detection and Determination of Siderophores. Analytical Biochemistry 160: 47-56.

Score, A. J., Bruce, A., King, B., Palfreyman, J. W. (1998): The biological control of *Serpula lacrymans* by *Trichoderma* species. Holzforschung 52(2): 124-132.

Seckendorff, A. F. (1886): Das forstliche System der Wildbach-Verbauung. Selbstverlag des Verfassers, Wien, 27 S.

Senn-Irlet, B., Bieri, C., Herzig, R. (1997): Provisorische Rote Liste der gefährdeten höheren Pilze der Schweiz. Mycologia Helvetica 9(2): 81-110.

Sexton, C. M., Smith, S. M., Morrell, J. J., Kropp, B. R., Corden, M. E., Graham, R. D. (1992): Identity and distribution of Basidiomycotina colonizing Douglas fir poles during three years of air-seasoning. Mycological Research 96(5): 321-330.

Shearer, C. A. (1994): Fungal competition. Can. J. Bot. 73: 1259-1264.

SIA 164 (1992): Holzbau. Norm. Schweiz. Ing. Archit., Zürich, 76 S.

Siau, J. F. (1984): Transport Processes in Wood. Springer, Berlin etc., 245 S.

Sieber, T. N. (1989): Endophytic Fungi in Twigs of Healthy and Diseased Norway Spruce and White Fir. Mycological Research 92: 322-326.

Sieber, T. N. (1995): *Pyrenochaeta ligni-putridi* sp. nov., a new coelomycete associated with butt rot of *Picea abies* in Switzerland. Mycological Research 99(3): 274-276.

Skaar, C. (1988): Wood-water relations. Springer, Berlin, 283 S.

Smith, K., Shortle, W. (1990): Decay Fungi Increase the Moisture Content of Dried Wood. Proceedings of the 8th International Biodeterioration and Biodegradation Symposium, Windsor, Ontario, Canada, 138-146.

Smith, M. S., Bruhn, J. N., Anderson, J. B. (1992a): The fungus *Armillaria bulbosa* is among the largest and oldest living organisms. Nature 356: 428-431.

Smith, S. M., Morrell, J. J., Sexton, C. (1992b): Residual strength of Douglas-fir sapwood an heartwood as affected by fungus colony size and number of colony forming units. Forest Products Journal 42(4): 19-24.

Sokal, R. R., Rohlf, F. J. (1995): Biometry the principles and practice of statistics in biological research, 3. Auflage. Freeman, New York, 887 S.

Srebotnik, E., Messner, K. (1990): Enzymatic attack of wood is limited by the inaccessibility of the substrate. Proceedings Proceedings of the Fourth International Conference on Biotechnology in the Pulp and Paper Industry, 111-119.

Srebotnik, E., Messner, K. (1991): Immunoelectron Microscopial Study of the Porosity of Brown-Rot Degraded Pine Wood. Holzforschung 45(2): 95-101.

Stahel, W. A. (2000): Statistische Datenanalyse. Eine Einführung für Naturwissenschaftler, 3. Auflage. Vieweg, Braunschweig, 379 S.

Stalpers, J. A. (1978): Identification of wood-inhabiting fungi in pure culture. Studies in mycology No. 16, Baarn, 248 S.

Steiger, R. (1995): Versuche an Fichten-Kanthölzern: Biegemoment-Normalkraft-Interaktionen. IBK Bericht 209, Birkhäuser, Basel, 187 S.

Steinlin, H. J., Eggenberger, P., Gunzenreiner, U., Dürr, M., Trümpler, J. (1996): Integralprojekt im Einzugsgebiet der Gamser Wildbäche Waldbauprojekt, Jagdliches Konzept, Sanierung Wildbäche. Sophie und Karl Binding Stiftung, Basel, 96 S.

Stenlid, J., Vasiliauskas, R. (1998): Genetic diversity within and among vegetative compatibilty groups of *Stereum sanguinolentum* determined by arbitrary primed PCR. Molecular Ecology 7: 1265-1274.

Stone, J. E., Scallan, A. M., Denefer, E., Ahlgren, E. (1970): Digestibility as a simplefunciton of a molecule of similar size to a cellular enzyme. In: Hajny, G. J., Reese, E. T. (Hrsg.): Cellulases and Their Applications. American chemical Society, Washington, 470 S.

Strele, G. (1950): Grundriss der Wildbach- und Lawinenverbauung, 2. Auflage. Springer, Wien, 340 S.

Sutherland, J. B., Crawford, D. L. (1981): Lignin and glucan degradation by species of the Xylariaceae. Transactions of the British Mycological Society 76(2): 335-337.

Swedjemark, G., Stenlid, J. (2001): A highliy diverse population of *Heterobasidion annosum* in a single stump of *Picea abies*. Mycological Research 105(2): 183-189.

Syme, J. H., Saucier, J. R. (1995): Effects of long-term storage of Southern Pine sawlogs under water sprinklers. Forest Products Journal 45: 47-50.

Takahashi, M. (1978): Studies on the Wood Decay by a Soft Rot Fungus, *Chaetomium globosum* Kunze. Wood Research 63: 11-64.

Thunnel, B. (1957): Über den Einfluss der Baumkante auf die Biegefestigkeit von Bauholz. Holz als Roh- und Werkstoff 15(7): 297-301.

Tobisch, S., Mittag, C. (1998): Zerstörungsfreie Untersuchungen von Schadphänomenen an Bauholz. Holz-Zentralblatt 124(16;21): 236-238; 312-314.

Todd, N. K., Rayner, A. D. M. (1981): Spatial distribution of populations of *Coriolus versicolor*. New Phytologist 89: 307-319.

Tostmann, K. H. (2001): Korrosion: Ursachen und Vermeidung. Wiley-VCH, Weinheim, 331 S.

Trendelenburg, R., Mayer-Wegelin, H. (1955): Das Holz als Rohstoff, 2. Auflage. Carl Hanser, München, 541 S.

Tukey, J. W. (1977): Exploratory data analysis. Addison-Wesley, Reading, Masachusetts, 688 S.

Udaiyan, K., Manian, S. (1991): Fungi colonising wood in the cooling tower water system at the Madras Fertilizer Company, Madras, India. International Biodeterioration 27: 351-371.

Urban, D. (1993): Logit-Analyse: Statistische Verfahren zu Analysen von Modellen mit qualitativen Response-Variablen. Stuttgart, Fischer, 183 S.

Van Acker, J., Stevens, M., Rijckaertt, V. (1995): Highly virulent wood-rotting Basidiomycetes in cooling towers. IRG/WP/95-10125. 26th Annual meeting of the International Research Group on Wood Preservation, Helsingor, Denmark, 6.

Van Acker, J., Stevens, M. (1996): Laboratory culturing and decay testing with *Physisporinus vitreus* and *Donkioporia expansa* originating from identical cooling tower environments show major differences. IRG/WP 96-10184. 27th Annual meeting of the International Research Group on Wood Preservation, Guadaloupe, France, May 19-24, 8.

Van Stevenwinck, R. F. M., Van Steveninck, M. E. (1991): Microanalysis. In: Hall, J. L., Hawes, C. (Hrsg.): Electron Microscopy of Plant Cells. Academic Press, London, 415-455.

Vasiliauskas, R., Stenlid, J., Thomsen, I. M. (1998): Clonality and genetic variation in *Amylostereum areolatum* and *A. chailletii* from northern Europe. New Phytologist 139: 751-758.

Venäläinen, M., Harju, A. M., Nikkanen, T., Paajanen, L., Velling, P., Viitanen, H. (2001): Genetic Variation in the Decay Resistance of Sibirian Larch (*Larix sibirica* Leeb.) Wood. Holzforschung 55(1): 1-6.

Vesala, T., Sevanto, S., Paatero, P., Nikinmaa, E., Perämäki, M., Ala-Nissilä, T., Kääriäinen, J., Virtanen, H., Irvine, J., Grace, J. (2000): Do tree stems shrink and swell with the tides? Tree Physiology 20: 633–635.

Viitanen, H., Ritschkoff, A. (1991): Brown rot decay in wooden constructions. Effect of temperature, humidity and moisture. Sveriges Landbruksuniversitet. Institutionen for virkeslärä. Rapport Nr 222, 55 S.

Viitanen, H. (1994): Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions. Materials and Structures 27: 483-493.

Viitanen, H., Bjurman, J. (1995): Mould growth on wood under fluctuating humidity conditions. Material und Organismen 29(1): 27-46.

Viitanen, H. (1997): Modelling the Time Factor in the Development of Brown Rot Decay in Pine and Spruce Sapwood -The effect of Critical Humidity and Temperature Conditions. Holzforschung 51(2): 99-106.

Wälchli, O. (1970): Zur Frage der Verbreitung holzzerstörender Pilze in verschiedenen Höhenlagen. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen 121(11): 811-823.

Wälchli, O. (1973): Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen Angriffe durch den echten Hausschwamm (*Merulius lacrimans* (Wulf.) Fr.). Holz als Roh- und Werkstoff 31: 96-102.

Wälchli, O. (1976): Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen Angriffe durch *Coniophora puteana* (Schum. ex Fr.) Karst. (Kellerschwamm) und *Gloeophyllum trabeum* (Pers. ex Fr.) Murril (Balkenblättling). Holz als Roh- und Werkstoff 34: 335-338.

Wälchli, O. (1977): Der Temperatureinfluss auf die Holzzerstörung durch Pilze. Holz als Roh- und Werkstoff 35

Wälchli, O., Graf, E., In der Gand, H. (1986): Holzschutz im temporären Lawinenverbau. Mitteilung des Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung 40: 1-76.

Wang, S. C., Huffmann, J. B., Schmidt, R. A. (1977): Evaluation of chlorosulfonyl pyrinide for protecting wood from soft-rot fungi using a tensile strength test. Wood and Fiber 8(4): 241-248.

Ward, J. V. (1998): Riverine Landscapes: Biodiversity Patterns, Disturbance Regimes, and Aquatic Conservation. Biological Conservation 83: 269-278.

Watling, R. (1982): Taxonomic status and ecological identity in the basidiomycetes. In: Frankland, J. C. *et al.* (Hrsg.): Decomposer basidiomycetes: Their biology and ecology. Cambridge University Press, Cambridge, 1-32.

Webber, J., Gibbs, J. (1996): Water Storage of Timber: Experience in Britain: Forestry Commission Bulletin 117. HMSO, London, 48 S.

Welten, M., Sutter, R. (1984): Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen der Schweiz, Band 1. Birkhäuser, Basel, 716 S.

Wenzel, H. (1990): Bedeutung kombinierter technisch-biologischer Methoden in der Liechtensteiner Rüfenverbauung. In: Ingenieurbiologie - Hilfsstoffe im Lebendverbau (Band 5), 139-154.

Wenzel, J. M. (1999a): Neues Gerät für das Bohrwiderstandsverfahren. AFZ / Der Wald 54(5): 256-258.

Wenzel, J. M. (1999b): Bohrwiderstandsverfahren zur Unterstützung der Baumdiagnose, Teil 1: Was gemessen wird. Neue Landschaft 44(1): 37-43.

White, N. A., Sturrock, C., Ritz, K., Samson, W. B., Bown, J., Staines, H. J., Palfreyman, J. W., Crawford, J. (1998): Interspecific fungal interactions in spatially heterogeneous systems. FEMS Microbiology Ecology 27: 21-32.

Wilcox, W. W. (1968): Changes in wood microstructures through progressive stages of decay. USDA Forest Service, Research Paper FPL 70: 46 S.

Wilcox, W. W. (1978): Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. Wood and Fiber 9(4): 252-257.

Wilcox, W. W., Dietz, M. (1997): Fungi causing above-ground wood decay in structures in California. Wood and Fiber Science 29(3): 291-298.

Willeitner, H. (1981): Grundprinzipien des baulichen Holzschutzes. In: Willeitner, H., Schwab, E. (Hrsg.): Holz-Aussenverwendung im Hochbau. Koch, Tübingen, 101-109.

Winandy, J. E., Morrell, J. J. (1993): Relationship between incipient decay, strenght and chemical composition of Douglas-fir heartwood. Wood and Fiber Science 25(3): 278-288.

Winterbourn, C. C. (1991): Free Radical Biology of Iron. In: Dreosti, I. E. (Hrsg.): Trace Elements, Micronutrients, and Free Radicals. Humana Press, Totowa, NJ, 53-76.

Wong, A. H., Wilkes, J. (1988): Association of Tissue Characteristics with Susceptibilty to Decay in the Sapwood of *Pinus radiata*. Holzforschung 42(6): 399-402.

Worrall, J. J., Parmeter, J. R. (1982): Formation and Properties of Wetwood in White Fir. Phytopathology 72(9): 1209-1212.

Worrall, J. J., Parmeter, J. R. (1983): Inhibition of Wood-Decay Fungi by Wetwood of White Fir. Phytopathology 36: 1140-1145.

Worrall, J. J. (1997): Somatic incompatibility in basidiomycetes. Mycologia 89(1): 24-36.

Wranglén, G. (1985): Korrosion und Korrosionsschutz. Springer, Berlin, 301 S.

Yang, D. Q. (2001): A method for the prevention of wood decay from nail penetration. Forest Products Journal 51(4): 67-70.

Young, H. E., Guinn, V. P. (1966): Chemical Elements in Complete Mature Trees of Seven Species in Maine. Tappi 49(5): 190-197.

Zabel, R. A., Morrell, J. J. (1992): Wood Microbiology: Decay and Its Prevention. Academic Press, San Diego, 476 S.

Zakic, B. D. (1973): Inelastic bending of wood beams. ASCE Journal of the structural division 104(10): 2079-2095.

Zeller, J. (1987): Haben Holzsperren im Wildbachverbau ausgedient? Wasser, Energie, Luft 79(5/6): 99-101.

Zeller, J., Röthlisberger, G. (1987): Lebensdauer von Holzsperren am Beispiel der Gamser Wildbäche. Bericht der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen, 34 S.

Zürcher, E., Cantiani, M. G., Sorbetti-Guerri, F., Michel, D. (1998): Tree stem diameters fluctuate with tide. Nature 392: 665–666.

Zysset, M., Brunner, I., Frey, B., Blaser, P. (1996): Response of European Chestnut to Varying Calcium/Aluminium Ratios. Journal of Environmental Quality 25: 705-708.

Lebenslauf

Name	Noetzli, Konrad Philipp
Geburtsdatum	05.02.1972

Schulbildung:

1979 - 1987	Primar- und Sekundarschule Hirzel ZH.
1987 - 1991	Gymnasium Typus B, Kantonsschule Stadelhofen Zürich 1991: Eidg. anerkannte Matura.

Studium:

1992 - 1998	Studium an der Abteilung für Forstwissenschaften an der ETH Zürich. Schlussdiplom 1998.
1999 -2002	Doktorarbeit an der Professur für Forstschutz und Dendrologie (Prof. Dr. O. Holdenrieder), Departement Forstwissenschaften, ETH Zürich, in Zusammenarbeit mit der Abteilung Wasser, Erd- und Felsbewegungen (Dipl. Ing. A. Böll), WSL Birmensdorf.

Berufstätigkeit:

1995-1996	Praktikum zur Erlangung des forstlichen Wählbarkeitszeugnisses: Ingenieurbüro R. Sperisen, Olten (3 Monate); Einsatz bei INTERCOOPERATION Suisse in Sikasso, Mali (4 - Monate); Kreisforstamt 28, Zuoz GR (6 Monate)
1991 - 1992	Arbeit bei Firma G. Gysel Haustechnik, Horgen ZH.
1994 - 1996	Hilfsassistenz am entomologischen Institut der ETH Zürich sowie an der Professur für Forstökonomie und Forstpolitik an der ETH Zürich (Teilzeit).
1997 - 1999	Datenbank-Administrator bei der Beratungsstelle DERMAN (Schweiz. Arbeiterhilfswerk), Zürich (Teilzeit).
1998 - 1999	Informatik-Support und Datenbank-Administration bei der CS-Life Lebensversicherung, Zürich.
Seit 1998	Betreuung Jugendlicher in Praktikumswochen der Bildungswerkstatt Bergwald, 3612 Steffisburg (Wochenweiser Einsatz).
1999 - 2002	Selbständiger Nebenerwerb in den Bereichen Informatik und Forstwirtschaft.

Seite Leer /
Blank leaf

Anhang

Anhang I A1

Anhang II A10

Anhang III A20

Anhang IV A22

Anhang V A32

Anhang VI A34

Anhang VII A38

Anhang I

Isolateliste aller Basidiomyceten nach Sperren geordnet. Die Nummern der Probestellen entsprechen denjenigen in den Skizzen in Anhang II. Nummern grösser als 500 bezeichnen Fruchtkörperfunde. Die Spalte „Gruppe" gibt die entsprechende VC-Gruppe bzw. die mophologische Gruppierung der nicht bestimmten Basidiomyceten wieder. Nullwerte bezeichnen Isolate, deren VC-Gruppe nicht bestimmt werden konnte oder Basidiomyceten, welche anhand morphologischer Kriterien als Einzelisolate ausgeschieden wurden.

Sperre Nr. 1: Trepsental A

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
1	1	*S. brinkmannii*	0
2	2a	*S. brinkmannii*	0
4	4	*A. serialis*	6
5	5a	*A. serialis*	6
5	5c	*S. brinkmannii*	0
6	6	*S. brinkmannii*	0
6	596	*G. sepiarium*	14
6	597	*G. sepiarium*	15
6	598	*G. sepiarium*	5
6	599	*G. sepiarium*	16
6	600	*G. sepiarium*	17
6	602	*A. serialis*	0
6	603	*A. serialis*	1
7	7	*F. pinicola*	0
7	578	*F. pinicola*	94
7	579	*F. pinicola*	93
7	580	*F. pinicola*	0
7	581	*F. pinicola*	0
8	8a	*F. pinicola*	4
8	8b	*F. pinicola*	35
9	9	*F. pinicola*	4
9	582	*F. pinicola*	0
9	583	*F. pinicola*	0
10	10b	*A. serialis*	3
10	10a	*A. serialis*	16
10	592	*A. serialis*	19
10	593	*A. serialis*	18
10	594	*A. serialis*	3
10	595	*A. serialis*	0
12	12b	*S. brinkmannii*	0
13	13a	*S. brinkmannii*	0
14	14	*A. serialis*	22
14	584	*A. serialis*	0
14	585	*A. serialis*	23
14	586	*A. serialis*	8
14	587	*A. serialis*	7
14	588	*A. serialis*	24
14	589	*A. serialis*	7
14	590	*F. pinicola*	91
14	591	*A. serialis*	8
15	15a	*S. brinkmannii*	
15	577	*A. serialis*	41
16	16a	*G. sepiarium*	6
16	573	*G. sepiarium*	1
16	574	*G. sepiarium*	1
16	575	*G. sepiarium*	0
16	576	*G. sepiarium*	0
17	17	*G. sepiarium*	6
17	564	*G. sepiarium*	0
17	565	*G. sepiarium*	13
17	566	*G. sepiarium*	0
17	567	*G. sepiarium*	0
17	568	*G. sepiarium*	0
17	569	*G. sepiarium*	0
17	570	*G. sepiarium*	0
17	571	*G. sepiarium*	0
17	572	*G. sepiarium*	1
18	18	*G. sepiarium*	7
18	559	*G. sepiarium*	7
18	560	*G. sepiarium*	0
18	561	*G. sepiarium*	0
18	562	*G. sepiarium*	0
18	563	*G. sepiarium*	12
19	19	*A. serialis*	32
19	556	*F. pinicola*	3
19	557	*F. pinicola*	3
19	558	*A. serialis*	39
22	22a	*H. annosum*	0
26	26b	*F. pinicola*	46
26	26c	*F. pinicola*	56
26	26a	*B. farinosus*	0
27	27a	*F. pinicola*	45
27	27b	*B. farinosus*	0
28	28b	*F. pinicola*	43
28	28a	*F. pinicola*	44
28	28c	*Coprinus sp.*	0
29	552	*T. abietinum*	0
29	553	*T. abietinum*	0
30	30c	*F. pinicola*	6
30	30b	*S. brinkmannii*	0
30	551	*T. abietinum*	0
30	554	*F. pinicola*	6
31	31a	*F. pinicola*	6
31	31b	*S. brinkmannii*	
31	550	*F. pinicola*	6
31	555	*F. pinicola*	99
32	32a	*A. serialis*	15
33	33a	*A. serialis*	9
33	33b	*S. brinkmannii*	0
33	520	*A. serialis*	9
33	521	*A. serialis*	12
33	522	*A. serialis*	12
33	523	*A. serialis*	0
33	524	*A. serialis*	37
34	513	*A. serialis*	5
34	514	*A. serialis*	5
34	515	*A. serialis*	25
34	516	*A. serialis*	5
35	35c	*G. sepiarium*	8
35	35a	*G. abietinum*	1
35	504	*G. abietinum*	1
35	505	*G. abietinum*	1
35	506	*G. abietinum*	0
35	507	*G. abietinum*	0
35	508	*G. abietinum*	1
35	509	*G. sepiarium*	9
35	510	*G. sepiarium*	0
35	512	*G. sepiarium*	0
36	501	*G. abietinum*	1
36	502	*G. abietinum*	1
36	503	*G. abietinum*	1
36	511	*G. sepiarium*	10
37	37	*A. serialis*	29
37	528	*F. pinicola*	95
37	529	*F. pinicola*	100
37	530	*A. serialis*	40
37	531	*A. serialis*	0
37	532	*A. serialis*	30
38	38a	*F. pinicola*	0
38	38b	*S. brinkmannii*	0
40	517	*A. serialis*	0
40	518	*A. serialis*	13
40	519	*A. serialis*	13
41	41b	*F. pinicola*	48
42	42c	*F. pinicola*	2
42	535	*F. pinicola*	8
42	536	*F. pinicola*	0
42	537	*F. pinicola*	0

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
42	538	*F. pinicola*	0
42	539	*F. pinicola*	96
42	540	*F. pinicola*	95
42	541	*F. pinicola*	0
42	542	*Basidiomycet*	0
46	46	*F. pinicola*	19
46	547	*F. pinicola*	10
46	548	*F. pinicola*	0
46	549	*F. pinicola*	0
47	47	*F. pinicola*	10
48	48a	*F. pinicola*	10
49	49	*F. pinicola*	10
49	546	*F. pinicola*	10
50	543	*G. sepiarium*	11
50	544	*F. pinicola*	98
50	545	*A. serialis*	0
52	52	*H. annosum*	0
53	53a	*Basidiomycet*	0
54	54	*F. pinicola*	79
55	55c	*H. annosum*	0
55	55a	*A. cepistipes*	1
57	57a	*Basidiomycet*	0
57	57b	*Basidiomycet*	0
58	58a	*F. pinicola*	76
58	58b	*F. pinicola*	77
58	58d	*F. pinicola*	78
59	59a	*A. serialis*	26
59	59b	*Basidiomycet*	0
60	60a	*F. pinicola*	64
60	60d	*F. pinicola*	75
60	60c	*Basidiomycet*	9
60	60b	*Basidiomycet*	10
61	61b	*F. pinicola*	68
61	61c	*F. pinicola*	69
61	61d	*F. pinicola*	70
61	61e	*F. pinicola*	71
61	61a	*F. pinicola*	73
61	61f	*F. pinicola*	83
62	62b	*F. pinicola*	65
62	62d	*F. pinicola*	66
62	62e	*F. pinicola*	67
64	64b	*H. annosum*	0
65	65	*F. pinicola*	49
66	66a	*Basidiomycet*	10
68	68c	*F. pinicola*	59
68	68b	*F. pinicola*	60
70	70c	*Basidiomycet*	10
71	71a	*F. pinicola*	57
72	72a	*F. pinicola*	54
73	73c	*F. pinicola*	58
73	73a	*F. pinicola*	80
73	73b	*F. pinicola*	81
74	74	*F. pinicola*	9
75	75	*F. pinicola*	9
77	77b	*Basidiomycet*	10
79	79	*Basidiomycet*	10
80	80	*Basidiomycet*	9
81	81b	*F. pinicola*	36
81	81c	*F. pinicola*	37
82	82c	*F. pinicola*	33
82	82b	*F. pinicola*	38
82	82a	*Basidiomycet*	9
83	83b	*F. pinicola*	40
83	83a	*Basidiomycet*	9
84	84b	*F. pinicola*	17
84	84a	*F. pinicola*	24
85	85a	*F. pinicola*	18
85	85b	*F. pinicola*	20
85	85d	*Basidiomycet*	0
85	85e	*Basidiomycet*	9
86	86a	*Basidiomycet*	9
86	86d	*Basidiomycet*	9
87	87b	*F. pinicola*	62
87	87a	*F. pinicola*	63
87	87c	*F. pinicola*	82
88	88c	*F. pinicola*	61
89	89a	*F. pinicola*	30
89	89b	*F. pinicola*	31
89	89c	*A. serialis*	0
90	90b	*A. serialis*	38
91	91a	*F. pinicola*	32
91	91b	*F. pinicola*	41
92	92a	*Basidiomycet*	10
94	94a	*F. pinicola*	12
94	94b	*Basidiomycet*	10
95	95c	*F. pinicola*	12
95	95a	*F. pinicola*	34
97	97b	*F. pinicola*	14
97	97d	*T. abietinum*	0
98	98b	*F. pinicola*	16
99	99a	*F. pinicola*	5
99	99d	*F. pinicola*	13
99	99c	*F. pinicola*	15
100	100b	*F. pinicola*	39
100	100a	*Basidiomycet*	0
101	101c	*F. pinicola*	25
101	101b	*F. pinicola*	85
101	101e	*F. pinicola*	86
101	101a	*F. pinicola*	87
101	101d	*Basidiomycet*	0
102	102	*Basidiomycet*	0
103	103d	*F. pinicola*	26
103	103c	*F. pinicola*	27
103	103b	*F. pinicola*	28
103	103a	*F. pinicola*	29
104	104a	*Basidiomycet*	10
105	105c	*F. pinicola*	0
105	105d	*F. pinicola*	21
105	105a	*Basidiomycet*	2
106	106b	*F. pinicola*	23
107	107b	*A. serialis*	0
107	107a	*A. serialis*	27
108	108b	*F. pinicola*	0
108	108c	*F. pinicola*	0
109	109	*A. serialis*	28
111	111a	*Basidiomycet*	0
112	112a	*Basidiomycet*	0
113	113a	*Basidiomycet*	0
114	114a	*A. serialis*	1
114	601	*G. sepiarium*	5
115	115a	*S. brinkmannii*	0
116	116a	*F. pinicola*	88
117	117a	*A. serialis*	4
117	117b	*S. brinkmannii*	0
118	118a	*A. serialis*	4
119	119a	*A. serialis*	2
119	119b	*A. serialis*	4
120	120c	*A. serialis*	31
120	120b	*A. serialis*	33
120	604	*A. serialis*	2
120	605	*A. serialis*	4
122	122a	*S. brinkmannii*	0
123	123	*A. serialis*	35
124	124b	*A. serialis*	36
124	124a	*S. brinkmannii*	0
129	129b	*F. pinicola*	11
129	129a	*F. pinicola*	89
130	130a	*F. pinicola*	11
131	131b	*A. serialis*	34
131	131a	*S. brinkmannii*	0
132	132	*Basidiomycet*	2
132	615	*G. sepiarium*	4
133	613	*G. sepiarium*	4
133	614	*G. sepiarium*	0
133	616	*F. pinicola*	1
134	134	*F. pinicola*	1
134	611	*G. sepiarium*	4
134	612	*G. sepiarium*	0
135	135a	*F. pinicola*	1
135	135c	*Basidiomycet*	0
135	607	*G. sepiarium*	3
135	609	*G. sepiarium*	3
135	610	*G. sepiarium*	4
136	136b	*F. pinicola*	1
136	136c	*A. serialis*	17
136	533	*G. sepiarium*	4
136	534	*G. odoratum*	0
136	606	*G. sepiarium*	3
136	608	*G. sepiarium*	3
137	137	*F. pinicola*	8
137	620	*F. pinicola*	8
137	621	*F. pinicola*	8
138	138a	*F. pinicola*	7
138	619	*F. pinicola*	92
139	139	*F. pinicola*	7

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
140	140b	*F. pinicola*	7
140	140a	*F. pinicola*	8
140	618	*F. pinicola*	0
141	141a	*G. trabeum*	1
141	141b	*F. pinicola*	7
141	141c	*F. pinicola*	8
141	617	*F. pinicola*	8
142	142a	*Basidiomycet*	0
142	525	*G. trabeum*	1
142	526	*G. trabeum*	1
142	527	*F. pinicola*	7
143	143a	*A. serialis*	11
144	144a	*A. serialis*	10
144	144b	*A. serialis*	20
145	145	*A. serialis*	21
146	146a	*A. serialis*	42
146	146b	*Basidiomycet*	0
147	147b	*S. brinkmannii*	0

Sperre Nr. 2: Trepsental B

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
1	1	*S. brinkmannii*	0
1	581	*Basidiomycet*	0
1	582	*Basidiomycet*	0
4	4	*Basidiomycet*	19
4	584	*Basidiomycet*	19
5	5	*F. pinicola*	3
5	590	*F. pinicola*	3
6	6b	*S. brinkmannii*	0
6	6a	*Basidiomycet*	0
7	7b	*A. serialis*	18
7	7a	*S. brinkmannii*	0
8	8	*S. brinkmannii*	0
9	9	*S. brinkmannii*	0
11	11	*Basidiomycet*	2
12	12c	*A. serialis*	17
12	12a	*Basidiomycet*	0
12	12b	*Basidiomycet*	0
12	586	*Basidiomycet*	0
13	13a	*A. serialis*	13
13	13b	*A. serialis*	14
13	13c	*A. serialis*	15
13	587	*A. serialis*	13
13	588	*A. serialis*	6
14	14a	*A. serialis*	6
14	14c	*S. brinkmannii*	0
14	589	*A. serialis*	33
15	592	*F. pinicola*	2
15	593	*F. pinicola*	2
16	16	*F. pinicola*	2
17	17	*F. pinicola*	2
18	18	*Basidiomycet*	0
18	594	*F. pinicola*	0
19	19	*A. cepistipes*	0
20	20	*F. pinicola*	2
21	21	*S. brinkmannii*	0
24	24	*G. sepiarium*	3
24	596	*G. sepiarium*	3
24	597	*G. sepiarium*	0
24	599	*A. serialis*	4
25	25	*G. sepiarium*	3
25	598	*A. serialis*	3
25	600	*A. serialis*	5
26	26a	*G. sepiarium*	3
26	26b	*A. serialis*	3
27	27	*A. serialis*	3
28	28	*A. serialis*	3
29	29	*A. serialis*	2
30	30	*A. serialis*	2
31	31	*A. serialis*	1
32	32	*A. serialis*	1
33	33	*A. serialis*	1
34	34	*S. brinkmannii*	0
35	35b	*A. serialis*	1
35	35a	*S. brinkmannii*	0
36	36	*S. brinkmannii*	0
37	37a	*S. brinkmannii*	0
37	37b	*Basidiomycet*	0
37	502	*S. brinkmannii*	0
39	39	*A. serialis*	26
40	40c	*A. serialis*	24
40	40b	*Basidiomycet*	0
40	40a	*Basidiomycet*	0
40	507	*A. serialis*	32
41	41b	*A. serialis*	11
41	41a	*S. brinkmannii*	0
41	503	*A. serialis*	29
42	42a	*A. serialis*	11
42	42b	*S. brinkmannii*	0
43	43a	*A. serialis*	11
43	43b	*S. brinkmannii*	0
44	44a	*A. serialis*	0
44	44b	*Basidiomycet*	0
44	501	*A. serialis*	36
44	546	*A. serialis*	0
45	45	*A. serialis*	0
45	508	*G. abietinum*	0
45	509	*G. abietinum*	0
45	510	*G. abietinum*	0
45	511	*Basidiomycet*	0
45	512	*A. serialis*	0
45	513	*A. serialis*	0
46	46	*S. brinkmannii*	0
47	47	*A. serialis*	22
47	506	*A. serialis*	0
48	48b	*H. annosum*	0
48	48a	*S. brinkmannii*	0
49	49a	*A. serialis*	21
49	49b	*S. brinkmannii*	0
49	505	*A. serialis*	31
51	521	*A. serialis*	25
51	522	*G. abietinum*	0
51	523	*Basidiomycet*	24
51	524	*F. pinicola*	9
51	525	*F. pinicola*	9
51	526	*A. serialis*	35
51	527	*Basidiomycet*	24
51	528	*A. serialis*	27
51	529	*A. serialis*	28
52	52	*S. brinkmannii*	0
52	518	*A. serialis*	16
52	520	*A. serialis*	23
53	53	*A. serialis*	16
53	517	*A. serialis*	0
54	54a	*A. serialis*	9
54	54c	*S. brinkmannii*	0
54	514	*Basidiomycet*	0
56	534	*F. pinicola*	10
56	535	*A. serialis*	30
56	536	*F. pinicola*	11
56	539	*G. odoratum*	0
57	57	*F. pinicola*	5
57	532	*F. pinicola*	8
57	533	*F. pinicola*	0
58	58	*F. pinicola*	5
58	531	*F. pinicola*	0
59	530	*F. pinicola*	8
60	60	*S. brinkmannii*	0
61	61	*F. pinicola*	6
61	515	*F. pinicola*	6
62	62	*A. serialis*	10
62	601	*A. serialis*	10
65	65	*S. brinkmannii*	0
66	66	*Basidiomycet*	2
70	70	*Basidiomycet*	1
73	73	*S. brinkmannii*	0
77	77b	*A. serialis*	20
77	77c	*Basidiomycet*	0
78	78	*S. brinkmannii*	0
81	81	*Basidiomycet*	2
82	82	*Basidiomycet*	0
86	86	*S. brinkmannii*	0
87	87	*A. serialis*	12
87	542	*A. serialis*	34
88	88	*A. serialis*	12
89	89a	*H. annosum*	0
89	89b	*Basidiomycet*	0
99	99	*S. brinkmannii*	0
100	100	*A. cepistipes*	0
101	101	*S. brinkmannii*	0
102	102b	*F. pinicola*	13

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
102	102a	*B. farinosus*	0
103	103	*B. farinosus*	0
107	107	*S. brinkmannii*	0
113	113	*Basidiomycet*	0
123	123	*Basidiomycet*	4
124	124	*H. annosum*	0
128	128	*F. pinicola*	4
129	129a	*F. pinicola*	4
129	129b	*Basidiomycet*	0
130	130	*F. pinicola*	4
131	580	*F. pinicola*	0
132	132	*F. pinicola*	4
133	133	*F. pinicola*	1
133	578	*F. pinicola*	3
134	134	*F. pinicola*	1
135	135	*F. pinicola*	1
135	577	*G. sepiarium*	14
136	136	*F. pinicola*	1
136	579	*F. pinicola*	1
137	137	*F. pinicola*	1
143	143	*G. sepiarium*	2
143	548	*G. sepiarium*	2
144	144	*G. sepiarium*	2
144	537	*G. sepiarium*	2
144	538	*G. odoratum*	0
144	540	*G. odoratum*	0
144	547	*G. sepiarium*	2
145	145	*F. pinicola*	7
146	146	*F. pinicola*	7
146	558	*G. sepiarium*	4
146	559	*G. sepiarium*	4
146	560	*G. sepiarium*	4
146	561	*G. sepiarium*	4
147	147b	*F. pinicola*	7
147	147a	*A. serialis*	19
147	553	*G. trabeum*	1
147	554	*G. trabeum*	1
147	557	*G. sepiarium*	0
148	148	*Basidiomycet*	20
148	551	*G. sepiarium*	8
148	552	*G. trabeum*	1
149	549	*G. sepiarium*	4
149	550	*G. sepiarium*	7
149	555	*G. trabeum*	2
149	556	*G. trabeum*	3
150	150a	*F. pinicola*	12
150	150c	*Basidiomycet*	20
151	151d	*H. annosum*	0
151	151a	*Basidiomycet*	20
151	567	*G. sepiarium*	11
152	152	*Basidiomycet*	20
152	566	*G. sepiarium*	10
153	153	*Basidiomycet*	20
153	562	*G. trabeum*	4
153	563	*G. sepiarium*	6
153	564	*G. sepiarium*	9
153	565	*G. sepiarium*	6
154	154a	*Basidiomycet*	20
155	155	*G. sepiarium*	5
156	156a	*A. serialis*	8
156	156c	*Basidiomycet*	0
156	568	*G. sepiarium*	5
157	157	*A. serialis*	8
157	569	*G. sepiarium*	5
157	570	*G. sepiarium*	12
157	571	*G. sepiarium*	1
157	572	*G. sepiarium*	13
158	158	*G. sepiarium*	1
158	573	*G. sepiarium*	1
158	574	*G. sepiarium*	1
159	159a	*G. sepiarium*	1
159	159b	*A. serialis*	7
159	575	*G. sepiarium*	1
159	576	*G. sepiarium*	0

Sperre Nr. 3: Steingraben

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
1	1	*F. pinicola*	1
2	2	*F. pinicola*	1
2	502	*F. pinicola*	1
3	3	*F. pinicola*	1
3	501	*F. pinicola*	1
4	4	*F. pinicola*	1
4	503	*F. pinicola*	3
5	5a	*S. brinkmannii*	0
6	6b	*S. brinkmannii*	0
6	6a	*Basidiomycet*	0
7	7c	*Basidiomycet*	0
7	7b	*Basidiomycet*	0
7	515	*F. pinicola*	0
8	8	*A. cepistipes*	1
11	11	*Basidiomycet*	0
14	14	*Basidiomycet*	0
18	18	*F. pinicola*	1
20	20	*F. pinicola*	1
22	22	*F. pinicola*	2
22	504	*F. pinicola*	0
22	505	*F. pinicola*	4
23	23	*F. pinicola*	2
24	24	*F. pinicola*	2
24	506	*F. pinicola*	2
24	507	*F. pinicola*	2
24	508	*F. pinicola*	2
30	30	*F. velutipes*	0
34	512	*T. abietinum*	0
34	513	*T. abietinum*	0
34	514	*T. abietinum*	0
35	511	*T. abietinum*	0
35	518	*T. abietinum*	0
36	509	*F. pinicola*	0
37	37	*Basidiomycet*	25
37	510	*F. pinicola*	0
49	49	*Basidiomycet*	0
50	50	*Basidiomycet*	4
52	517	*Basidiomycet*	4

Sperre Nr. 4: Speichenrus

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
1	1b	*G. sepiarium*	46
1	1a	*A. serialis*	14
1	501	*A. serialis*	0
1	502	*G. odoratum*	0
1	503	*G. sepiarium*	33
1	504	*Basidiomycet*	0
1	505	*G. sepiarium*	32
1	507	*A. serialis*	0
2	2a	*G. sepiarium*	47
2	2f	*Basidiomycet*	0
2	2d	*Basidiomycet*	14
2	506	*G. sepiarium*	31
2	508	*G. sepiarium*	1
2	509	*G. sepiarium*	1
2	510	*G. sepiarium*	0
2	511	*G. sepiarium*	0
2	512	*G. sepiarium*	29
2	513	*G. sepiarium*	34
2	514	*G. sepiarium*	5
3	3a	*G. odoratum*	0
3	515	*G. sepiarium*	5
3	516	*G. sepiarium*	0
3	517	*G. sepiarium*	3
3	518	*G. sepiarium*	3
3	519	*G. sepiarium*	67
3	520	*G. sepiarium*	6
3	521	*G. sepiarium*	0
3	524	*G. sepiarium*	36
3	525	*G. sepiarium*	30
3	526	*G. sepiarium*	38
3	540	*G. sepiarium*	4
3	541	*G. sepiarium*	4
4	4a	*G. sepiarium*	48
4	522	*G. sepiarium*	2
4	523	*G. sepiarium*	49
4	527	*G. sepiarium*	39
4	528	*G. sepiarium*	40
4	529	*G. sepiarium*	6
4	530	*G. sepiarium*	35

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
4	531	*G. sepiarium*	38
5	5c	*G. sepiarium*	37
5	5a	*A. serialis*	15
5	532	*G. sepiarium*	42
5	533	*G. sepiarium*	43
5	534	*G. sepiarium*	2
5	535	*G. sepiarium*	44
6	6a	*G. odoratum*	0
6	536	*G. sepiarium*	45
6	537	*G. sepiarium*	0
6	538	*A. serialis*	0
7	7a	*G. odoratum*	0
8	8d	*G. sepiarium*	62
8	8a	*G. odoratum*	0
8	8c	*A. serialis*	3
8	8b	*A. serialis*	16
8	542	*A. serialis*	3
8	543	*G. sepiarium*	58
8	544	*G. sepiarium*	59
9	9a	*G. sepiarium*	63
9	545	*G. sepiarium*	60
9	546	*G. sepiarium*	61
10	10	*Basidiomycet*	13
10	547	*G. sepiarium*	0
10	548	*G. sepiarium*	0
10	549	*G. sepiarium*	65
11	11a	*F. pinicola*	2
11	550	*G. sepiarium*	10
11	551	*G. sepiarium*	10
11	552	*G. sepiarium*	64
12	12a	*F. pinicola*	2
12	553	*G. sepiarium*	10
12	554	*G. abietinum*	0
12	555	*G. sepiarium*	0
12	556	*Basidiomycet*	0
13	13a	*A. serialis*	5
13	557	*Basidiomycet*	0
14	14a	*S. brinkmannii*	0
14	14c	*Basidiomycet*	0
14	14b	*Basidiomycet*	14
14	558	*G. sepiarium*	0
14	559	*G. sepiarium*	22
15	15a	*G. sepiarium*	9
15	560	*G. sepiarium*	19
15	561	*G. sepiarium*	8
15	562	*G. sepiarium*	8
15	563	*G. sepiarium*	9
16	16a	*G. sepiarium*	7
16	564	*G. sepiarium*	0
16	565	*G. sepiarium*	7
16	566	*G. sepiarium*	20
16	567	*G. sepiarium*	21
16	568	*G. sepiarium*	21
17	17a	*G. sepiarium*	18
17	569	*G. sepiarium*	23
17	570	*G. sepiarium*	0
17	571	*G. sepiarium*	18
18	18d	*G. sepiarium*	24
18	18c	*S. brinkmannii*	0
18	18a	*S. brinkmannii*	0
18	18b	*S. brinkmannii*	0
18	572	*G. sepiarium*	8
18	573	*G. sepiarium*	26
18	574	*G. sepiarium*	27
19	19a	*A. serialis*	21
19	19d	*S. brinkmannii*	0
19	19c	*S. brinkmannii*	0
19	19b	*S. brinkmannii*	0
19	575	*G. sepiarium*	28
20	20b	*S. brinkmannii*	0
20	20c	*S. brinkmannii*	0
20	20a	*S. brinkmannii*	0
21	21a	*G. sepiarium*	54
21	576	*A. serialis*	10
21	577	*G. sepiarium*	0
21	578	*G. sepiarium*	0
21	579	*G. sepiarium*	53
21	580	*G. sepiarium*	52
21	582	*G. sepiarium*	50
22	22a	*A. serialis*	4
22	22c	*S. brinkmannii*	0
22	22b	*S. brinkmannii*	0
22	581	*G. sepiarium*	51
22	583	*G. sepiarium*	57
22	584	*G. sepiarium*	56
22	585	*Basidiomycet*	0
22	586	*A. serialis*	4
22	587	*G. sepiarium*	55
24	24	*Basidiomycet*	0
25	25b	*S. brinkmannii*	0
25	25a	*S. brinkmannii*	0
25	588	*A. serialis*	0
26	26	*A. serialis*	18
27	27d	*F. pinicola*	7
27	27c	*Basidiomycet*	0
27	27a	*Basidiomycet*	14
27	589	*G. sepiarium*	0
27	590	*G. sepiarium*	66
28	591	*G. sepiarium*	0
28	592	*G. sepiarium*	0
29	29a	*A. serialis*	0
29	593	*Basidiomycet*	0
30	30a	*F. pinicola*	6
31	31b	*Basidiomycet*	0
31	31a	*Basidiomycet*	15
32	32	*Basidiomycet*	0
35	35	*S. brinkmannii*	0
36	36	*A. serialis*	0
38	38	*S. brinkmannii*	0
40	40	*S. brinkmannii*	0
41	41b	*S. brinkmannii*	0
41	41a	*S. brinkmannii*	0
42	42	*Basidiomycet*	0
42	615	*A. serialis*	7
44	44a	*F. pinicola*	3
45	45a	*F. pinicola*	3
45	611	*Basidiomycet*	6
45	612	*Basidiomycet*	6
45	613	*F. pinicola*	4
45	614	*F. pinicola*	0
46	46	*F. pinicola*	0
46	608	*P. caesia*	0
46	609	*P. caesia*	0
46	610	*P. caesia*	0
47	47b	*A. serialis*	12
47	47a	*A. serialis*	13
48	48a	*G. odoratum*	0
48	48d	*S. brinkmannii*	0
48	48c	*S. brinkmannii*	0
48	617	*G. odoratum*	0
48	618	*G. odoratum*	0
48	619	*G. odoratum*	0
48	620	*G. odoratum*	0
49	49	*S. brinkmannii*	0
50	50a	*A. serialis*	8
50	621	*P. caesia*	0
50	622	*P. caesia*	0
51	51c	*A. serialis*	1
51	51a	*A. serialis*	2
52	52a	*A. serialis*	1
52	626	*Basidiomycet*	0
54	54a	*A. serialis*	2
55	55a	*S. brinkmannii*	0
55	55c	*S. brinkmannii*	0
55	55b	*S. brinkmannii*	0
56	56a	*S. brinkmannii*	0
56	56b	*S. brinkmannii*	0
57	57a	*S. brinkmannii*	0
57	57b	*S. brinkmannii*	0
57	57c	*S. brinkmannii*	0
57	632	*P. caesia*	0
58	623	*P. caesia*	0
58	624	*P. caesia*	0
59	59b	*A. serialis*	17
59	59e	*S. brinkmannii*	0
59	59c	*S. brinkmannii*	0
59	59a	*S. brinkmannii*	0
59	616	*G. odoratum*	0
62	62a	*G. odoratum*	0
62	594	*G. odoratum*	0
62	595	*G. sepiarium*	0
63	63a	*G. odoratum*	0
64	64a	*A. serialis*	19
64	596	*G. sepiarium*	17
64	597	*G. sepiarium*	16

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
64	598	*G. sepiarium*	15
64	599	*G. sepiarium*	14
64	600	*G. sepiarium*	0
64	601	*G. sepiarium*	13
64	602	*G. sepiarium*	11
64	603	*G. sepiarium*	0
64	604	*G. sepiarium*	12
64	605	*G. sepiarium*	11
65	65e	*G. odoratum*	0
65	65a	*A. serialis*	6
67	67a	*A. serialis*	9
67	67c	*Basidiomycet*	0
68	68a	*Basidiomycet*	0
68	68b	*Basidiomycet*	25
76	76	*Basidiomycet*	16
77	77	*Basidiomycet*	0
80	80	*Basidiomycet*	5
95	95a	*G. odoratum*	0
95	606	*G. odoratum*	0
95	607	*G. odoratum*	0
101	101a	*Basidiomycet*	0
115	115	*Basidiomycet*	5
116	116	*Basidiomycet*	25
117	117b	*Basidiomycet*	0
117	117a	*Basidiomycet*	15
121	121a	*Basidiomycet*	5
122	122	*Basidiomycet*	5
123	123	*Basidiomycet*	27
130	130a	*Basidiomycet*	5
132	625	*P. caesia*	0
134	134a	*G. odoratum*	0
135	135a	*A. serialis*	20
136	136a	*F. pinicola*	1
137	137a	*F. pinicola*	1
137	627	*P. caesia*	0
137	628	*P. caesia*	0
138	138c	*Basidiomycet*	0
138	138a	*Basidiomycet*	0
138	629	*Basidiomycet*	6
138	630	*Basidiomycet*	6
139	139a	*Basidiomycet*	0
139	139e	*Basidiomycet*	0
139	631	*P. caesia*	0
140	140a	*G. odoratum*	0

Sperre Nr. 5: Chratzerlibach

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
7	7a	*A. cepistipes*	1
8	8a	*S. brinkmannii*	0
9	9b	*A. cepistipes*	1
11	11a	*F. pinicola*	10
11	501	*F. pinicola*	0
11	511	*F. pinicola*	14
11	512	*F. pinicola*	10
14	14	*S. brinkmannii*	0
15	15a	*Basidiomycet*	5
19	502	*F. pinicola*	0
19	503	*F. pinicola*	17
19	504	*F. pinicola*	0
22	22a	*Basidiomycet*	0
24	550	*F. pinicola*	20
37	37	*H. annosum*	1
39	39	*Basidiomycet*	0
50	50a	*G. sepiarium*	3
50	505	*G. sepiarium*	3
50	506	*G. sepiarium*	3
50	507	*G. sepiarium*	3
51	51a	*G. sepiarium*	3
52	52a	*G. sepiarium*	4
54	54a	*F. pinicola*	17
55	55a	*F. pinicola*	17
56	56a	*F. pinicola*	18
57	57a	*F. pinicola*	18
58	58a	*F. pinicola*	19
58	508	*F. pinicola*	18
60	60a	*F. pinicola*	9
61	61a	*F. pinicola*	9
62	62a	*F. pinicola*	9
62	510	*F. pinicola*	0
63	509	*G. sepiarium*	6
64	64a	*F. pinicola*	14
64	513	*F. pinicola*	14
64	514	*G. sepiarium*	5
65	65a	*F. pinicola*	10
66	66a	*F. pinicola*	11
67	515	*F. pinicola*	11
67	516	*F. pinicola*	15
67	517	*F. pinicola*	15
68	68a	*F. pinicola*	13
68	518	*F. pinicola*	16
68	519	*F. pinicola*	13
68	520	*F. pinicola*	13
69	69a	*F. pinicola*	8
70	70a	*G. sepiarium*	1
70	524	*G. abietinum*	0
70	525	*G. abietinum*	0
70	526	*G. sepiarium*	1
70	527	*G. sepiarium*	0
70	528	*F. pinicola*	22
70	529	*G. sepiarium*	2
70	530	*G. abietinum*	1
70	531	*G. sepiarium*	0
71	71a	*G. sepiarium*	1
71	521	*T. abietinum*	0
71	522	*T. abietinum*	0
71	523	*G. abietinum*	0
72	72	*G. sepiarium*	7
73	73	*S. brinkmannii*	0
74	74	*F. pinicola*	8
75	75a	*F. pinicola*	8
76	76a	*F. pinicola*	8
76	533	*F. pinicola*	8
78	78a	*S. brinkmannii*	0
80	80a	*F. pinicola*	6
81	81	*S. brinkmannii*	0
81	536	*F. pinicola*	0
81	537	*F. pinicola*	0
83	83a	*S. brinkmannii*	0
83	542	*F. pinicola*	21
90	90	*Basidiomycet*	0
93	93	*Basidiomycet*	5
94	94	*F. pinicola*	6
95	95	*S. brinkmannii*	0
98	98	*Basidiomycet*	10
99	99	*S. brinkmannii*	0
99	534	*F. pinicola*	7
99	535	*F. pinicola*	7
100	538	*F. pinicola*	5
101	101	*A. serialis*	1
102	102	*F. pinicola*	5
104	104a	*F. pinicola*	1
104	104b	*A. serialis*	2
105	105b	*F. pinicola*	1
105	105a	*F. pinicola*	2
105	105c	*F. pinicola*	3
106	106a	*F. pinicola*	2
106	106b	*F. pinicola*	3
106	539	*F. pinicola*	3
107	107a	*F. pinicola*	4
107	540	*F. pinicola*	4
108	108a	*F. pinicola*	4
108	541	*F. pinicola*	2
115	115a	*S. brinkmannii*	0
116	116a	*S. brinkmannii*	0
117	117b	*A. cepistipes*	2

Sperre Nr. 6: Dürrenbach

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
1	1b	*Basidiomycet*	0
1	1a	*Basidiomycet*	0
2	2	*Basidiomycet*	21
3	3	*A. cepistipes*	1
4	4b	*Basidiomycet*	0
5	5	*Basidiomycet*	21
5	501	*Basidiomycet*	0
6	6a	*A. serialis*	10
6	6d	*S. brinkmannii*	0

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
7	7a	*A. serialis*	5
7	503	*A. serialis*	4
7	504	*A. serialis*	0
7	505	*A. serialis*	0
7	507	*A. serialis*	4
8	8a	*A. serialis*	5
8	506	*A. serialis*	0
8	512	*A. serialis*	0
9	9a	*A. serialis*	5
9	9e	*S. brinkmannii*	0
9	9d	*Basidiomycet*	0
9	508	*A. serialis*	0
10	10a	*A. serialis*	4
10	10b	*A. serialis*	6
10	10c	*A. serialis*	7
10	509	*A. serialis*	0
10	510	*A. serialis*	4
10	511	*A. serialis*	4
14	14a	*S. brinkmannii*	0
16	16a	*Basidiomycet*	0
19	19	*S. brinkmannii*	0
25	25	*S. brinkmannii*	0
26	26	*Basidiomycet*	0
27	27	*A. cepistipes*	1
38	38a	*S. brinkmannii*	0
41	41	*Basidiomycet*	28
48	48	*Basidiomycet*	0
49	49b	*H. annosum*	0
49	49a	*Basidiomycet*	0
53	53a	*Basidiomycet*	5
56	56a	*Basidiomycet*	0
57	57a	*G. abietinum*	1
57	57b	*Basidiomycet*	8
58	58a	*A. serialis*	1
58	513	*G. sepiarium*	1
58	514	*G. sepiarium*	2
58	515	*G. abietinum*	0
59	516	*A. serialis*	2
59	517	*A. serialis*	2
59	518	*G. abietinum*	0
59	519	*G. abietinum*	0
59	523	*G. abietinum*	0
59	528	*A. serialis*	1
59	529	*G. abietinum*	0
59	531	*G. abietinum*	0
59	532	*G. abietinum*	0
59	533	*G. abietinum*	0
59	535	*G. abietinum*	0
60	60a	*F. pinicola*	1
60	520	*A. serialis*	0
60	521	*A. serialis*	0
60	524	*G. abietinum*	0
60	525	*F. pinicola*	1
60	530	*A. serialis*	3
60	534	*G. abietinum*	0
61	61a	*F. pinicola*	1
61	522	*A. serialis*	1
61	526	*F. pinicola*	1
61	527	*F. pinicola*	1
61	537	*G. abietinum*	0
61	538	*G. abietinum*	0
61	539	*G. abietinum*	0
61	540	*G. abietinum*	0
61	541	*G. abietinum*	0
61	542	*G. abietinum*	0
61	543	*G. abietinum*	0
61	544	*G. abietinum*	0
62	62a	*F. pinicola*	1
62	536	*G. abietinum*	0
63	63a	*A. serialis*	8
63	558	*Basidiomycet*	27
63	561	*A. serialis*	8
63	571	*A. serialis*	0
64	64a	*S. brinkmannii*	0
64	547	*G. abietinum*	0
64	548	*G. abietinum*	0
64	549	*G. abietinum*	0
64	550	*G. abietinum*	0
64	551	*A. serialis*	0
64	552	*Basidiomycet*	0
64	553	*A. serialis*	0
64	554	*A. serialis*	0
64	555	*A. serialis*	0
64	556	*A. serialis*	0
64	557	*Basidiomycet*	13
64	559	*Basidiomycet*	0
64	560	*Basidiomycet*	0
64	564	*Basidiomycet*	0
64	565	*P. caesia*	0
64	566	*Basidiomycet*	0
65	65a	*A. serialis*	9
65	65b	*S. brinkmannii*	0
65	563	*A. serialis*	0
65	567	*Basidiomycet*	22
65	568	*A. serialis*	0
65	569	*Basidiomycet*	22
65	570	*A. serialis*	0
66	66a	*S. brinkmannii*	0
66	546	*Basidiomycet*	0
68	68a	*S. brinkmannii*	0
68	562	*G. sepiarium*	0

Sperre Nr. 7: Heitlibach

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
1	1	*Basidiomycet*	5
3	3	*A. cepistipes*	2
4	4a	*F. pinicola*	5
4	501	*F. pinicola*	0
4	502	*F. pinicola*	5
5	5a	*F. pinicola*	5
5	503	*F. pinicola*	0
6	6a	*F. pinicola*	4
6	504	*F. pinicola*	4
7	7a	*F. pinicola*	6
7	505	*F. pinicola*	0
7	506	*F. pinicola*	0
7	507	*F. pinicola*	0
7	508	*Basidiomycet*	0
8	8b	*F. pinicola*	2
8	8a	*F. pinicola*	6
8	524	*F. pinicola*	0
8	525	*F. pinicola*	0
8	526	*F. pinicola*	0
9	9a	*F. pinicola*	7
9	527	*F. pinicola*	2
9	528	*F. pinicola*	2
9	529	*F. pinicola*	2
10	10a	*F. pinicola*	1
10	10b	*F. pinicola*	3
10	530	*F. pinicola*	0
10	531	*F. pinicola*	3
11	11a	*F. pinicola*	1
11	11c	*Basidiomycet*	3
11	535	*Basidiomycet*	0
13	13	*F. pinicola*	19
15	15a	*Basidiomycet*	5
15	15c	*Basidiomycet*	11
15	513	*F. pinicola*	21
15	514	*T. abietinum*	0
15	515	*Basidiomycet*	0
19	509	*Basidiomycet*	5
19	510	*Basidiomycet*	11
19	511	*Basidiomycet*	11
19	512	*Basidiomycet*	11
20	20a	*Basidiomycet*	5
21	21c	*Basidiomycet*	0
22	22a	*Basidiomycet*	1
23	532	*Basidiomycet*	0
23	533	*Basidiomycet*	0
23	534	*Basidiomycet*	0
24	24b	*A. cepistipes*	1
24	516	*Basidiomycet*	4
24	517	*Basidiomycet*	4
25	518	*Basidiomycet*	4
26	26a	*A. cepistipes*	1
26	519	*Basidiomycet*	4
27	27b	*A. cepistipes*	3
27	27c	*Basidiomycet*	0
27	27a	*Basidiomycet*	1
28	28	*Basidiomycet*	0
30	521	*Basidiomycet*	0
31	31	*Basidiomycet*	0

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
32	32	*Basidiomycet*	1
32	522	*Basidiomycet*	0
35	35	*A. cepistipes*	3
36	36a	*A. cepistipes*	3
37	37a	*A. cepistipes*	3
38	38a	*H. annosum*	
39	39a	*A. cepistipes*	3
40	40a	*A. cepistipes*	3
41	41a	*A. cepistipes*	3
42	42a	*Basidiomycet*	5
42	520	*Basidiomycet*	5
43	43a	*A. cepistipes*	3
44	44a	*A. cepistipes*	3
48	48	*A. cepistipes*	0
51	51	*A. cepistipes*	0
55	55	*Basidiomycet*	1
57	57a	*A. cepistipes*	3
60	60	*S. brinkmannii*	0
61	61a	*A. cepistipes*	3
62	62	*A. cepistipes*	3
63	63a	*A. cepistipes*	7
64	64a	*A. serialis*	2
65	65d	*A. cepistipes*	3
65	65a	*A. cepistipes*	7
66	66b	*A. cepistipes*	3
66	66a	*A. cepistipes*	12
66	523	*Basidiomycet*	0
78	78b	*Basidiomycet*	0
78	78a	*Basidiomycet*	10
80	80	*Basidiomycet*	0
81	81a	*A. cepistipes*	11
82	82a	*Basidiomycet*	0
86	86a	*A. cepistipes*	11
87	87a	*Basidiomycet*	0
91	91	*A. cepistipes*	11
97	97b	*A. cepistipes*	12
100	100a	*Basidiomycet*	0
103	103	*F. pinicola*	20
107	107b	*S. brinkmannii*	0
108	108d	*Basidiomycet*	1
108	108a	*Basidiomycet*	5
108	569	*F. pinicola*	11
108	570	*Basidiomycet*	17
109	109a	*F. pinicola*	9
109	109b	*F. pinicola*	10
110	551	*Basidiomycet*	3
110	552	*Basidiomycet*	3
111	111a	*F. pinicola*	18
112	112a	*A. serialis*	1
114	114a	*A. serialis*	1
114	553	*Basidiomycet*	17
114	567	*G. sepiarium*	6
115	115a	*G. odoratum*	0
116	116a	*F. pinicola*	12
116	568	*F. pinicola*	13
117	117b	*Basidiomycet*	0
118	118a	*Basidiomycet*	0
118	542	*G. odoratum*	0
118	543	*G. odoratum*	0
118	544	*G. odoratum*	0
118	545	*G. odoratum*	0
118	546	*G. odoratum*	0
118	547	*Basidiomycet*	3
118	549	*Basidiomycet*	3
118	550	*Basidiomycet*	5
119	119a	*H. annosum*	0
120	120a	*S. brinkmannii*	0
121	121	*F. pinicola*	14
122	122a	*F. pinicola*	15
122	541	*F. pinicola*	15
123	123d	*G. sepiarium*	2
123	123a	*Basidiomycet*	0
124	559	*F. pinicola*	0
124	560	*G. sepiarium*	3
124	563	*G. sepiarium*	5
125	125a	*R. semiophora*	0
125	561	*F. pinicola*	17
125	562	*G. sepiarium*	4
125	564	*G. odoratum*	0
126	537	*G. odoratum*	0
126	538	*G. odoratum*	0
126	539	*G. odoratum*	0
126	540	*G. odoratum*	0
126	548	*F. pinicola*	16
126	565	*G. sepiarium*	0
127	127a	*G. sepiarium*	1
127	556	*G. sepiarium*	1
128	128a	*G. sepiarium*	1
128	128c	*F. pinicola*	8
128	554	*G. sepiarium*	1
128	555	*G. sepiarium*	1
129	129c	*F. pinicola*	8
129	129e	*Basidiomycet*	0
129	129a	*Basidiomycet*	9
129	536	*T. abietinum*	0
129	557	*G. sepiarium*	1
129	558	*T. abietinum*	0
129	566	*F. pinicola*	8
130	130	*Basidiomycet*	0

Sperre Nr. 8: Ebenmattgraben

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
1	1	*S. brinkmannii*	0
2	2	*Basidiomycet*	1
2	502	*Basidiomycet*	0
2	503	*Basidiomycet*	4
3	504	*H. annosum*	0
3	505	*Basidiomycet*	4
3	506	*Basidiomycet*	0
4	4b	*Basidiomycet*	4
4	4a	*Coprinus sp.*	0
4	512	*Basidiomycet*	4
5	5a	*S. brinkmannii*	0
5	513	*Basidiomycet*	0
6	6a	*Basidiomycet*	5
6	514	*A. serialis*	9
7	515	*G. sepiarium*	0
7	516	*Basidiomycet*	4
7	517	*G. sepiarium*	0
8	8a	*G. sepiarium*	1
8	518	*G. sepiarium*	0
9	9a	*G. sepiarium*	1
9	519	*G. sepiarium*	3
9	520	*G. sepiarium*	3
10	10	*S. brinkmannii*	0
10	521	*G. sepiarium*	0
10	522	*G. sepiarium*	3
10	523	*G. sepiarium*	3
10	524	*G. abietinum*	0
10	525	*G. sepiarium*	3
11	11a	*S. brinkmannii*	0
11	11c	*Basidiomycet*	26
11	526	*Basidiomycet*	0
12	12	*Basidiomycet*	4
15	15a	*G. sepiarium*	2
15	527	*G. sepiarium*	2
15	528	*G. sepiarium*	2
15	530	*G. sepiarium*	0
15	531	*G. sepiarium*	0
16	16	*G. sepiarium*	2
17	17a	*H. annosum*	0
17	17b	*Basidiomycet*	1
18	18	*Basidiomycet*	4
21	21	*S. brinkmannii*	0
22	22a	*F. pinicola*	1
22	22b	*S. brinkmannii*	0
23	23	*S. brinkmannii*	0
25	25a	*B. farinosus*	0
29	29a	*S. brinkmannii*	0
29	535	*G. odoratum*	0
29	536	*G. odoratum*	0
29	537	*G. odoratum*	0
29	538	*G. odoratum*	0
29	539	*G. odoratum*	0
29	540	*A. serialis*	8
29	541	*G. odoratum*	0
29	542	*G. odoratum*	0
29	543	*G. odoratum*	0
30	544	*A. serialis*	4
30	545	*A. serialis*	4
31	31a	*A. serialis*	7

PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
35	35b	*Basidiomycet*	0
35	35a	*Basidiomycet*	0
36	36a	*S. brinkmannii*	0
36	547	*G. sepiarium*	0
36	548	*G. sepiarium*	0
36	549	*G. sepiarium*	0
36	550	*G. sepiarium*	0
36	551	*G. sepiarium*	0
38	38c	*G. sepiarium*	4
38	38a	*G. sepiarium*	5
38	38d	*Basidiomycet*	0
40	40a	*S. brinkmannii*	0
41	41	*A. cepistipes*	1
41	562	*Basidiomycet*	7
42	552	*G. sepiarium*	0
42	553	*G. sepiarium*	0
42	560	*G. odoratum*	0
43	43a	*A. serialis*	1
43	561	*G. odoratum*	0
44	44a	*A. serialis*	1
45	45b	*A. serialis*	1
45	45a	*A. cepistipes*	1
46	46a	*A. cepistipes*	1
47	47a	*A. cepistipes*	1
48	48a	*Basidiomycet*	1
48	555	*A. serialis*	3
48	556	*Basidiomycet*	0
48	558	*A. serialis*	2
49	49a	*A. serialis*	10
49	49b	*A. cepistipes*	1
50	50a	*A. cepistipes*	1
51	51	*A. cepistipes*	1
53	53	*Basidiomycet*	7
55	55b	*Basidiomycet*	7
56	56b	*Basidiomycet*	7
58	58b	*Basidiomycet*	7
60	60a	*Basidiomycet*	7
61	61d	*Basidiomycet*	7
62	62b	*H. annosum*	0
62	62c	*Basidiomycet*	21
62	62e	*Basidiomycet*	26
63	63	*Basidiomycet*	21
66	66a	*Basidiomycet*	0

Sperre Nr. 9: Seckigraben

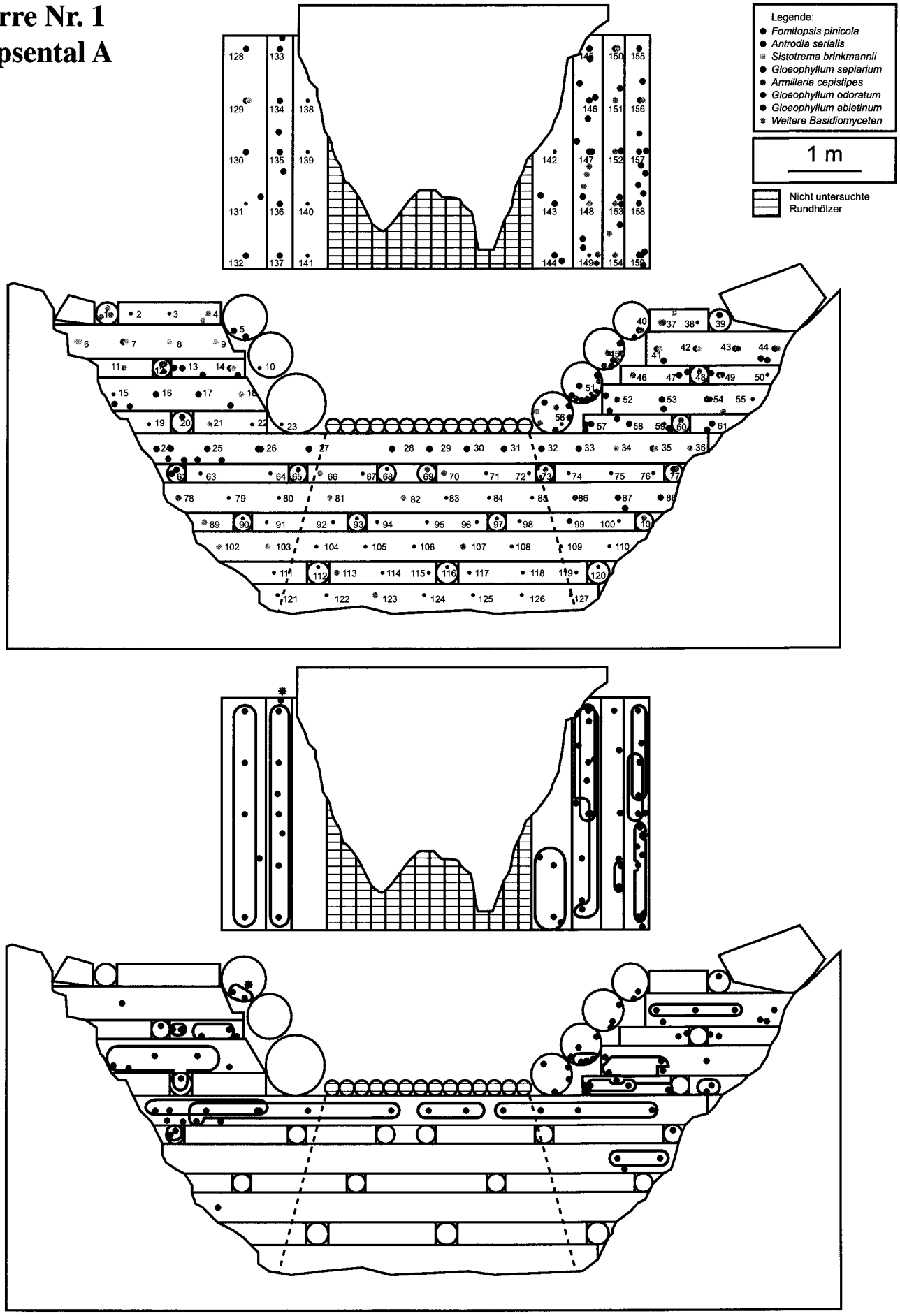
PS	Isolat	Pilzart	Gruppe
1	1d	*F. pinicola*	4
1	1a	*S. brinkmannii*	0
1	507	*F. pinicola*	5
1	508	*F. pinicola*	3
1	509	*F. pinicola*	5
1	510	*A. serialis*	3
1	511	*A. serialis*	3
1	512	*A. serialis*	0
2	2a	*F. pinicola*	6
3	3a	*F. pinicola*	6
3	502	*F. pinicola*	6
4	4a	*F. pinicola*	6
4	4c	*F. pinicola*	7
4	504	*F. pinicola*	0
4	506	*F. pinicola*	7
5	5a	*F. pinicola*	7
5	503	*F. pinicola*	7
5	505	*F. pinicola*	7
6	6a	*F. pinicola*	7
7	7c	*A. serialis*	6
7	7a	*S. brinkmannii*	0
7	501	*A. serialis*	0
8	8a	*F. pinicola*	9
9	9a	*F. pinicola*	8
9	513	*F. pinicola*	8
10	10a	*F. pinicola*	8
10	514	*F. pinicola*	8
11	11a	*F. pinicola*	8
12	12a	*G. odoratum*	0
12	12c	*G. odoratum*	0
14	14	*A. cepistipes*	4
15	15a	*A. cepistipes*	4
17	17	*F. pinicola*	10
18	18a	*A. cepistipes*	3
19	19	*Basidiomycet*	15
31	31	*A. cepistipes*	1
41	41a	*A. serialis*	4
41	536	*G. odoratum*	0
42	42b	*A. serialis*	4
45	45b	*Basidiomycet*	26
46	46c	*G. odoratum*	0
46	46a	*H. annosum*	0
46	46b	*Coprinus sp.*	0
47	47a	*A. serialis*	5
47	47b	*H. annosum*	0
47	47c	*H. annosum*	0
48	48c	*A. serialis*	5
48	48d	*H. annosum*	0
48	48b	*H. annosum*	0
48	48a	*Basidiomycet*	0
49	49a	*H. annosum*	0
49	49b	*S. brinkmannii*	0
50	50a	*A. cepistipes*	2
52	52a	*A. cepistipes*	2
54	54a	*G. odoratum*	0
54	54c	*Basidiomycet*	0
54	54b	*Basidiomycet*	0
54	515	*G. odoratum*	0
54	516	*G. odoratum*	0
54	517	*G. odoratum*	0
54	518	*G. odoratum*	0
54	519	*G. odoratum*	0
54	520	*G. odoratum*	0
54	521	*F. pinicola*	2
54	522	*G. odoratum*	0
54	523	*G. odoratum*	0
54	524	*A. serialis*	1
54	525	*A. serialis*	1
54	526	*A. serialis*	2
55	55c	*G. odoratum*	0
55	55b	*G. odoratum*	0
55	55a	*Basidiomycet*	0
56	56a	*F. pinicola*	1
57	57a	*F. pinicola*	1
58	58a	*F. pinicola*	1
58	543	*F. pinicola*	1
59	59a	*F. pinicola*	1
59	542	*F. pinicola*	0
60	60a	*F. pinicola*	1
61	61a	*F. pinicola*	1
62	62a	*A. cepistipes*	1
63	63	*Basidiomycet*	28
69	69a	*S. brinkmannii*	0
69	69b	*Basidiomycet*	0
69	538	*G. odoratum*	0
69	539	*G. odoratum*	0
69	540	*G. odoratum*	0
69	541	*G. odoratum*	0
85	85a	*G. odoratum*	0
85	85b	*G. odoratum*	0
85	544	*G. odoratum*	0
85	545	*G. odoratum*	0
85	546	*G. odoratum*	0
85	547	*G. odoratum*	0
85	548	*G. odoratum*	0
85	549	*G. odoratum*	0
85	550	*G. odoratum*	0
86	86b	*A. cepistipes*	1
92	537	*Basidiomycet*	0
96	96	*Coprinus sp.*	0

Anhang II

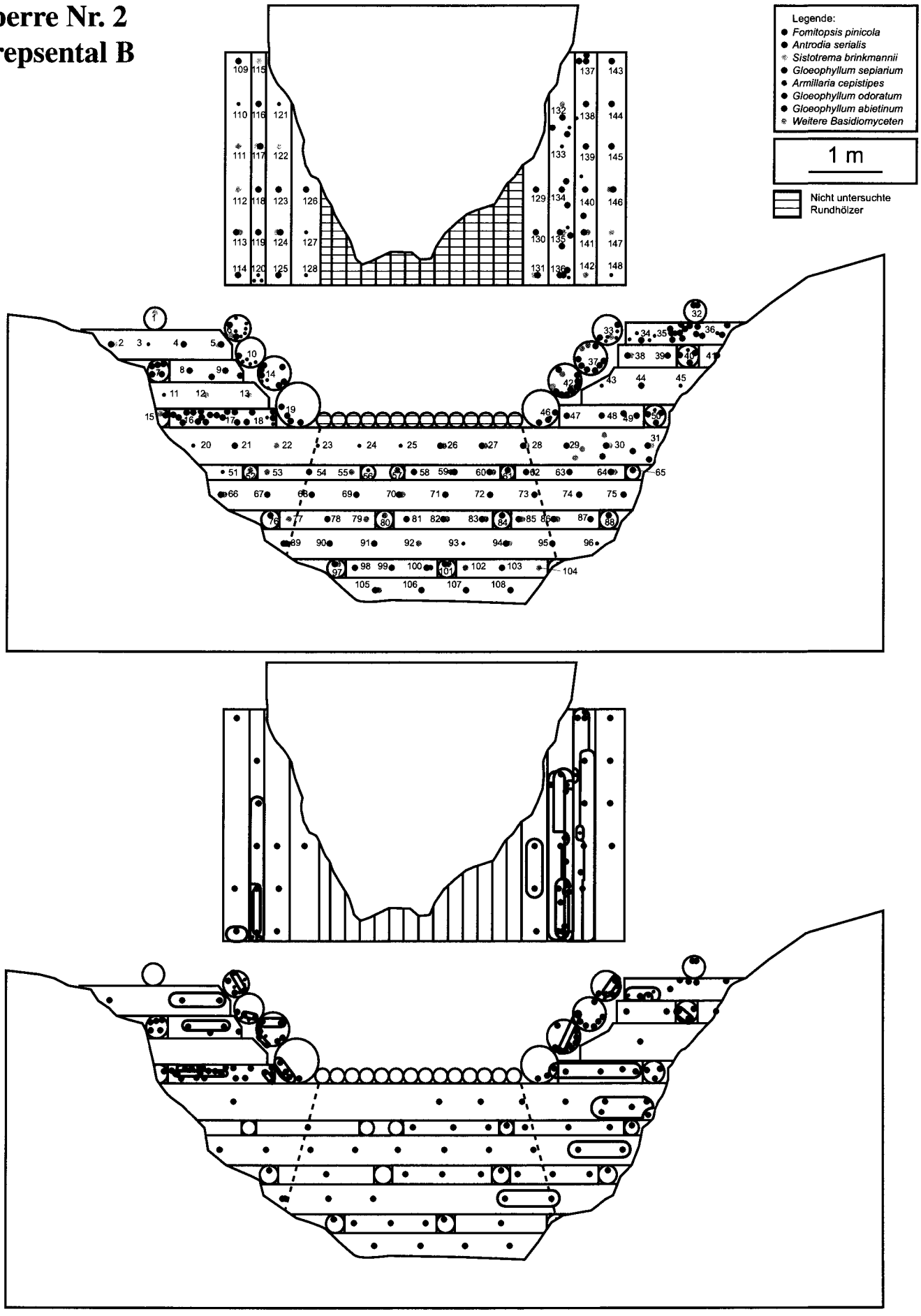
Graphische Darstellung aller untersuchten Sperren. Bei Holzkastensperren ist jeweils eine Aufsicht auf die Sperre und eine talseitige Ansicht wiedergegeben. Bei einwandigen Holzsperren ist nur die talseitige Ansicht dargestellt.

In der oberen Skizze sind alle Probestellen (Nummern) markiert, in der unteren Skizze die VC-Gruppen der häufigsten Fäuleerreger. Die verschiedenen Pilzarten sind mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet. Auf eine Numerierung der Fruchtkörperfunde wurde der Übersicht halber verzichtet.

Sperre Nr. 1
Trepsental A



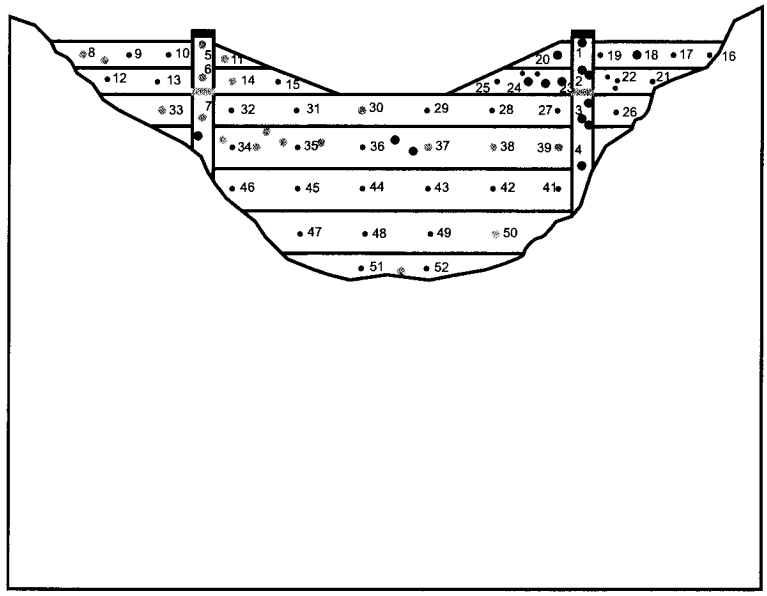
Sperre Nr. 2
Trepsental B

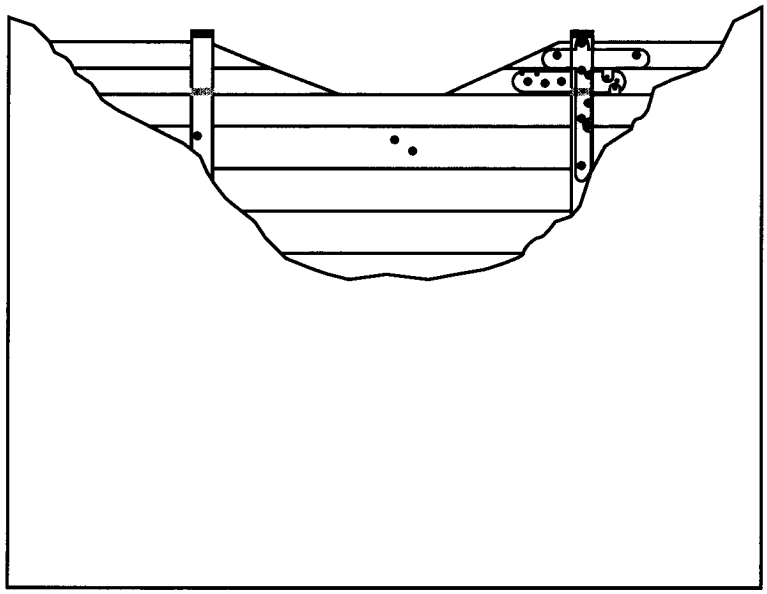


Sperre Nr. 3
Steingraben

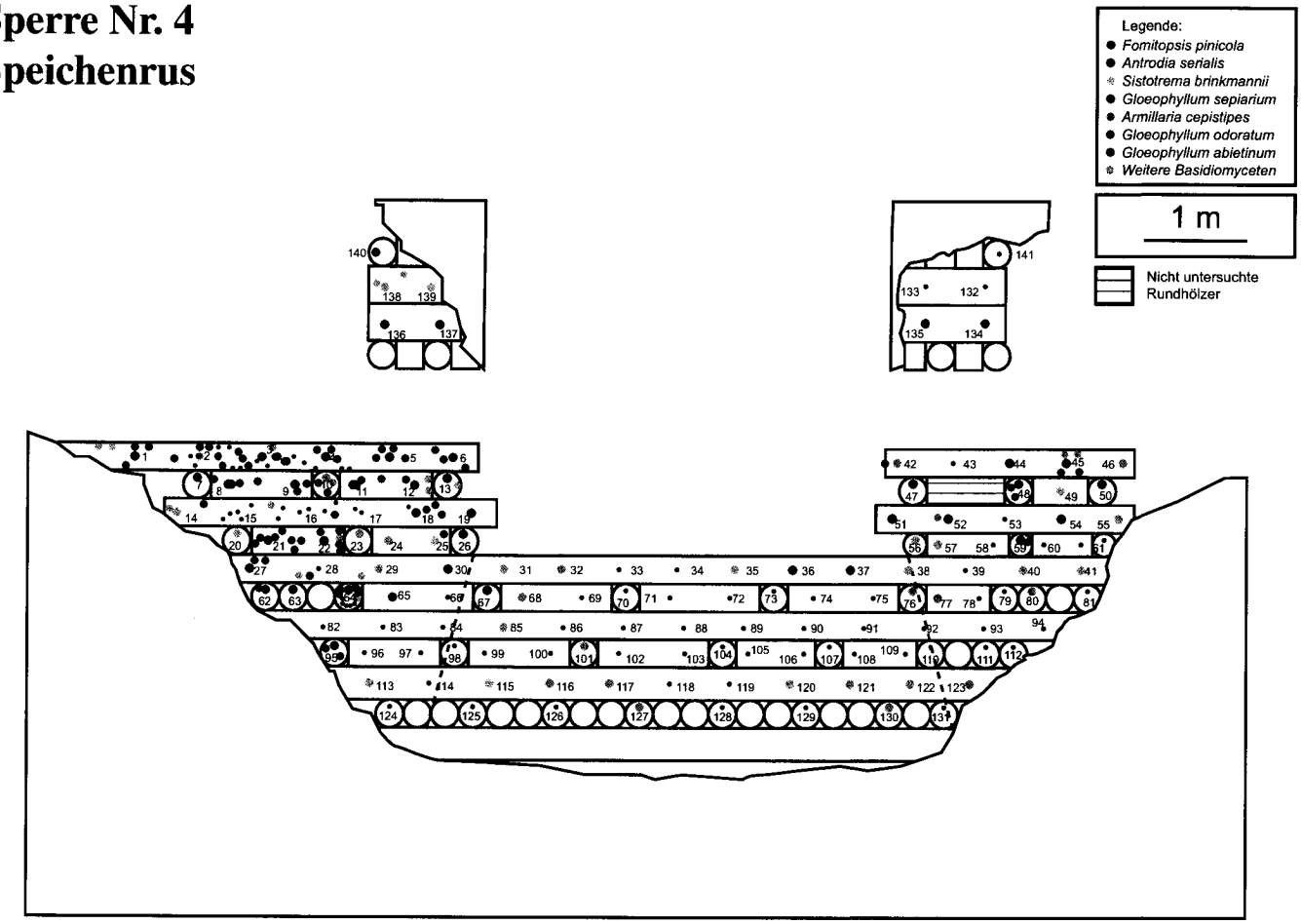
Legende:
- *Fomitopsis pinicola*
- *Antrodia serialis*
- *Sistotrema brinkmannii*
- *Gloeophyllum sepiarium*
- *Armillaria cepistipes*
- *Gloeophyllum odoratum*
- *Gloeophyllum abietinum*
- *Weitere Basidiomyceten*

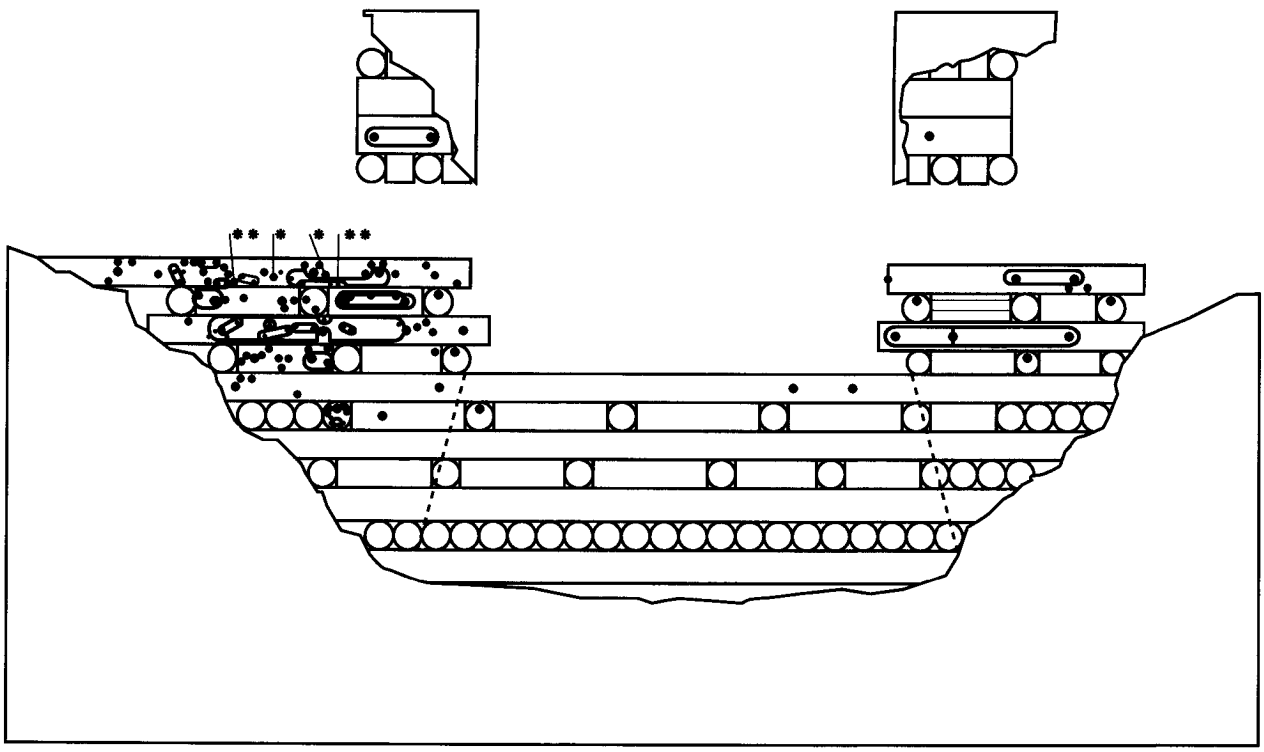
1 m



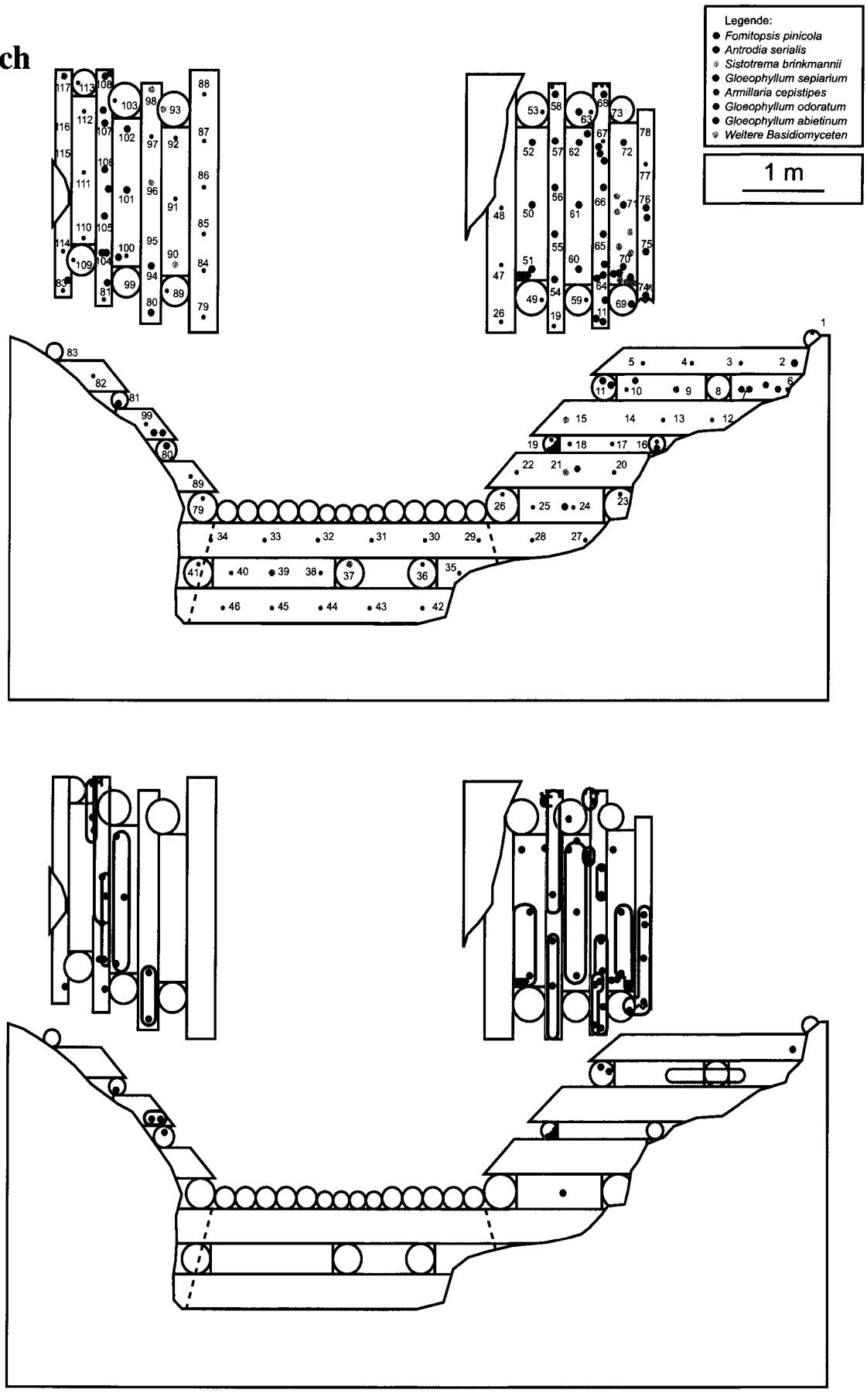


Sperre Nr. 4
Speichenrus





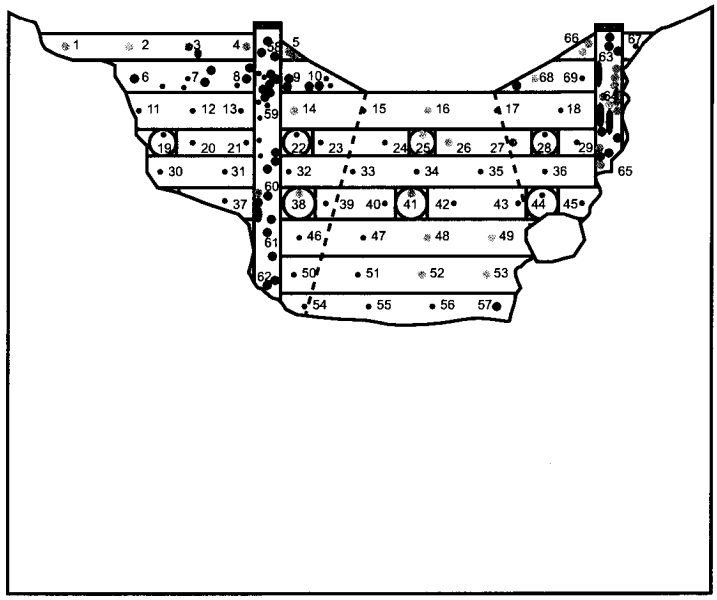
Sperre Nr. 5
Chratzerlibach

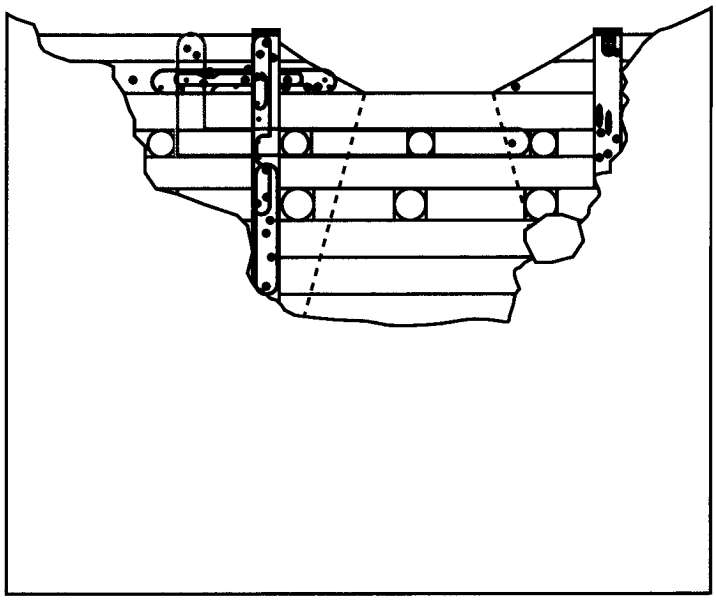


Sperre Nr. 6
Dürrenbach

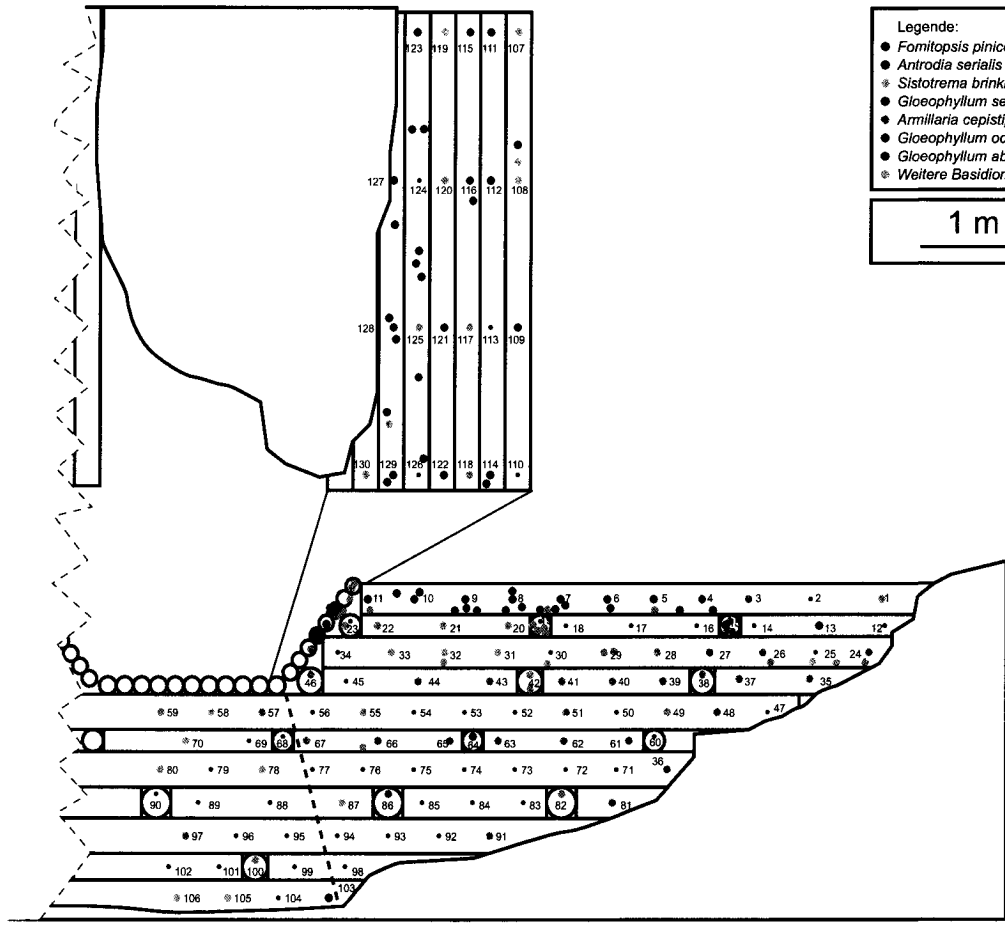
Legende:
- *Fomitopsis pinicola*
- *Antrodia serialis*
- *Sistotrema brinkmannii*
- *Gloeophyllum sepiarium*
- *Armillaria cepistipes*
- *Gloeophyllum odoratum*
- *Gloeophyllum abietinum*
- *Weitere Basidiomyceten*

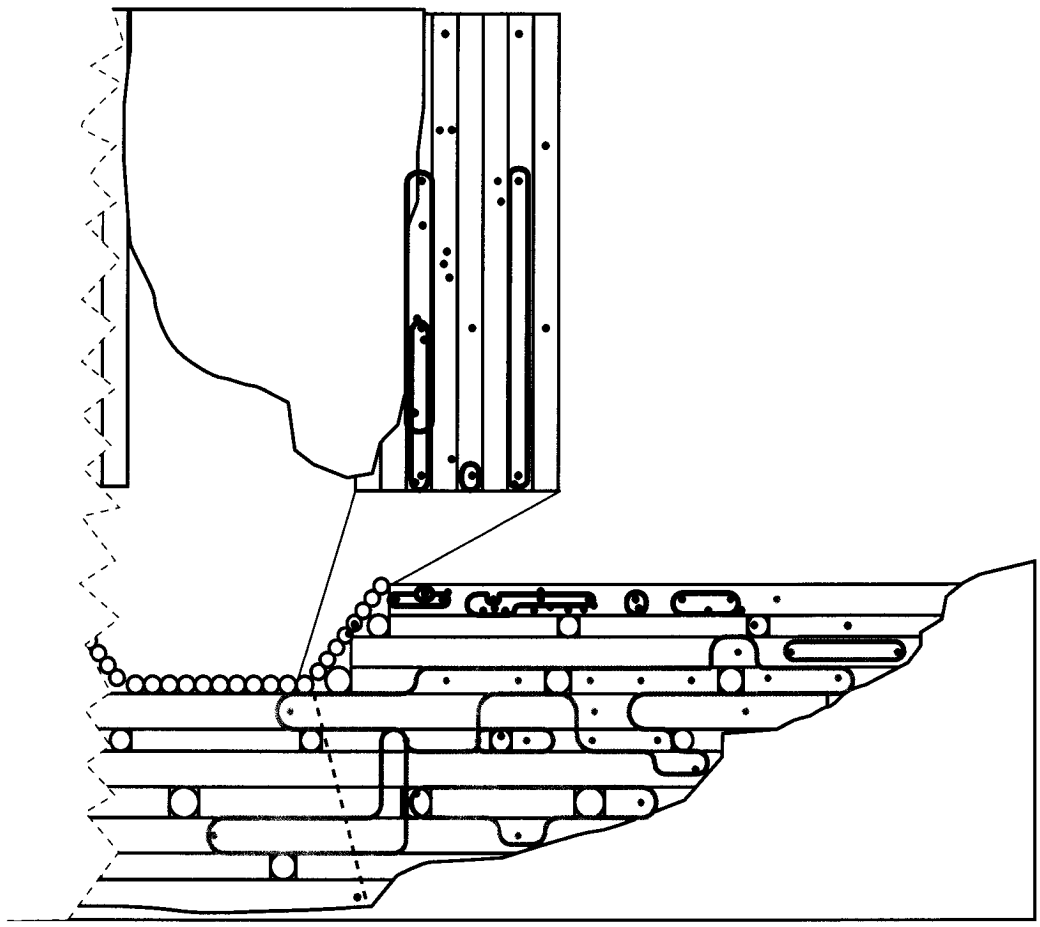
1 m



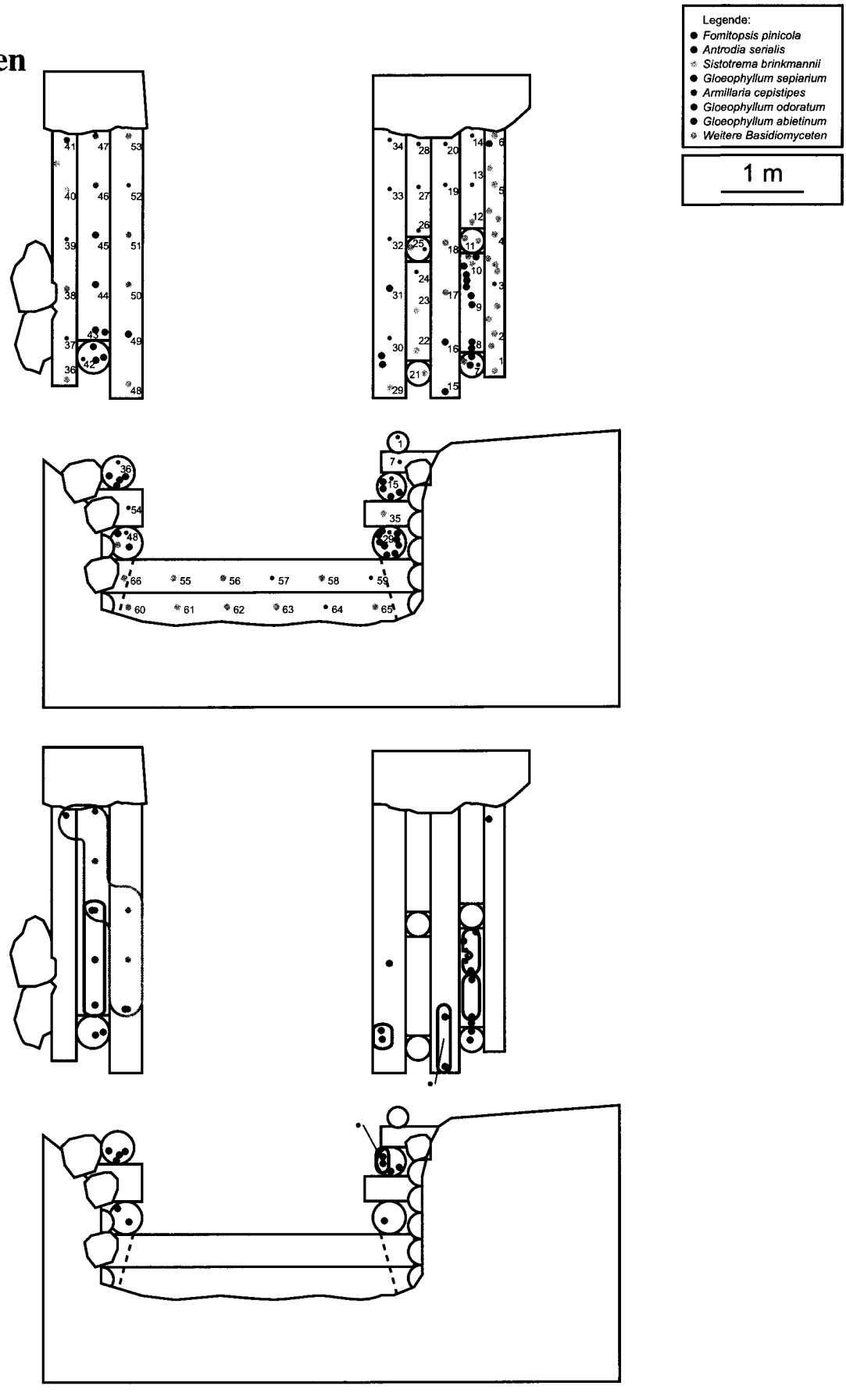


Sperre Nr. 7
Heitlibach

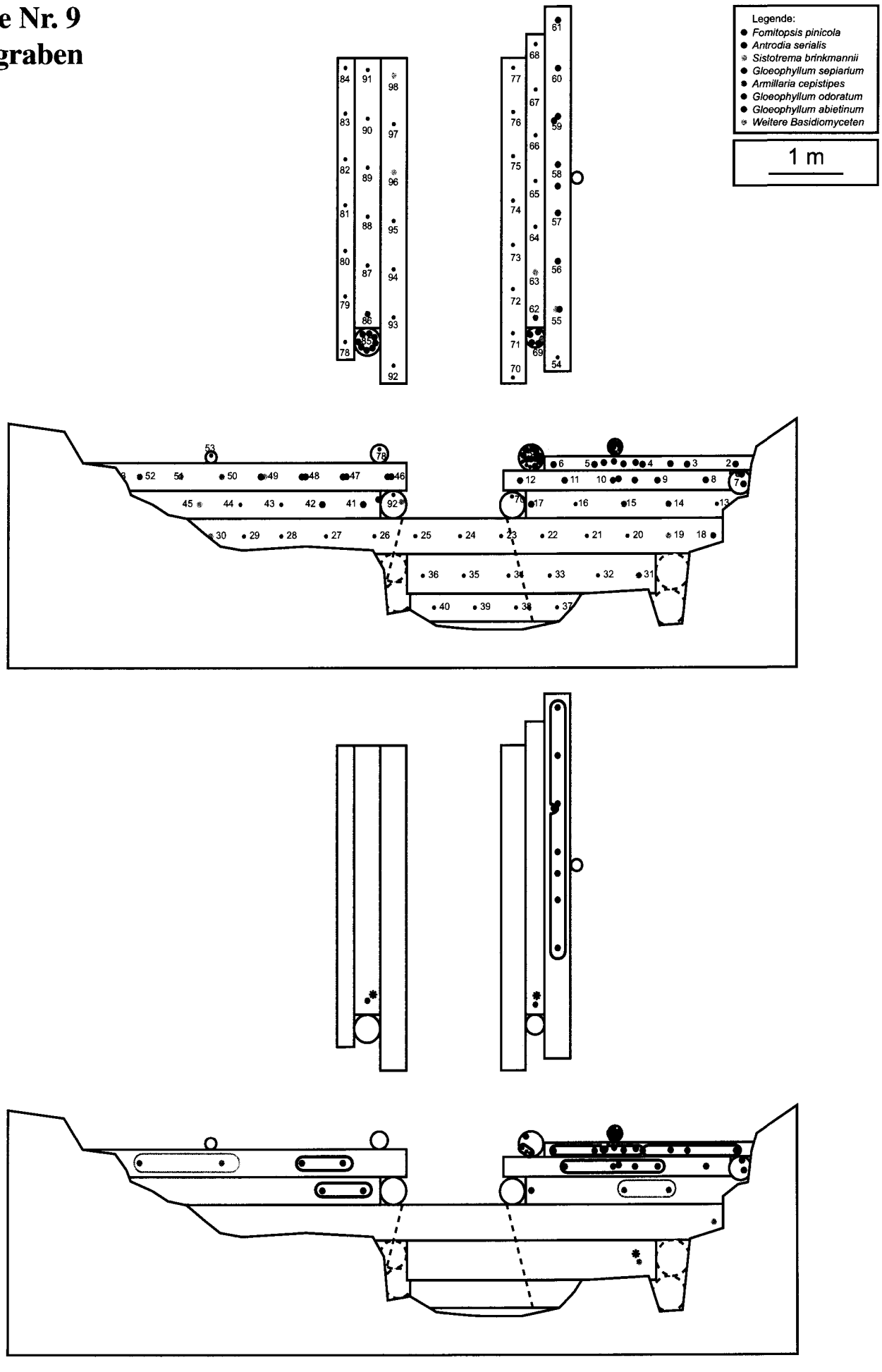




Sperre Nr. 8
Ebenmattgraben



Sperre Nr. 9
Seckigraben



Anhang III

Kriterien zur Analyse von Bohrkurven des Resistographen 1410

Das neu entwickelte Programm zur Quantifizierung von Bohrkurven des Resistographen 1410 basiert auf einer graphischen Analyse der Bohrprofile. Dabei werden deutliche Einbrüche der Kurve automatisch ermittelt und deren Länge als Anteil der gesamten Kurve als *Fäulegrad* definiert. Die Feststellung eines deutlichen Einbruchs der Kurve erfolgt anhand eines *individuellen Referenzniveaus* für jede Kurve, was eine Beurteilung ohne Verzerrung durch lokal vorhandene Einflussfaktoren wie Wassergehalt, Jahrringbau oder Astigkeit ermöglicht. Zur Ermittlung dieses Referenzniveaus dienen die nachfolgend beschriebenen Kriterien, welche auch bei der visuellen Beurteilung der Kurven eingesetzt werden.

Definition des normalen Kurvenverlaufs und Referenzniveau

Bei Bohrkurven von intaktem Nadelholz wird jeder Jahrring entsprechend der unterschiedlichen Dichte von Früh- und Spätholz in der Kurve abgebildet, so dass eine charakteristische Schwingung der Kurve entsteht (Mattheck & Hötzel 1997). Die Amplitude dieser Schwingung nimmt mit fortschreitender Fäule ab und verschwindet bei totaler Holzzerstörung ganz. Gleichzeitig sinkt das Bohrwiderstandsniveau ab (vergl. Abbildung 3.2 S.38).

Bei der Computeranalyse werden von jeder Bohrkurve zunächst jene Bereiche ermittelt, welche eine *intakte Jahrringstruktur* aufweisen. Der Mittelwert aller Messpunkte dieser Bereiche wird in der Folge als individueller, „normaler" Bohrwiderstand für gesundes Holz an der betreffenden Probestelle betrachtet. Für einen Jahrring gelten folgende Kriterien (Abbildung A.1):

1. Zwischen zwei Tiefpunkten im Bohrprofil weist die Kurve (Frühholz, Jahrringgrenzen) einen markanten Ausschlag nach oben auf (Spätholz). Zur Quantifizierung dieses Ausschlags dient in Anlehnung an Rinn *et al.* (1996) die Standardabweichung der Messpunkte zwischen den Jahrringgrenzen. Als Minimalwert für einen intakten Jahrring wurde aufgrund von Vorversuchen eine Standardabweichung von 25 festgelegt.
2. Als Mittelwert für den Bohrwiderstands eines intakten Jahrrings wird ein Minimum von 200 vorausgesetzt (Gruber 2000).
3. Der Abstand zwischen zwei Jahrringgrenzen beträgt maximal 5 mm.

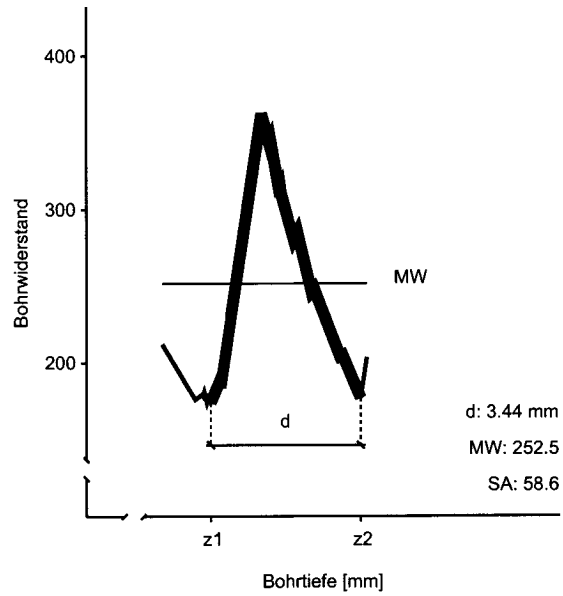


Abbildung A.1: Definition eines intakten Jahrrings in einer Bohrkurve des Resistographen. Zwischen zwei Tiefpunkten der Kurve (z_1 und z_2, Jahrringgrenzen) müssen folgende Kriterien erfüllt sein: Mittelwert (MW) aller Messpunkte > 200; Standardabweichung (SA) aller Messpunkte > 25; Abstand ($d = z_2 - z_1$) der Jahrringgrenzen < 5 mm. Im dargestellten Beispiel sind alle dieser Vorgaben erfüllt.

Die Ermittlung des *Referenzniveaus* für die Kurve erfolgt nach folgenden Kriterien (Abbildung 3A.2):

1. Bei mehreren aufeinanderfolgenden intakten Jahrringen wird der Mittelwert der Messwerte zwischen dem ersten und dem letzten dieser Jahrringe als „normales Bohrwiderstandsniveau" für die Kurve festgelegt.
2. Bei mehreren normalen Niveaus einer Bohrkurve (was beispielsweise nach dem Durchbohren eines Astes und der anschliessenden erhöhten Schaftreibung der Bohrnadel bedingt sein kann) wird das tiefstliegende verwendet.
3. Zur Definition des *Referenzniveaus* der Kurve, welches als Schwellenwert für eine Fäulnis diente, wird vom tiefstliegenden, normalen Bohrwiderstandsniveau eine Standardabweichung (bezogen auf jene Messpunkte, welche diese Niveau bestimmen) subtrahiert. Damit wird sichergestellt, dass nur deutliche Einbrüche der Kurve als Fäule erfasst werden.

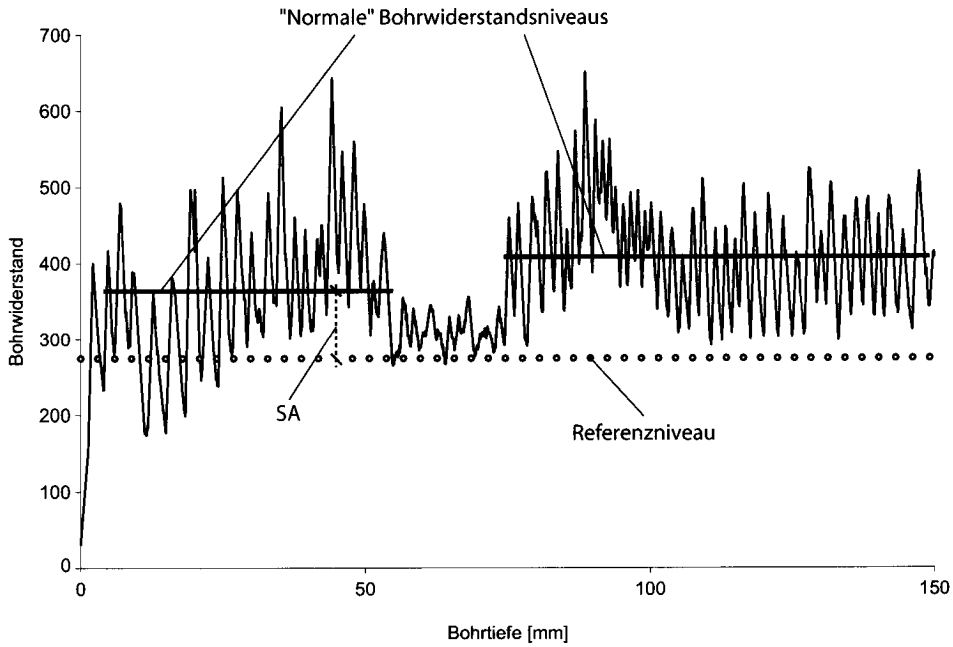


Abbildung 3A.2: Ermittlung des individuellen Referenzniveaus einer Bohrkurve. Der Mittelwert aller Messwerte zwischen aufeinanderfolgenden intakten Jahrringen wird als individueller, normaler Bohrwiderstand für diese Probestelle betrachtet (—). Bei mehreren derartigen Niveaus wurde vom tiefstliegenden eine Standardabweichung (SA) subtrahiert und dieser Wert als Referenzniveau der Kurve definiert (∘∘∘∘).

Definition des Fäulegrades

Als faul gelten jene Abschnitte einer Bohrkurve, welche über eine Strecke von minimal 5 mm unterhalb des Referenzniveaus verlaufen. Durch diesen Minimalwert kann vermieden werden, dass einerseits schmale Risse (Niemz *et al.* 2002), andererseits aber auch ein Absinken des Bohrwiderstands im Frühholz eines Jahrrings als Fäule taxiert wird. Der Anteil dieser Abschnitte an der gesamten Bohrstrecke wird als *Fäulegrad* in Prozent definiert (vergl. Abbildung 3.2, S. 38). Bei Bohrkurven, welche nach obiger Definition keine intakten Jahrringe und somit auch kein Referenzniveau aufweisen, wird die ganze Bohrstrecke als faul taxiert (Fäulegrad 100%).

Anhang IV

Parameter der statistischen Analyse für jede Probestelle. Einflussfaktoren, welche sich auf die Sperre beziehen, sind nur einmal am Anfang wiedergegeben. Nr.: Nummer der Probestelle (vergl. Anhang II); Fg: Fäulegrad [%]; Bo: Bohrtiefe [cm]; D: Durchmesser des Rundholzes; Holz: Holzart (1: Fichte, 2: Tanne); BT: Bauteil (1: Flügel, 2: Einbindung, 3: Wasserbereich); Stirn: Probestelle an Stirnseite (1) oder nicht (0); Pilzarten: (0/1: nicht vorhanden/vorhanden) *F.p.*: *Fomitopsis pinicola*, *A.s.*: *Antrodia serialis*, *S.b.*: *Sistotrema brinkmannii*, *G.s.*: *Gloeophyllum sepiarium*, *A.c.*: *Armillaria cepisitipes*; *G.o.*: *Gloeophyllum odoratum*.

Sperre Nr. 1: Trepsental A

Meereshöhe: 930 m ü.M. **Exposition:** Nord-Ost **Baujahr:** 1988

Nr.	Fg	Bo	D	Holz	BT	Stirn	*F.p.*	*A.s*	*S.b.*	*G.s.*	*A.c.*	*G.o*
1	15.60	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0
2	37.20	15	40	1	1	0	0	0	1	0	0	0
3	26.10	15	40	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	29.60	15	40	1	1	0	0	1	0	0	0	0
5	12.10	15	40	1	1	1	0	1	1	0	0	0
6	78.70	15	35	1	1	1	0	1	1	1	0	0
7	55.30	15	30	3	1	1	1	0	0	0	0	0
8	33.70	15	30	1	1	1	1	0	0	0	0	0
9	100.00	15	30	1	1	1	1	0	0	0	0	0
10	100.00	15	40	1	1	1	0	1	0	0	0	0
11	4.50	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
12	4.00	15	35	1	1	0	0	0	1	0	0	0
13	65.30	15	35	1	1	1	0	0	1	0	0	0
14	10.90	15	45	1	1	1	1	1	0	0	0	0
15	85.50	15	25	3	1	1	0	1	1	0	0	0
16	11.80	15	25	1	1	1	0	0	0	1	0	0
17	34.40	15	25	1	1	0	0	0	0	1	0	0
18	39.10	15	25	1	1	1	0	0	0	1	0	0
19	80.00	15	60	1	3	1	1	1	0	0	0	0
20	0.00	15	50	2	2	0	0	0	0	0	0	0
21	0.00	15	50	2	2	0	0	0	0	0	0	0
22	4.70	15	50	2	2	0	0	0	0	0	0	0
23	5.00	15	50	2	3	0	0	0	0	0	0	0
24	4.20	15	50	2	3	0	0	0	0	0	0	0
25	0.00	15	50	2	3	0	0	0	0	0	0	0
26	0.00	15	50	2	3	0	1	0	0	0	0	0
27	4.90	15	50	2	3	0	1	0	0	0	0	0
28	5.90	15	50	2	3	0	1	0	0	0	0	0
29	15.90	15	50	2	2	0	0	0	0	0	0	0
30	56.40	15	50	2	2	0	1	0	1	0	0	0
31	33.00	15	50	2	2	0	1	0	1	0	0	0
32	33.80	15	30	1	1	1	0	1	0	0	0	0
33	23.20	15	45	1	1	1	0	1	1	0	0	0
34	27.00	15	30	1	1	1	0	1	0	0	0	0
35	27.50	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0
36	10.60	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0
37	27.40	15	45	1	1	1	1	1	0	0	0	0
38	19.90	15	30	2	1	1	1	0	1	0	0	0
39	4.30	15	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0
40	69.60	15	30	1	1	1	0	1	0	0	0	0
41	4.90	15	30	1	1	1	1	0	0	0	0	0
42	68.60	15	45	1	1	1	1	0	0	0	0	0
43	3.90	15	50	1	1	1	0	0	0	0	0	0
44	4.00	15	50	1	1	0	0	0	0	0	0	0
45	12.10	15	50	1	1	0	0	0	0	0	0	0
46	63.50	15	50	1	3	1	1	0	0	0	0	0
47	49.20	15	30	1	1	1	1	0	0	0	0	0
48	67.70	15	30	1	1	0	1	0	0	0	0	0
49	92.30	15	30	1	1	1	1	0	0	0	0	0
50	13.30	15	30	1	1	1	1	1	0	1	0	0
51	4.00	15	20	1	2	1	0	0	0	0	0	0
52	3.70	15	20	1	2	1	0	0	0	0	0	0
53	4.30	15	20	2	2	1	0	0	0	0	0	0
54	7.30	15	20	2	3	0	1	0	0	0	0	0
55	3.60	15	20	2	3	1	0	0	0	0	1	0
56	0.00	15	20	2	3	1	0	0	0	0	0	0
57	23.40	15	20	1	3	1	0	0	0	0	0	0
58	32.40	15	20	2	3	1	1	0	0	0	0	0
59	6.30	15	20	2	3	0	0	1	0	0	0	0
60	4.60	15	20	2	3	1	1	0	0	0	0	0
61	0.00	15	20	1	3	1	1	0	0	0	0	0
62	0.00	15	20	2	3	1	1	0	0	0	0	0
63	19.40	15	20	2	2	0	0	0	0	0	0	0
64	9.90	15	20	2	2	1	0	0	0	0	0	0
65	41.90	15	20	1	2	1	1	0	0	0	0	0
66	10.00	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0
67	20.00	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0
68	0.00	15	40	1	3	0	1	0	0	0	0	0
69	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
70	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
71	0.00	15	40	1	3	0	1	0	0	0	0	0
72	0.00	15	40	1	3	0	1	0	0	0	0	0
73	23.40	15	40	1	3	0	1	0	0	0	0	0
74	7.20	15	40	1	2	0	1	0	0	0	0	0
75	31.00	15	40	1	2	0	1	0	0	0	0	0
76	3.40	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0
77	5.30	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
78	3.80	15	25	1	3	0	0	0	0	0	0	0
79	3.80	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
80	9.30	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
81	4.50	15	25	1	3	1	1	0	0	0	0	0
82	16.80	15	25	1	3	0	1	0	0	0	0	0
83	4.00	15	25	1	3	1	1	0	0	0	0	0
84	8.10	15	25	1	3	1	1	0	0	0	0	0

85	6.00	15	25	1	3	1	1	0	0	0	0	0
86	0.00	15	25	1	3	0	0	0	0	0	0	0
87	0.00	15	25	1	2	1	1	0	0	0	0	0
88	22.60	15	25	2	2	1	1	0	0	0	0	0
89	8.90	15	40	1	3	0	1	1	0	0	0	0
90	10.10	15	40	1	3	0	0	1	0	0	0	0
91	0.00	15	40	1	3	0	1	0	0	0	0	0
92	3.60	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
93	9.30	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
94	3.80	15	40	1	3	0	1	0	0	0	0	0
95	10.70	15	40	1	3	0	1	0	0	0	0	0
96	0.00	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0
97	5.50	15	25	2	3	1	1	0	0	0	0	0
98	12.70	15	25	1	3	1	1	0	0	0	0	0
99	7.00	15	25	1	3	0	1	0	0	0	0	0
100	8.40	15	25	1	3	1	1	0	0	0	0	0
101	4.40	15	25	1	3	1	1	0	0	0	0	0
102	5.00	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
103	11.50	15	25	1	3	0	1	0	0	0	0	0
104	13.60	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
105	4.80	15	35	1	3	0	1	0	0	0	0	0
106	4.00	15	35	1	3	0	1	0	0	0	0	0
107	0.00	15	35	1	3	0	0	1	0	0	0	0
108	0.00	15	35	1	3	0	1	0	0	0	0	0
109	0.00	15	35	1	1	1	0	1	0	0	0	0
110	14.10	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
111	3.40	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
112	23.30	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
113	14.50	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
114	4.40	15	35	1	1	1	0	1	0	1	0	0
115	4.90	15	40	1	1	1	0	0	1	0	0	0
116	0.00	15	40	1	1	0	1	0	0	0	0	0
117	28.90	15	40	1	1	0	0	1	1	0	0	0
118	4.80	15	40	1	1	0	0	1	0	0	0	0
119	10.20	15	40	1	1	0	0	1	0	0	0	0
120	84.00	15	40	1	1	1	0	1	0	0	0	0
121	3.50	15	45	1	1	0	0	0	0	0	0	0
122	17.40	15	45	1	1	0	0	0	1	0	0	0
123	36.80	15	45	1	1	0	0	1	0	0	0	0
124	35.30	15	45	1	1	0	0	1	1	0	0	0
125	37.80	15	45	1	1	1	0	0	0	0	0	0
126	3.60	15	60	1	1	0	0	0	0	0	0	0
127	8.40	15	60	1	1	0	0	0	0	0	0	0
128	3.70	15	60	1	1	1	0	0	0	0	0	0
129	13.40	15	50	1	1	0	1	0	0	0	0	0
130	28.80	15	50	1	1	0	1	0	0	0	0	0
131	23.00	15	50	1	1	1	0	1	1	0	0	0
132	0.00	15	45	1	1	0	0	0	0	1	0	0
133	14.60	15	45	1	1	0	1	0	0	1	0	0
134	29.60	15	45	1	1	0	1	0	0	1	0	0
135	7.40	15	45	1	1	0	1	0	0	1	0	0
136	41.70	15	45	1	1	1	1	1	0	1	0	1
137	30.00	15	45	1	1	1	1	0	0	0	0	0
138	49.30	15	45	1	1	0	1	0	0	0	0	0
139	59.00	15	45	1	1	0	1	0	0	0	0	0
140	80.90	15	45	1	1	0	1	0	0	0	0	0
141	88.60	15	45	1	1	0	1	0	0	0	0	0
142	86.70	15	45	1	1	1	1	0	0	0	0	0
143	33.10	15	45	1	1	1	0	1	0	0	0	0
144	27.30	15	45	1	1	0	0	1	0	0	0	0
145	20.10	15	45	1	1	0	0	1	0	0	0	0
146	40.20	15	45	1	1	0	0	1	0	0	0	0
147	100.00	15	45	1	1	0	0	0	1	0	0	0
148	100.00	15	45	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Sperre Nr. 2: Trepsental B

Meereshöhe: 930 m ü.M. **Exposition:** Nord-Ost **Baujahr:** 1988

Nr.	Fg	Bo	D	Holz	BT	Stirn	*F.p.*	*A.s*	*S.b.*	*Gs.*	*A.c.*	*Go*
1	6.50	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0
2	0.00	15	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0
3	11.80	15	30	2	1	0	0	0	0	0	0	0
4	8.30	15	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0
5	38.00	15	60	2	1	1	1	0	0	0	0	0
6	0.00	15	45	1	1	0	0	0	1	0	0	0
7	6.90	15	45	1	1	0	0	1	1	0	0	0
8	11.20	15	45	1	1	0	0	0	1	0	0	0
9	6.50	15	45	1	1	1	0	0	1	0	0	0
10	16.80	15	60	2	1	1	0	0	0	0	0	0
11	6.90	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0
12	71.10	15	25	1	1	1	0	1	0	0	0	0
13	65.00	15	25	1	1	1	0	1	0	0	0	0
14	39.40	15	25	1	1	1	0	1	1	0	0	0
15	4.10	15	45	2	1	0	1	0	0	0	0	0
16	14.90	15	45	2	1	0	1	0	0	0	0	0
17	67.10	15	45	2	1	0	1	0	0	0	0	0
18	89.30	15	45	2	1	1	1	0	0	0	0	0
19	35.50	15	30	2	1	1	0	0	0	0	1	0
20	100.00	15	30	1	1	1	1	0	0	0	0	0
21	19.40	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0
22	25.60	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
23	3.60	15	80	2	1	1	0	0	0	0	0	0
24	62.40	15	40	1	2	0	0	1	0	1	0	0
25	40.10	15	40	1	2	0	0	1	0	1	0	0
26	50.00	15	40	1	2	0	0	1	0	1	0	0
27	29.70	15	40	1	3	0	0	1	0	0	0	0
28	44.50	15	40	1	3	0	0	1	0	0	0	0
29	32.60	15	40	1	3	0	0	1	0	0	0	0
30	19.00	15	40	1	3	0	0	1	0	0	0	0
31	12.80	15	40	1	3	0	0	1	0	0	0	0
32	26.40	15	40	1	3	0	0	1	0	0	0	0
33	52.80	15	40	1	2	0	0	1	0	0	0	0
34	34.50	15	40	1	2	0	0	0	1	0	0	0
35	0.00	15	40	1	2	0	0	1	1	0	0	0
36	3.80	15	40	1	2	0	0	0	1	0	0	0
37	31.90	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0
38	30.70	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
39	4.40	15	30	1	1	1	0	1	0	0	0	0

40	31.60	15	50	1	1	1	0	1	0	0	0	0	95	11.20	15	25	2	3	0	0	0	0	0	0
41	26.80	15	45	1	1	1	0	1	1	0	0	0	96	19.70	15	25	2	3	1	0	0	0	0	0	0
42	46.60	15	45	1	1	0	0	1	1	0	0	0	97	0.00	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
43	14.20	15	45	1	1	0	0	1	1	0	0	0	98	0.00	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
44	5.50	15	45	1	1	0	0	1	0	0	0	0	99	12.20	15	25	1	3	0	0	0	1	0	0	0
45	14.60	15	55	1	1	1	0	1	0	0	0	0	100	0.00	15	25	1	2	1	0	0	0	0	1	0
46	72.90	15	25	1	1	1	0	0	1	0	0	0	101	5.90	15	25	1	2	1	0	0	1	0	0	0
47	78.50	15	25	1	1	1	0	1	0	0	0	0	102	5.40	15	40	1	2	0	1	0	0	0	0	0
48	42.40	15	25	1	1	1	0	0	1	0	0	0	103	7.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
49	37.30	15	25	1	1	1	0	1	1	0	0	0	104	8.30	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
50	23.30	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0	105	3.60	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
51	70.90	15	55	1	1	1	1	1	0	0	0	0	106	5.10	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
52	68.80	15	40	1	1	1	0	1	1	0	0	0	107	4.70	15	40	1	3	0	0	0	1	0	0	0
53	45.80	15	40	1	1	0	0	1	0	0	0	0	108	4.60	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
54	5.80	15	40	1	1	0	0	1	1	0	0	0	109	7.40	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
55	5.90	15	40	1	1	0	0	0	0	0	0	0	110	0.00	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0
56	27.70	15	55	1	1	1	1	1	0	0	0	1	111	4.20	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
57	65.00	15	25	1	1	1	1	0	0	0	0	0	112	10.30	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
58	73.40	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0	113	9.70	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
59	82.60	15	25	1	1	1	1	0	0	0	0	0	114	4.90	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
60	4.70	15	25	1	1	1	0	0	1	0	0	0	115	12.90	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
61	18.40	15	25	1	1	1	1	0	0	0	0	0	116	4.10	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
62	4.90	15	25	1	2	1	0	1	0	0	0	0	117	13.30	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
63	0.00	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0	118	6.10	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
64	8.20	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0	119	16.70	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
65	7.10	15	40	1	3	1	0	0	1	0	0	0	120	6.30	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
66	13.50	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0	121	3.70	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
67	14.40	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0	122	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
68	6.20	15	40	1	3	1	0	0	0	0	0	0	123	6.40	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
69	6.50	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0	124	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
70	25.00	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0	125	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
71	9.20	15	25	1	3	0	0	0	0	0	0	0	126	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
72	24.20	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0	127	10.30	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
73	33.30	15	25	1	3	1	0	0	1	0	0	0	128	100.00	15	60	2	1	1	1	0	0	0	0	0
74	13.40	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0	129	100.00	15	60	2	1	0	1	0	0	0	0	0
75	19.00	15	25	1	2	0	0	0	0	0	0	0	130	100.00	15	60	2	1	0	1	0	0	0	0	0
76	9.80	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0	131	100.00	15	60	2	1	0	1	0	0	0	0	0
77	72.20	15	25	1	2	1	0	1	0	0	0	0	132	100.00	15	60	2	1	1	1	0	0	0	0	0
78	17.20	15	40	1	2	0	0	0	1	0	0	0	133	63.90	15	60	2	1	1	1	0	0	0	0	0
79	12.20	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0	134	100.00	15	60	2	1	0	1	0	0	0	0	0
80	5.20	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0	135	80.60	15	60	2	1	0	1	0	0	1	0	0
81	20.50	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0	136	100.00	15	60	2	1	0	1	0	0	0	0	0
82	23.10	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0	137	100.00	15	60	2	1	1	1	0	0	0	0	0
83	18.70	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0	138	7.20	15	80	2	3	0	0	0	0	0	0	0
84	4.90	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0	139	8.70	15	80	2	3	0	0	0	0	0	0	0
85	19.20	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0	140	14.30	15	80	2	3	0	0	0	0	0	0	0
86	0.00	15	40	1	3	0	0	0	1	0	0	0	141	12.40	15	80	2	3	1	0	0	0	0	0	0
87	0.00	15	40	1	2	0	0	1	0	0	0	0	142	0.00	15	55	1	3	0	0	0	0	0	0	0
88	4.40	15	40	1	2	0	0	1	0	0	0	0	143	5.20	15	55	1	3	0	0	0	0	1	0	0
89	0.00	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0	144	31.60	15	55	1	3	1	0	0	0	1	0	1
90	10.60	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0	145	23.20	15	55	1	1	1	1	0	0	0	0	0
91	4.60	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0	146	0.00	15	55	1	1	0	1	0	0	1	0	0
92	11.40	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0	147	17.90	15	55	1	1	0	1	1	0	1	0	0
93	10.90	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0	148	56.70	15	55	1	1	0	0	0	0	1	0	0
94	0.00	15	25	2	3	1	0	0	0	0	0	0	149	47.80	15	55	1	1	1	0	0	0	1	0	0

150	30.70	15	55	1	1	1	1	0	0	0	0	0
151	6.30	15	55	1	1	0	0	0	0	1	0	0
152	42.80	15	55	1	1	0	0	0	0	1	0	0
153	46.20	15	55	1	1	0	0	0	0	1	0	0
154	13.90	15	55	1	1	1	0	0	0	0	0	0
155	49.70	15	50	1	1	1	0	0	0	1	0	0
156	5.30	15	50	1	1	0	0	1	0	1	0	0
157	36.80	15	50	1	1	0	0	1	0	1	0	0
158	25.40	15	50	1	1	0	0	0	0	1	0	0
159	33.20	15	50	1	1	1	0	1	0	1	0	0

Sperre Nr. 3: Steingraben

Meereshöhe: 900 m ü.M. **Exposition:** Nord **Baujahr:** 1992

Nr.	Fg	Bo	D	Holz	BT	Stirn	*F.p.*	*A.s*	*S.b.*	*Gs.*	*A.c.*	*Go*
1	93.30	15	20	2	1	1	1	0	0	0	0	0
2	100.00	15	20	2	1	0	1	0	0	0	0	0
3	81.30	15	20	2	1	0	1	0	0	0	0	0
4	100.00	15	20	2	1	0	1	0	0	0	0	0
5	46.50	15	20	2	1	1	0	0	1	0	0	0
6	0.00	15	20	2	1	0	0	0	1	0	0	0
7	0.00	15	20	2	1	1	1	0	0	0	0	0
8	0.00	15	25	2	1	0	0	0	0	0	1	0
9	0.00	15	25	2	1	0	0	0	0	0	0	0
10	6.50	15	25	2	1	0	0	0	0	0	0	0
11	37.10	15	25	2	1	1	0	0	0	0	0	0
12	0.00	15	25	2	1	0	0	0	0	0	0	0
13	0.00	15	25	2	1	0	0	0	0	0	0	0
14	3.50	15	25	2	1	0	0	0	0	0	0	0
15	3.50	15	25	2	1	1	0	0	0	0	0	0
16	3.70	15	25	2	1	0	0	0	0	0	0	0
17	7.70	15	25	2	1	0	0	0	0	0	0	0
18	9.10	15	25	2	1	0	1	0	0	0	0	0
19	14.30	15	25	2	1	0	0	0	0	0	0	0
20	19.90	15	25	2	1	1	1	0	0	0	0	0
21	31.30	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
22	65.00	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
23	100.00	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
24	100.00	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
25	100.00	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
26	13.10	15	30	2	2	0	0	0	0	0	0	0
27	0.00	15	30	2	2	0	0	0	0	0	0	0
28	0.00	15	30	2	2	0	0	0	0	0	0	0
29	0.00	15	30	2	2	0	0	0	0	0	0	0
30	0.00	15	30	2	2	0	0	0	0	0	0	0
31	0.00	15	30	2	2	0	0	0	0	0	0	0
32	3.90	15	30	2	2	0	0	0	0	0	0	0
33	14.50	15	30	2	2	0	0	0	0	0	0	0
34	12.00	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
35	19.00	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
36	42.40	15	40	2	2	0	1	0	0	0	0	0
37	100.00	15	40	2	2	0	1	0	0	0	0	0
38	48.00	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
39	7.80	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
41	0.00	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
42	5.40	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
43	0.00	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
44	3.80	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
45	5.40	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
46	4.00	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
47	4.20	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
48	3.50	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
49	7.10	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
50	12.90	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0
51	0.00	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0
52	0.00	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0

Sperre Nr. 4: Speichenrus

Meereshöhe: 1020 m ü.M. **Exposition:** Süd-West **Baujahr:** 1995

Nr.	Fg	Bo	D	Holz	BT	Stirn	*F.p.*	*A.s*	*S.b.*	*Gs.*	*A.c.*	*Go*
1	40.60	15	30	1	1	0	0	1	0	1	0	1
2	38.90	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0
3	42.10	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	1
4	36.10	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0
5	36.90	15	30	1	1	0	0	1	0	1	0	0
6	62.40	15	30	1	1	1	0	1	0	1	0	1
7	94.50	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	1
8	10.80	15	30	1	1	1	0	1	0	1	0	1
9	22.80	15	30	1	1	1	0	0	0	1	0	0
10	59.30	15	30	1	1	1	0	0	0	1	0	0
11	100.00	15	30	1	1	1	1	0	0	1	0	0
12	100.00	15	30	1	1	1	1	0	0	1	0	0
13	68.60	15	30	1	1	1	0	1	0	0	0	0
14	31.60	15	30	1	1	0	0	0	1	1	0	0
15	46.00	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0
16	49.20	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0
17	43.80	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0
18	33.20	15	30	1	1	0	0	0	1	1	0	0
19	32.30	15	30	1	1	1	0	1	1	1	0	0
20	74.90	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0
21	62.00	15	30	1	1	1	0	1	0	1	0	0
22	100.00	15	30	1	1	1	0	1	1	1	0	0
23	65.40	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
24	22.80	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
25	23.20	15	30	1	1	1	0	1	1	0	0	0
26	100.00	15	30	1	3	1	0	1	0	0	0	0
27	58.20	15	30	1	2	0	1	0	0	1	0	0
28	82.10	15	30	1	2	0	0	0	0	1	0	0
29	6.50	15	30	1	2	0	0	1	0	0	0	0
30	94.30	15	30	1	3	0	1	0	0	0	0	0
31	32.90	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
32	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
33	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
34	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
35	3.80	15	30	1	3	0	0	0	1	0	0	0

36	7.30	15	30	1	3	0	0	1	0	0	0	0	93	3.80	15	30	1	2	0	0	0	0	0	0
37	8.90	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0	94	0.00	15	30	1	2	0	0	0	0	0	0
38	0.00	15	30	1	3	0	0	0	1	0	0	0	95	64.50	15	30	1	2	1	0	0	0	0	1
39	0.00	15	30	1	2	0	0	0	0	0	0	0	96	5.20	15	30	1	2	1	0	0	0	0	0
40	5.90	15	30	1	2	0	0	0	1	0	0	0	97	12.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
41	11.20	15	30	1	2	0	0	0	1	0	0	0	98	0.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
42	90.50	15	30	1	1	1	0	1	0	0	0	0	99	39.80	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
43	77.20	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0	100	3.80	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
44	68.80	15	30	1	1	0	1	0	0	0	0	0	101	12.20	12	30	1	3	1	0	0	0	0	0
46	28.70	15	30	1	1	1	1	0	0	0	0	0	102	46.40	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
47	53.80	15	30	1	1	1	0	1	0	0	0	0	103	0.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
48	73.30	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	1	104	7.80	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
49	15.00	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0	105	16.20	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
50	17.50	15	30	3	1	1	0	1	0	0	0	0	106	28.20	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
51	49.50	15	30	1	1	1	0	1	0	0	0	0	107	41.30	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
52	30.60	15	30	1	1	0	0	1	0	0	0	0	108	5.80	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
53	25.90	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0	109	5.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
54	29.20	15	30	1	1	0	0	1	0	0	0	0	110	100.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
55	9.30	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0	111	3.90	15	30	1	2	1	0	0	0	0	0
56	19.90	15	25	1	3	1	0	0	1	0	0	0	112	4.50	15	30	1	2	1	0	0	0	0	0
57	7.80	15	25	1	1	1	0	0	1	0	0	0	113	7.00	15	35	1	2	0	0	0	0	0	0
58	13.60	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0	114	5.20	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
59	69.10	15	25	1	1	1	0	1	1	0	0	1	115	5.10	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
60	4.20	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0	116	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
61	0.00	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0	117	4.40	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
62	100.00	15	30	1	2	1	0	0	0	1	0	1	118	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
63	100.00	15	30	1	2	1	0	0	0	0	0	1	119	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
64	84.50	15	30	1	2	1	0	1	0	1	0	0	120	3.50	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
65	35.80	15	30	1	2	1	0	1	0	0	0	1	121	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
66	0.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	122	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
67	0.00	15	30	1	3	1	0	1	0	0	0	0	123	3.70	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0
68	4.60	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	124	4.60	15	30	1	2	1	0	0	0	0	0
69	8.60	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	125	15.10	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
70	10.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	126	7.50	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
71	0.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	127	7.70	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
72	6.40	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	128	31.40	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
73	100.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	129	8.80	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
74	3.40	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	130	7.60	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
75	0.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	131	4.90	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
76	5.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	132	4.10	15	40	1	3	1	0	0	0	0	0
77	7.70	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	133	10.90	15	40	1	1	0	0	0	0	0	0
78	0.00	15	30	1	2	1	0	0	0	0	0	0	134	88.10	15	40	1	1	1	0	0	0	0	1
79	0.00	15	30	1	2	1	0	0	0	0	0	0	135	29.00	15	40	1	1	0	0	1	0	0	0
80	0.00	15	30	1	2	1	0	0	0	0	0	0	136	100.00	15	40	1	1	1	1	0	0	0	0
82	10.50	15	30	1	2	0	0	0	0	0	0	0	137	100.00	15	40	1	1	0	1	0	0	0	0
83	0.00	15	30	1	2	0	0	0	0	0	0	0	138	5.20	15	40	1	1	1	0	0	0	0	0
84	8.80	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0	139	63.30	15	40	1	1	0	0	0	0	0	0
85	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0	140	86.40	15	30	1	1	1	0	0	0	0	1
86	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0	141	5.10	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0
87	3.40	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0												
88	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0												
89	3.90	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0												
90	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0												
91	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0												
92	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0												

Sperre Nr. 5: Chratzerlibach

Meereshöhe: 1070 m ü.M. **Exposition:** Nord **Baujahr:** 1991

Nr.	Fg	Bo	D	Holz	BT	Stirn	*F.p.*	*A.s*	*S.b.*	*G.s.*	*A.c.*	*G.o*
1	4.50	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	37.20	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
6	0.00	15	30	2	1	0	0	0	0	0	0	0
7	0.00	15	30	2	1	1	0	0	0	0	1	0
8	0.00	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0
9	16.80	15	30	2	1	1	0	0	0	0	1	0
10	0.00	15	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0
11	100.00	15	20	1	1	1	1	0	0	0	0	0
12	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
13	7.60	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
14	7.60	15	35	1	1	0	0	0	1	0	0	0
15	13.90	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
16	7.90	15	20	1	1	1	0	0	0	0	0	0
17	6.10	15	20	1	1	1	0	0	0	0	0	0
18	19.50	15	20	1	1	1	0	0	0	0	0	0
19	91.40	15	20	1	1	1	1	0	0	0	0	0
20	0.00	15	40	2	1	0	0	0	0	0	0	0
21	0.00	15	40	2	1	0	0	0	0	0	0	0
22	10.20	15	40	2	1	1	0	0	0	0	0	0
23	26.00	15	40	1	1	1	0	0	0	0	0	0
24	3.50	15	40	1	1	1	1	0	0	0	0	0
25	9.20	15	40	1	1	1	0	0	0	0	0	0
26	5.10	15	35	1	3	1	0	0	0	0	0	0
27	0.00	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0
28	4.00	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0
29	5.80	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
30	4.50	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
31	4.70	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
32	4.50	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
33	3.90	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
34	5.60	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
35	37.10	15	35	1	3	1	0	0	0	0	0	0
36	7.80	15	35	1	3	1	0	0	0	0	0	0
37	0.00	15	35	1	3	1	0	0	0	0	0	0
38	4.60	15	35	1	3	1	0	0	0	0	0	0
39	8.50	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
40	0.00	15	35	1	3	1	0	0	0	0	0	0
41	18.60	15	35	1	3	1	0	0	0	0	0	0
42	9.90	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
43	6.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
44	5.60	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
45	4.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
46	6.90	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
47	3.50	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
48	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
49	3.90	15	40	2	1	1	0	0	0	0	0	0
50	27.00	15	40	1	1	1	0	0	0	1	0	0
51	49.00	15	40	1	1	0	0	0	0	1	0	0
52	23.40	15	40	1	1	1	0	0	0	1	0	0
53	12.90	15	40	1	1	1	0	0	0	0	0	0
54	100.00	15	20	1	1	0	1	0	0	0	0	0
55	100.00	15	20	1	1	0	1	0	0	0	0	0
56	100.00	15	20	1	1	0	1	0	0	0	0	0
57	100.00	15	20	1	1	0	1	0	0	0	0	0
58	95.20	15	20	1	1	1	1	0	0	0	0	0
59	58.50	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
60	29.50	15	35	1	1	1	1	0	0	0	0	0
61	0.00	15	35	1	1	0	1	0	0	0	0	0
62	16.60	15	35	1	1	1	1	0	0	0	0	0
63	8.50	15	40	1	1	1	0	0	0	1	0	0
64	100.00	15	20	1	1	0	1	0	0	1	0	0
65	88.90	15	20	1	1	0	1	0	0	0	0	0
66	100.00	15	20	1	1	0	1	0	0	0	0	0
67	100.00	15	20	1	1	0	1	0	0	0	0	0
68	100.00	15	20	1	1	1	1	0	0	0	0	0
69	71.00	15	35	1	1	1	1	0	0	0	0	0
70	82.30	15	35	1	1	1	1	0	0	1	0	0
71	100.00	15	35	1	1	0	0	0	0	1	0	0
72	21.60	15	35	1	1	1	0	0	0	1	0	0
73	36.20	15	30	2	1	1	0	0	1	0	0	0
74	100.00	15	20	2	1	1	1	0	0	0	0	0
75	100.00	15	20	2	1	0	1	0	0	0	0	0
76	41.40	15	20	2	1	0	1	0	0	0	0	0
77	23.10	15	20	2	1	0	0	0	0	0	0	0
78	66.50	15	20	2	1	1	0	0	1	0	0	0
79	0.00	15	35	1	3	1	0	0	0	0	0	0
80	47.40	15	25	1	1	1	1	0	0	0	0	0
81	10.10	15	20	2	1	1	1	0	1	0	0	0
82	0.00	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
83	70.80	15	20	1	1	1	1	0	1	0	0	0
84	3.80	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
85	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
86	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
87	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
88	0.00	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
89	0.00	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
90	0.00	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
91	5.90	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
92	5.40	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
93	4.60	15	40	1	1	1	0	0	0	0	0	0
94	41.00	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
95	9.00	15	25	1	1	0	0	0	1	0	0	0
96	6.50	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
97	5.00	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
98	8.80	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0
99	3.50	15	35	1	1	1	1	0	1	0	0	0
100	0.00	15	35	1	1	1	1	0	0	0	0	0
101	9.00	15	35	1	1	0	0	1	0	0	0	0
102	15.80	15	35	1	1	1	1	0	0	0	0	0
103	10.40	15	40	1	1	1	0	0	0	0	0	0
104	32.90	15	20	2	1	0	1	1	0	0	0	0
105	53.80	15	20	2	1	0	1	0	0	0	0	0

106	63.10	15	20	2	1	0	1	0	0	0	0	0
107	33.20	15	20	2	1	0	1	0	0	0	0	0
108	42.20	15	20	2	1	1	1	0	0	0	0	0
109	0.00	15	35	1	1	1	0	0	0	0	0	0
110	6.50	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
111	3.70	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0
112	18.50	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
113	43.90	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
114	100.00	15	20	1	1	0	0	0	0	0	0	0
115	54.20	15	20	1	1	0	0	0	1	0	0	0
116	72.30	15	20	1	1	0	0	0	1	0	0	0
117	3.70	15	20	1	1	1	0	0	0	0	1	0

Sperre Nr. 6: Dürrenbach

Meereshöhe: 780 m ü.M. **Exposition:** Nord **Baujahr:** 1993

Nr.	Fg	Bo	D	Holz	BT	Stirn	*F.p.*	*A.s*	*S.b.*	*G.s.*	*A.c.*	*Go*
1	0.00	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0.00	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0.00	15	25	1	1	0	0	0	0	0	1	0
4	6.60	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	19.90	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0
6	23.50	15	30	1	1	0	0	1	1	0	0	0
7	65.00	15	30	1	1	0	0	1	0	0	0	0
8	19.60	15	30	1	1	0	0	1	0	0	0	0
9	74.30	15	30	1	1	0	0	1	1	0	0	0
10	100.00	15	30	1	1	1	0	1	0	0	0	0
11	3.40	15	35	1	2	0	0	0	0	0	0	0
12	4.60	15	35	1	2	0	0	0	0	0	0	0
13	6.60	15	35	1	2	0	0	0	0	0	0	0
14	11.30	15	35	1	2	0	0	0	1	0	0	0
15	5.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
16	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
17	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
18	0.00	15	35	1	2	0	0	0	0	0	0	0
19	3.40	15	25	1	2	1	0	0	1	0	0	0
20	0.00	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0
21	0.00	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0
22	4.50	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0
23	10.60	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
24	12.40	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
25	0.00	15	25	1	3	1	0	0	1	0	0	0
26	5.70	15	25	1	3	1	0	0	0	0	0	0
28	3.50	15	25	2	2	1	0	0	0	0	0	0
29	0.00	15	25	1	2	1	0	0	0	0	0	0
30	11.20	15	30	1	2	0	0	0	0	0	0	0
31	11.10	15	30	1	2	0	0	0	0	0	0	0
32	10.00	15	30	1	2	0	0	0	0	0	0	0
33	5.20	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
34	4.90	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
35	10.80	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
36	4.30	15	30	1	2	0	0	0	0	0	0	0
37	7.00	15	30	2	2	1	0	0	0	0	0	0
38	4.40	15	30	1	2	1	0	0	1	0	0	0
39	4.20	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
40	4.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
41	10.20	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
42	8.40	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
43	5.70	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
44	10.90	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0
45	4.90	15	30	1	2	1	0	0	0	0	0	0
46	4.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
47	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
48	12.10	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
49	4.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
50	3.80	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
51	7.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
52	6.70	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
53	36.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
54	4.90	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
55	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
56	0.00	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
57	4.70	15	30	1	3	0	0	0	0	0	0	0
58	100.00	15	25	1	1	1	0	1	0	1	0	0
59	100.00	15	25	1	1	0	0	1	0	0	0	0
60	100.00	15	25	1	1	0	1	1	0	0	0	0
61	100.00	15	25	1	1	0	1	1	0	0	0	0
62	31.20	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
63	100.00	15	25	1	1	1	0	1	0	0	0	0
64	100.00	15	25	1	1	0	0	1	1	0	0	0
65	85.40	15	25	1	1	0	0	1	1	0	0	0
66	40.20	15	25	1	1	1	0	0	1	0	0	0
67	0.00	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
68	17.20	15	30	1	1	1	0	0	1	1	0	0
69	6.40	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Sperre Nr. 7: Heitlibach

Meereshöhe: 890 m ü.M. **Exposition:** Nord-Ost **Baujahr:** 1993

Nr.	Fg	Bo	D	Holz	BT	Stirn	*F.p.*	*A.s*	*S.b.*	*G.s.*	*A.c.*	*Go*
1	3.70	15	35	2	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0.00	15	35	2	1	0	0	0	0	0	0	0
3	4.10	15	35	2	1	0	0	0	0	0	1	0
4	42.10	15	35	2	1	0	1	0	0	0	0	0
6	100.00	15	35	2	1	0	1	0	0	0	0	0
7	100.00	15	35	2	1	0	1	0	0	0	0	0
8	100.00	15	35	2	1	0	1	0	0	0	0	0
9	100.00	15	35	2	1	0	1	0	0	0	0	0
10	100.00	15	35	2	1	0	1	0	0	0	0	0
11	14.40	15	35	2	1	1	1	0	0	0	0	0
12	4.60	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
13	12.90	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
14	4.40	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0
15	34.20	15	25	2	1	1	1	0	0	0	0	0
16	8.30	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0
17	4.80	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0

18	4.20	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0	72	12.70	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0
19	45.40	15	25	2	1	0	0	0	0	0	0	0	73	11.40	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0
20	15.00	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0	74	11.60	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0
21	6.90	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0	75	10.00	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0
22	4.40	15	25	1	1	1	0	0	0	0	0	0	76	11.70	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0
23	20.10	15	25	2	1	1	0	0	0	0	0	0	77	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0
24	6.20	15	35	2	1	0	0	0	0	0	1	0	78	3.60	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0
25	7.00	15	35	2	1	0	0	0	0	0	0	0	79	5.40	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0
26	8.30	15	35	2	1	0	0	0	0	0	1	0	80	5.30	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0
27	4.50	15	35	2	1	0	0	0	0	0	1	0	81	24.50	15	35	2	2	1	0	0	0	1	0
28	30.10	15	35	2	1	0	0	0	0	0	0	0	82	13.00	15	35	2	2	1	0	0	0	0	0
29	7.60	15	35	2	1	0	0	0	0	0	0	0	83	17.80	15	35	2	2	1	0	0	0	0	0
30	0.00	15	35	2	1	0	0	0	0	0	0	0	84	4.00	15	35	2	2	0	0	0	0	0	0
31	7.80	15	35	2	1	0	0	0	0	0	0	0	85	0.00	15	35	2	2	1	0	0	0	0	0
32	11.30	15	35	2	1	0	0	0	0	0	0	0	86	0.00	15	35	2	2	1	0	0	0	1	0
33	3.50	15	35	2	1	0	0	0	0	0	0	0	87	7.40	15	35	2	3	1	0	0	0	0	0
34	7.80	15	35	2	1	1	0	0	0	0	0	0	88	5.40	15	35	2	3	0	0	0	0	0	0
35	11.50	15	30	2	1	0	0	0	0	0	1	0	89	4.90	15	35	2	3	1	0	0	0	0	0
36	20.50	15	40	1	2	0	0	0	0	0	1	0	90	5.70	15	35	2	3	1	0	0	0	0	0
37	12.70	15	30	2	1	1	0	0	0	0	1	0	91	16.60	15	40	1	2	0	0	0	0	1	0
38	5.70	15	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0	92	13.10	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0
39	18.50	15	30	2	1	1	0	0	0	0	1	0	93	4.50	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0
40	11.30	15	30	2	1	0	0	0	0	0	1	0	94	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0
41	5.40	15	30	2	1	1	0	0	0	0	1	0	95	4.70	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0
42	4.80	15	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0	96	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0
43	15.00	15	30	2	1	1	0	0	0	0	1	0	97	4.50	15	40	1	3	0	0	0	0	1	0
44	6.70	15	30	2	1	0	0	0	0	0	1	0	98	16.50	15	30	2	3	0	0	0	0	0	0
45	13.00	15	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0	99	11.20	15	30	2	3	1	0	0	0	0	0
46	0.00	15	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0	100	57.20	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0
47	3.70	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0	101	4.00	15	30	2	3	1	0	0	0	0	0
48	8.80	15	40	2	2	0	0	0	0	0	1	0	103	18.60	15	40	2	3	0	1	0	0	0	0
49	7.40	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0	104	14.40	15	40	2	3	0	0	0	0	0	0
50	9.40	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0	105	4.00	15	40	2	3	0	0	0	0	0	0
51	4.00	15	40	2	2	0	0	0	0	0	1	0	107	7.60	8.5	30	2	1	1	0	0	1	0	0	0
52	13.80	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0	108	9.10	10	30	2	1	0	1	0	0	0	0	0
53	14.20	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0	109	44.20	10	30	2	1	0	1	0	0	0	0	0
54	15.20	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0	110	100.00	10	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0
55	13.70	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0	111	100.00	10	30	1	1	1	1	0	0	0	0	0
56	15.10	15	40	2	2	0	0	0	0	0	0	0	112	100.00	10	30	1	1	0	0	1	0	0	0	0
57	6.60	15	40	2	3	0	0	0	0	0	1	0	113	100.00	10	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0
58	3.80	15	40	2	3	0	0	0	0	0	0	0	114	100.00	10	30	1	1	1	0	1	0	1	0	0
59	7.90	15	40	2	3	0	0	0	0	0	0	0	115	100.00	10	30	1	1	1	0	0	0	0	0	1
60	16.70	15	30	1	2	1	0	0	1	0	0	0	116	100.00	10	30	1	1	0	1	0	0	0	0	0
61	4.90	15	30	2	2	1	0	0	0	0	1	0	117	100.00	10	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0
62	9.70	15	30	2	2	0	0	0	0	0	1	0	118	100.00	10	30	1	1	1	0	0	0	0	0	1
63	7.50	15	30	2	2	1	0	0	0	0	1	0	119	0.00	10	30	2	1	1	0	0	0	0	0	0
64	78.40	15	30	1	2	1	0	1	0	0	0	0	120	13.50	10	30	2	1	0	0	0	1	0	0	0
65	21.70	15	30	1	2	1	0	0	0	0	1	0	121	14.20	10	30	2	1	0	1	0	0	0	0	0
66	25.90	15	30	1	2	0	0	0	0	0	1	0	122	84.50	10	30	2	1	1	1	0	0	0	0	0
67	0.00	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	123	100.00	10	30	1	1	1	0	0	0	1	0	0
68	18.10	15	30	1	3	1	0	0	0	0	0	0	124	100.00	10	30	1	1	0	1	0	0	1	0	0
69	8.80	15	30	2	3	1	0	0	0	0	0	0	125	84.40	10	30	1	1	0	1	0	0	1	0	1
70	8.10	15	30	2	3	0	0	0	0	0	0	0	126	100.00	10	30	1	1	1	1	0	0	1	0	1
71	14.80	15	40	1	2	0	0	0	0	0	0	0	127	30.70	10	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0

128	70.10	10	30	1	1	0	1	0	0	1	0	0
129	87.50	10	30	1	1	1	1	0	0	1	0	0
130	13.80	10	30	2	3	1	0	0	0	0	0	0

Sperre Nr. 8: Ebenmattgraben

Meereshöhe: 970 m ü.M. **Exposition:** Süd-Ost **Baujahr:** 1973

Nr.	Fg	Bo	D	Holz	BT	Stirn	*F.p.*	*A.s*	*S.b.*	*G.s.*	*A.c.*	*G.o*
1	76.20	15	25	1	1	1	0	0	1	0	0	0
2	4.40	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	18.60	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	18.90	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	17.50	15	25	1	1	0	0	0	1	0	0	0
6	27.40	15	25	1	1	0	0	1	0	0	0	0
7	100.00	15	30	1	1	1	0	0	0	1	0	0
8	48.00	15	30	1	1	1	0	0	0	1	0	0
9	100.00	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0
10	20.70	15	30	1	1	1	0	0	1	1	0	0
11	18.60	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0
12	12.80	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
13	4.70	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0
14	4.40	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0
15	60.80	15	35	1	1	1	0	0	0	1	0	0
16	10.10	15	35	1	1	0	0	0	0	1	0	0
17	5.70	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
18	6.20	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
19	11.60	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
20	48.80	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
21	4.10	15	30	1	1	1	0	0	1	0	0	0
22	14.00	15	30	1	1	1	1	0	1	0	0	0
23	4.50	15	30	1	1	0	0	0	1	0	0	0
24	10.50	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
25	9.10	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
26	5.20	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
27	4.00	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0
28	4.90	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0
29	100.00	15	40	1	3	1	0	1	1	0	0	1
30	100.00	15	40	1	3	0	0	1	0	0	0	0
31	42.10	15	40	1	3	0	0	1	0	0	0	0
32	4.60	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
33	3.60	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
34	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
35	20.60	15	30	1	1	1	0	0	0	0	0	0
36	100.00	15	30	1	1	1	0	0	1	1	0	0
37	100.00	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0
38	85.50	15	30	1	1	0	0	0	0	1	0	0
39	21.60	15	30	1	1	0	0	0	0	0	0	0
40	28.60	15	30	1	1	0	0	0	1	0	0	0
41	9.50	15	30	1	1	0	0	0	0	0	1	0
42	67.70	15	40	1	1	1	0	0	0	1	0	1
43	33.30	15	40	1	1	1	0	1	0	0	0	1
44	8.90	15	40	1	1	0	0	1	0	0	0	0
45	17.60	15	40	1	1	0	0	1	0	0	1	0
46	18.20	15	40	1	1	0	0	0	0	0	1	0
47	3.60	15	40	1	1	0	0	0	0	0	1	0
48	22.00	15	40	1	3	1	0	1	0	0	0	0
49	58.90	15	40	1	3	0	0	1	0	0	1	0
50	7.60	15	40	1	3	0	0	0	0	0	1	0
51	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	1	0
52	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
53	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
54	82.70	15	40	1	1	1	0	0	0	0	0	0
55	4.90	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
56	3.50	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
57	3.70	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
58	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
59	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
60	9.40	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
61	4.70	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
62	4.80	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
63	0.00	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
64	3.70	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
65	3.90	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0
66	4.30	15	40	1	3	0	0	0	0	0	0	0

Sperre Nr. 9: Seckigraben

Meereshöhe: 740 m ü.M. **Exposition:** Nord **Baujahr:** 1973

Nr.	Fg	Bo	D	Holz	BT	Stirn	*F.p.*	*A.s*	*S.b.*	*G.s.*	*A.c.*	*G.o*
1	100.00	15	20	1	1	0	1	1	1	0	0	0
2	62.20	15	18	1	1	0	1	0	0	0	0	0
3	24.20	15	18	1	1	0	1	0	0	0	0	0
4	100.00	15	18	1	1	0	1	0	0	0	0	0
5	81.30	15	18	1	1	0	1	0	0	0	0	0
6	92.30	15	18	1	1	0	1	0	0	0	0	0
7	10.70	15	30	1	1	0	0	1	1	0	0	0
8	78.20	8.5	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
9	80.00	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
10	39.00	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
11	37.80	15	25	1	1	0	1	0	0	0	0	0
12	83.10	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	1
13	12.80	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
14	12.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	1	0
15	10.80	15	35	1	1	0	0	0	0	0	1	0
16	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
17	10.00	15	35	1	1	0	1	0	0	0	0	0
18	32.20	15	45	1	2	0	0	0	0	0	1	0
19	0.00	15	45	1	2	0	0	0	0	0	0	0
20	3.40	15	45	1	2	0	0	0	0	0	0	0
21	7.40	15	45	1	2	0	0	0	0	0	0	0
22	11.90	15	45	1	2	0	0	0	0	0	0	0
23	3.60	15	45	1	3	0	0	0	0	0	0	0
24	11.60	15	45	1	3	0	0	0	0	0	0	0
25	5.00	15	45	1	3	0	0	0	0	0	0	0
26	3.40	15	45	1	2	0	0	0	0	0	0	0
27	0.00	15	45	1	2	0	0	0	0	0	0	0

28	4.20	15	45	1	2	0	0	0	0	0	0	0
29	11.10	15	45	1	2	0	0	0	0	0	0	0
30	100.00	15	45	1	2	0	0	0	0	0	0	0
31	14.20	15	50	1	2	0	0	0	0	0	1	0
32	4.90	15	50	1	2	0	0	0	0	0	0	0
33	0.00	15	50	1	2	0	0	0	0	0	0	0
34	7.10	15	50	1	3	0	0	0	0	0	0	0
35	0.00	15	50	1	3	0	0	0	0	0	0	0
36	7.80	15	50	1	3	0	0	0	0	0	0	0
37	0.00	15	35	1	2	0	0	0	0	0	0	0
38	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
39	11.30	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
40	7.20	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
41	28.30	15	35	1	1	0	0	1	0	0	0	1
42	25.40	15	35	1	1	0	0	1	0	0	0	0
43	10.70	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
44	100.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
45	100.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
46	81.30	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	1
47	13.30	15	35	1	1	0	0	1	0	0	0	0
48	0.00	15	35	1	1	0	0	1	0	0	0	0
49	0.00	13	35	1	1	0	0	0	1	0	0	0
50	23.60	15	35	1	1	0	0	0	0	0	1	0
51	15.50	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
52	10.50	15	35	1	1	0	0	0	0	0	1	0
53	5.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
54	58.90	15	35	1	1	0	1	1	0	0	0	1
55	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	1
56	25.20	15	35	1	1	0	1	0	0	0	0	0
57	49.40	15	35	1	1	0	1	0	0	0	0	0
58	31.60	15	35	1	1	0	1	0	0	0	0	0
59	51.00	15	35	1	1	0	1	0	0	0	0	0
60	46.30	15	35	1	1	0	1	0	0	0	0	0
61	22.80	15	35	1	1	0	1	0	0	0	0	0
62	10.00	15	25	1	1	0	0	0	0	0	1	0
63	5.30	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
64	9.60	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
65	9.60	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
66	9.50	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
67	8.90	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
68	7.30	15	25	1	1	0	0	0	0	0	0	0
69	82.10	15	25	1	1	0	0	0	1	0	0	1
70	7.20	15	33	1	3	0	0	0	0	0	0	0
71	4.50	15	33	1	3	0	0	0	0	0	0	0
72	0.00	15	33	1	3	0	0	0	0	0	0	0
73	4.40	15	33	1	3	0	0	0	0	0	0	0
74	11.90	15	33	1	3	0	0	0	0	0	0	0
75	3.70	15	33	1	3	0	0	0	0	0	0	0
76	3.70	15	33	1	3	0	0	0	0	0	0	0
77	0.00	15	33	1	3	0	0	0	0	0	0	0
78	4.30	15	23	1	1	0	0	0	0	0	0	0
79	0.00	15	23	1	1	0	0	0	0	0	0	0
80	4.90	15	23	1	1	0	0	0	0	0	0	0
81	3.40	15	23	1	1	0	0	0	0	0	0	0
82	5.60	15	23	1	1	0	0	0	0	0	0	0
83	14.10	15	23	1	1	0	0	0	0	0	0	0
84	10.80	15	23	1	1	0	0	0	0	0	0	0
85	39.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	1
86	26.50	15	35	1	1	0	0	0	0	0	1	0
87	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
88	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
89	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
90	4.80	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
91	0.00	15	35	1	1	0	0	0	0	0	0	0
92	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
94	7.70	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
95	0.00	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
96	7.50	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
97	11.20	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0
98	17.30	15	35	1	3	0	0	0	0	0	0	0

Anhang V

Messresultate des Abbauversuchs. m_R: Mittlere Trockenmasse der Referenzen R1 und R2 [g]; m_P: Trockenmasse des Teststücks nach dem Abbauversuch [g]; MV: Masseverlust [%]; $d_{P,R1,R2}$: Durchmesser (Teststück bzw. Referenzen [mm]); $\sigma_{P,R1,R2}$: Druckfestigkeit parallel zur Faser (Teststück bzw. Referenzen [N/mm²]); σ_R: $(\sigma_{R1}+\sigma_{R2})/2$; FV: Abnahme der Druckfestigkeit [%]; $u_{P,R}$: Holzfeuchte Teststück bzw. mittlere Holzfeuchte der Referenzen beim Druckversuch [%]; (-): Probe für Vorversuche verwendet oder Messung nicht durchgeführt.

Serie	Baum	m_R	m_P	MV	d_P	d_{R1}	d_{R2}	σ_P	σ_{R1}	σ_{R2}	σ_R	FV	U_P	U_R
1	1	128.35	91.63	28.61	71.12	72.43	71.58	-	35.93	34.01	34.97	-	11.61	13.97
	2	131.90	109.51	16.97	73.78	72.40	73.67	7.30	40.37	35.43	37.90	80.75	12.07	13.79
	3	102.10	77.04	24.54	66.77	65.40	66.61	6.66	29.93	30.14	30.04	77.83	11.76	13.88
	4	137.97	112.65	18.35	74.09	73.34	71.98	4.40	39.19	37.09	38.14	88.46	11.66	13.22
	5	126.07	96.07	23.79	71.16	72.97	69.79	8.64	35.74	36.35	36.04	76.02	11.22	12.62
	6	115.75	88.28	23.73	69.36	69.74	68.82	4.48	33.31	31.69	32.50	86.23	11.71	13.98
	7	119.78	91.90	23.28	68.82	63.90	69.85	6.72	39.51	31.66	35.59	81.11	11.18	13.57
	8	136.10	101.41	25.49	75.50	76.05	77.79	5.18	-	30.89	30.89	-	11.02	12.71
	9	102.00	82.29	19.32	62.46	61.31	62.10	8.23	39.37	43.93	41.65	80.23	11.22	13.40
	10	121.24	105.77	12.76	68.02	67.22	68.38	10.67	45.82	41.80	43.81	75.65	10.94	13.02
	11	121.68	81.95	32.65	66.05	67.67	68.89	4.51	38.43	37.87	38.15	88.18	9.85	12.40
	12	103.18	80.13	22.34	63.92	64.81	65.29	6.99	35.56	36.46	36.01	80.60	10.30	12.37
	13	106.71	77.22	27.63	61.88	62.49	62.86	5.45	42.99	39.59	41.29	86.80	9.91	12.50
2	1	108.63	91.62	15.65	67.12	67.75	66.21	17.40	35.13	37.12	36.12	51.83	12.17	13.92
	2	137.22	121.39	11.54	76.13	74.03	75.56	11.40	37.87	36.62	37.24	69.38	12.03	13.59
	3	105.87	83.83	20.82	67.90	67.67	68.98	8.01	30.15	28.87	29.51	72.84	12.54	13.66
	4	143.96	122.60	14.83	75.50	74.18	74.86	11.52	28.83	25.22	27.03	57.36	11.87	13.27
	5	118.61	100.71	15.09	67.73	70.68	69.16	14.19	32.60	33.49	33.04	57.04	12.22	14.07
	6	110.96	92.30	16.82	66.86	67.30	65.92	19.68	34.26	34.77	34.51	42.97	12.56	13.98
	7	123.24	103.70	15.85	71.10	70.23	72.41	12.07	34.12	32.88	33.50	63.96	11.47	13.32
	8	110.31	90.70	17.77	69.74	69.02	68.79	9.03	30.13	37.20	33.67	73.19	11.12	12.73
	9	106.51	91.27	14.30	64.35	63.67	64.08	14.96	40.63	43.31	41.97	64.35	11.45	13.55
	10	130.05	115.49	11.20	70.84	68.85	70.62	16.19	39.74	42.05	40.89	60.42	11.50	13.27
	11	102.93	89.42	13.13	62.30	62.68	64.07	20.12	38.59	37.06	37.83	46.82	10.78	12.40
	12	111.72	95.55	14.47	66.73	65.76	67.91	15.82	34.88	34.85	34.87	54.63	10.36	12.40
	13	110.23	90.95	17.49	64.80	64.25	63.89	8.73	38.07	42.01	40.04	78.20	10.65	12.42
3	1	106.75	94.61	11.37	64.71	64.70	64.01	17.71	35.22	34.34	34.78	49.08	12.43	13.71
	2	122.64	112.18	8.53	70.26	70.77	71.36	19.55	32.96	31.97	32.47	39.80	12.04	13.72
	3	85.78	79.36	7.48	61.56	60.77	61.07	20.29	32.06	33.03	32.54	37.67	12.41	13.73
	4	110.80	99.16	10.50	67.43	66.99	66.03	25.51	35.35	32.42	33.88	24.72	12.00	13.16
	5	98.01	89.29	8.90	64.29	64.20	62.89	19.60	33.09	31.81	32.45	39.59	11.95	14.25
	6	92.92	83.93	9.67	61.62	62.02	60.79	18.92	37.07	35.29	36.18	47.69	12.39	14.14
	7	95.41	88.27	7.48	61.88	61.34	63.38	17.36	35.52	33.19	34.36	49.47	11.19	13.00
	8	114.28	100.38	12.16	70.97	69.02	70.45	17.67	37.04	34.76	35.90	50.77	11.56	12.40
	9	84.07	74.67	11.18	56.65	56.21	56.96	16.29	38.33	36.67	37.50	56.56	11.50	13.19
	10	82.35	79.46	3.51	57.39	55.87	57.77	21.25	41.85	37.45	39.65	46.39	11.30	13.22
	11	107.94	100.62	6.78	64.96	63.78	63.89	19.08	39.12	39.53	39.33	51.49	10.74	12.38
	12	92.31	85.20	7.70	61.63	61.03	62.03	17.71	31.24	33.07	32.16	44.93	10.85	12.39
	13	141.70	128.78	9.11	71.80	72.97	71.09	20.22	39.42	38.05	38.74	47.81	10.53	12.07

Serie	Baum	m_R	m_P	MV	d_P	d_{R1}	d_{R2}	σ_P	σ_{R1}	σ_{R2}	σ_R	FV	U_P	U_R
4	1	91.05	87.09	4.35	60.44	61.11	59.99	31.14	35.72	36.25	35.98	13.45	12.92	14.08
	2	124.10	121.37	2.20	71.38	70.59	72.73	25.71	34.22	33.20	33.71	23.71	12.54	13.91
	3	125.06	118.55	5.21	74.72	75.14	73.48	26.69	30.87	31.85	31.36	14.90	12.52	13.71
	4	145.27	140.27	3.44	73.98	74.94	73.84	24.38	35.74	36.57	36.15	32.57	12.32	13.32
	5	91.91	88.49	3.72	60.96	62.30	59.42	22.89	27.36	33.54	30.45	24.83	12.52	14.05
	6	88.38	82.00	7.21	59.20	60.19	59.17	29.55	33.97	31.10	32.53	9.17	12.62	14.08
	7	74.59	71.18	4.57	56.36	55.96	56.52	18.62	33.57	34.34	33.95	45.17	12.17	13.62
	8	93.20	90.10	3.33	63.48	63.62	63.36	29.97	31.31	31.65	31.48	4.79	12.53	13.67
	9	65.93	65.24	1.04	50.47	49.59	50.83	31.89	37.46	36.24	36.85	13.48	11.65	13.38
	10	89.71	88.68	1.14	59.71	58.32	60.09	34.25	39.79	39.02	39.41	13.08	11.67	13.06
	11	73.33	72.03	1.77	52.52	50.87	53.51	31.16	37.31	34.93	36.12	13.72	11.62	12.73
	12	80.39	77.96	3.02	57.43	58.84	57.03	28.87	34.52	35.96	35.24	18.09	10.95	12.42
	13	121.39	117.66	3.07	67.15	67.89	68.54	30.28	41.41	39.73	40.57	25.36	11.23	12.34
5	1	86.56	84.63	2.23	59.46	59.10	58.17	26.91	33.06	34.93	34.00	20.84	13.77	14.13
	2	99.88	96.40	3.48	63.90	62.54	63.66	23.30	33.27	36.89	35.08	33.57	12.97	13.23
	3	68.89	67.63	1.82	55.44	54.52	55.40	25.58	27.84	30.00	28.92	11.54	12.51	14.10
	4	149.83	147.67	1.44	75.77	76.36	75.85	41.16	44.33	40.52	42.42	2.99	12.74	13.11
	5	68.54	65.90	3.84	52.50	53.68	50.74	28.95	31.24	34.01	32.63	11.27	12.87	13.72
	6	68.57	62.99	8.13	52.30	50.92	53.09	31.94	31.42	31.29	31.36	-1.85	12.89	13.75
	7	60.27	60.88	-1.02	49.35	50.02	48.26	29.06	34.36	-	34.36	-	12.37	13.35
	8	87.24	89.54	-2.64	61.19	61.46	59.48	32.70	34.10	33.57	33.84	3.37	12.74	13.32
	9	71.50	68.29	4.49	53.34	52.14	53.23	24.71	38.58	41.81	40.20	38.53	12.49	13.36
	10	66.65	65.73	1.38	51.95	51.84	50.20	29.06	37.19	38.08	37.63	22.78	12.14	12.91
	11	79.93	79.18	0.94	55.87	55.24	56.30	34.25	37.24	36.27	36.75	6.81	11.77	12.66
	12	125.68	122.40	2.61	70.71	71.98	70.07	34.84	35.05	34.53	34.79	-0.12	11.64	12.46
	13	82.42	80.22	2.67	57.57	57.41	56.41	22.35	33.61	38.12	35.86	37.69	10.92	12.21
Kontr.	2	169.49	168.78	0.42	83.49	82.65	82.22	34.71	35.50	33.81	34.65	-0.18	13.58	13.68
	3	135.98	142.86	-5.06	77.84	76.40	76.65	29.88	33.53	33.62	33.58	11.00	13.64	12.94
	3	142.02	138.30	2.62	77.62	78.74	78.13	32.38	29.71	32.23	30.97	-4.56	13.49	13.55
	4	165.90	161.99	2.35	76.90	77.85	78.53	37.36	37.80	35.19	36.50	-2.36	13.11	12.97
	5	151.69	152.30	-0.41	79.40	77.81	78.95	33.12	32.08	35.24	33.66	1.60	12.09	12.07
	6	182.13	181.30	0.46	84.65	84.39	86.78	36.49	35.02	34.47	34.75	-5.03	12.23	13.45
	8	160.64	162.02	-0.86	81.81	82.14	80.82	35.86	33.63	29.94	31.78	-12.83	13.21	10.59
	10	177.70	182.85	-2.90	80.21	79.44	81.37	42.03	44.97	41.76	43.37	3.08	12.72	12.50
	10	187.32	187.30	0.01	83.37	82.77	83.96	40.98	40.53	40.30	40.42	-1.40	12.79	12.73
	14	188.79	188.70	0.05	83.61	83.27	83.53	34.53	34.90	38.90	36.90	6.43	12.38	13.11
	14	190.36	187.69	1.40	83.68	84.21	84.59	36.71	38.96	38.63	38.80	5.39	12.32	12.42

Anhang VI

1. Messwerte der Röntgenspektromerischen Analyse (EDX). Die angegebenen Werte entsprechen dem Verhältnis der Net-Counts der Elemente Eisen und Kohlenstoff. In der letzten Spalte sind die Messwerte von Fichtenholzproben ohne Eisen wiedergegeben. Bei Nullwerten wurde die Nachweisgrenze von 50 Counts in 60 Sekunden nicht erreicht. (-): keine Messung.

	In Faserrichtung				**Quer zur Faser**		
	Rundholz Nr.				**Rundholz Nr.**		
Abstand zum Nagel [mm]	**1**	**2**	**3**	**4**	**2**	**9**	**Kontrolle**
1	0.95	5.01	1.98	0.63	1.15	0.83	0.00
3	0.45	7.21	1.68	0.58	0.17	0.39	0.00
5	0.32	5.60	2.24	0.77	0.06	0.34	0.00
7	0.23	4.75	2.87	0.36	0.05	0.29	0.00
9	0.19	3.32	2.50	0.27	0.04	0.24	0.01
11	0.08	0.57	1.13	0.21	0.03	0.15	0.00
13	0.08	0.50	0.24	0.26	0.01	0.17	0.00
15	0.00	0.11	0.31	0.27	0.02	0.07	0.00
17	0.08	0.18	0.35	0.17	0.01	0.12	0.00
19	0.00	0.09	0.20	0.27	0.01	0.09	0.00
21	0.00	0.12	0.11	0.23	0.02	0.07	0.00
23	0.04	0.07	0.09	0.45	0.04	0.00	0.00
25	0.00	0.09	0.11	0.34	0.02	0.01	0.00
27	0.03	0.11	0.09	0.31	0.03	0.04	0.00
29	0.06	0.08	0.09	0.32	0.02	0.11	0.00
31	0.04	0.05	0.12	0.15	0.06	0.03	0.00
33	0.03	0.09	0.07	0.12	0.00	0.06	0.00
35	0.00	0.08	0.15	0.13	0.03	0.10	0.00
37	0.04	0.01	0.20	0.10	0.00	0.11	0.01
39	0.07	0.04	0.22	0.11	0.01	0.00	0.00
41	0.03	0.07	0.00	0.10	0.02		0.00
43	0.05	0.05	0.00	0.11	0.01		0.00
45	0.07	0.09	0.00	0.07	0.01		0.00
47	0.07	0.07	0.00	0.04	0.02		0.00
49	0.05	0.12	0.00	0.05	0.03		0.00
91	-	-	0.00	0.07	-	-	
93	-	-	0.00	0.05	-	-	
95	-	-	0.00	0.07	-	-	
97	-	-	0.00	0.05	-	-	
99	-	-	0.00	0.03	-	-	

2. Daten der AES-Analyse der Serien längs- und quer zur Faser. Die Werte entsprechen dem Anteil des Eisens an der analysierten Trockensubstanz [%].

In Faserrichtung

	Rundholz Nr.										
Abstand zum Nagel [mm]	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**Median**
5	0.70	6.07	1.21	1.86	0.55	1.97	1.89	1.80	2.49	3.85	**1.88**
15	0.21	1.03	0.65	0.84	0.06	0.38	0.87	0.33	1.54	0.12	**0.52**
25	0.11	0.50	0.47	0.52	0.05	0.26	0.50	0.22	0.54	0.10	**0.36**
35	0.08	0.37	0.37	0.31	0.05	0.18	0.35	0.17	0.26	0.10	**0.22**
95	0.05	0.11	0.19	0.17	0.03	0.08	0.14	0.06	0.09	0.11	**0.10**

Quer zur Faser

	Rundholz Nr.							
Abstand zum Nagel [mm]	**1**	**2**	**3**	**7**	**8**	**9**	**10**	**Median**
5	0.29	1.07	1.09	1.42	0.69	1.45	0.25	**1.07**
15	0.04	0.06	0.10	0.20	0.04	0.25	0.16	**0.10**
25	0.01	0.03	0.02	0.12	0.04	0.11	0.05	**0.04**
35	0.01	0.02	0.01	0.08	0.01	0.06	0.08	**0.02**
95	0.04	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03	**0.01**

3. Daten des Abbauexperiments. m_0: Trockenmasse der Probe vor dem Experiment [g]; m_u: Feuchtmasse nach der Tränkung mit FeCl3-Lösung [g]; u: Lösungsgehalt der Probe nach der Tränkung in % von m_0; m_L: In der aufgenommenen Lösung enthaltene Menge $FeCl_3$ [g]; P_0: Probenmasse vor dem Abbauversuch ($P_0 = m_0+m_L$) [g]; m_{Fe}: Aufgenommene Masse Eisen [g]; k: Eisengehalt in % von P_0; P_1: Masse der Probe nach dem Abbauversuch [g]; GV: Gewichtsverlust in % von P_0.

Serie	Nr.	m_0	m_u	u	m_L	P_0	m_{Fe}	k	P_1	GV
A	1	28.50	80.63	183	1.6943	30.19	0.5839	1.934	29.31	2.94
	2	29.17	81.59	180	1.7035	30.87	0.5871	1.901	29.91	3.11
	3	29.38	80.99	176	1.6774	31.06	0.5781	1.861	30.00	3.40
	4	28.29	81.05	187	1.7148	30.00	0.5909	1.970	28.99	3.39
	5	28.51	80.92	184	1.7031	30.22	0.5869	1.942	29.23	3.27
	6	29.17	81.07	178	1.6870	30.85	0.5814	1.884	29.81	3.40
	7	30.43	80.82	166	1.6377	32.06	0.5644	1.760	31.00	3.32
	8	29.07	81.04	179	1.6890	30.76	0.5821	1.892	29.73	3.33
	9	30.73	80.84	163	1.6285	32.36	0.5612	1.734	31.33	3.17
	10	29.30	81.30	177	1.6900	30.99	0.5824	1.879	29.93	3.44
	11	28.04	81.93	192	1.7513	29.79	0.6035	2.026	28.80	3.32
	12	27.70	79.80	188	1.6932	29.39	0.5835	1.985	28.51	3.00
	13	27.80	80.60	190	1.7159	29.52	0.5913	2.003	28.59	3.13
	14	28.76	82.25	186	1.7383	30.50	0.5990	1.964	29.55	3.12
	15	28.10	82.13	192	1.7559	29.86	0.6051	2.027	28.92	3.14
	16	28.01	81.33	190	1.7326	29.75	0.5971	2.007	28.63	3.75
	17	27.99	82.68	195	1.7775	29.77	0.6125	2.058	28.63	3.82
	18	28.20	81.25	188	1.7242	29.92	0.5942	1.986	28.87	3.52
	19	27.96	81.16	190	1.7290	29.69	0.5959	2.007	28.66	3.45
	20	27.77	81.40	193	1.7432	29.51	0.6007	2.036	28.56	3.20
	21	27.71	81.47	194	1.7472	29.46	0.6021	2.044	28.46	3.40
	22	27.84	81.40	192	1.7408	29.58	0.5999	2.028	28.58	3.37
	23	27.97	80.86	189	1.7190	29.69	0.5924	1.996	28.67	3.42
B	1	30.66	83.87	174	0.4323	31.09	0.1490	0.479	30.50	1.92
	2	28.80	79.19	175	0.4094	29.21	0.1411	0.483	28.76	1.54
	3	28.58	77.12	170	0.3944	28.98	0.1359	0.469	28.54	1.51
	4	28.59	77.89	172	0.4005	28.99	0.1380	0.476	27.00	6.88
	5	28.18	78.21	178	0.4065	28.58	0.1401	0.490	28.05	1.85
	6	29.11	77.50	166	0.3932	29.50	0.1355	0.459	28.89	2.06
	7	29.29	76.83	162	0.3862	29.68	0.1331	0.448	29.12	1.90
	8	29.75	76.13	156	0.3768	30.13	0.1299	0.431	29.65	1.57
	9	29.33	77.73	165	0.3932	29.73	0.1355	0.456	29.14	1.99
	10	29.19	79.46	172	0.4084	29.60	0.1408	0.476	28.99	2.07
	11	27.78	78.41	182	0.4114	28.19	0.1418	0.503	27.65	1.90
	12	27.83	78.17	181	0.4090	28.24	0.1409	0.499	27.82	1.48
	13	29.89	79.26	165	0.4012	30.29	0.1382	0.456	29.75	1.78
	14	27.75	75.21	171	0.3856	28.14	0.1329	0.472	27.67	1.64
	15	27.41	78.21	185	0.4128	27.82	0.1423	0.511	27.32	1.80
	16	28.18	78.67	179	0.4102	28.59	0.1414	0.494	28.11	1.70
	17	28.86	77.14	167	0.3922	29.25	0.1352	0.462	28.77	1.64
	18	28.96	76.20	163	0.3838	29.34	0.1323	0.451	28.91	1.47
	19	28.41	76.54	169	0.3910	28.80	0.1347	0.468	28.29	1.79
	20	27.83	76.14	174	0.3926	28.22	0.1353	0.479	27.78	1.54
	21	28.63	79.49	178	0.4132	29.04	0.1424	0.490	28.62	1.48
	22	28.05	78.57	180	0.4105	28.46	0.1414	0.497	27.92	1.92
	23	28.37	78.87	178	0.4103	28.78	0.1414	0.491	28.24	1.89
C	1	28.20	86.59	207	0.0949	28.29	0.0327	0.116	21.59	23.71
	2	28.86	87.19	202	0.0948	28.95	0.0327	0.113	21.29	26.47
	3	27.75	84.75	205	0.0926	27.84	0.0319	0.115	21.82	21.62
	4	29.25	87.79	200	0.0951	29.34	0.0328	0.112	27.22	7.23
	5	28.74	87.13	203	0.0949	28.84	0.0327	0.113	23.39	18.89
	6	28.70	87.01	203	0.0948	28.79	0.0327	0.113	26.04	9.57

Serie	Nr.	m_0	m_u	u	m_L	P_0	m_{Fe}	k	P_1	GV
	7	28.50	85.01	198	0.0918	28.59	0.0316	0.111	22.25	22.17
	8	28.60	85.90	200	0.0931	28.69	0.0321	0.112	20.31	29.22
	9	29.18	86.55	197	0.0932	29.28	0.0321	0.110	26.78	8.53
	10	28.85	85.90	198	0.0927	28.94	0.0319	0.110	21.73	24.90
	11	29.14	87.48	200	0.0948	29.24	0.0327	0.112	25.57	12.54
	12	27.91	83.63	200	0.0905	28.00	0.0312	0.111	23.40	16.45
	13	27.64	85.57	210	0.0941	27.74	0.0324	0.117	23.84	14.04
	14	27.71	86.57	212	0.0956	27.81	0.0330	0.119	20.22	27.29
	15	27.65	83.54	202	0.0908	27.74	0.0313	0.113	19.98	27.97
	16	28.47	86.08	202	0.0936	28.56	0.0323	0.113	26.07	8.73
	17	27.50	83.22	203	0.0905	27.59	0.0312	0.113	19.02	31.09
	18	28.18	84.14	199	0.0909	28.27	0.0313	0.111	24.77	12.39
	19	27.48	86.43	215	0.0958	27.57	0.0330	0.120	22.14	19.70
	20	28.09	85.66	205	0.0935	28.19	0.0322	0.114	21.73	22.92
	21	28.07	84.35	201	0.0915	28.16	0.0315	0.112	19.69	30.07
	22	27.87	86.09	209	0.0946	27.96	0.0326	0.117	24.82	11.22
	23	27.60	85.51	210	0.0941	27.70	0.0324	0.117	22.03	20.48
D	1	29.53	82.07	178	0.0085	29.54	0.0029	0.010	26.11	11.61
	2	28.58	81.63	186	0.0086	28.59	0.0030	0.010	23.86	16.54
	3	28.28	82.79	193	0.0089	28.29	0.0031	0.011	26.50	6.30
	4	28.57	82.47	189	0.0088	28.57	0.0030	0.011	25.42	11.03
	5	29.22	84.19	188	0.0089	29.23	0.0031	0.011	24.11	17.52
	6	28.63	82.30	187	0.0087	28.64	0.0030	0.010	24.34	15.03
	7	28.10	80.98	188	0.0086	28.11	0.0030	0.011	23.71	15.65
	8	29.19	86.43	196	0.0093	29.20	0.0032	0.011	24.45	16.27
	9	28.80	85.40	196	0.0092	28.81	0.0032	0.011	27.85	3.34
	10	28.64	85.10	197	0.0092	28.65	0.0032	0.011	27.31	4.67
	11	28.39	81.51	187	0.0086	28.39	0.0030	0.010	23.96	15.60
	12	27.88	85.42	206	0.0094	27.89	0.0032	0.012	22.72	18.54
	13	28.76	85.45	197	0.0092	28.76	0.0032	0.011	26.10	9.26
	14	28.41	85.84	202	0.0093	28.42	0.0032	0.011	25.17	11.41
	15	29.32	83.64	185	0.0088	29.33	0.0030	0.010	24.34	17.02
	16	28.72	85.89	199	0.0093	28.72	0.0032	0.011	26.87	6.44
	17	28.01	84.60	202	0.0092	28.02	0.0032	0.011	23.08	17.61
	18	28.25	81.01	187	0.0086	28.25	0.0030	0.010	22.61	19.98
	19	28.91	86.71	200	0.0094	28.92	0.0032	0.011	24.14	16.52
	20	28.46	85.75	201	0.0093	28.47	0.0032	0.011	23.43	17.70
	21	28.22	85.42	203	0.0093	28.23	0.0032	0.011	23.98	15.04
	22	28.35	85.83	203	0.0093	28.36	0.0032	0.011	22.79	19.64
	23	29.09	85.31	193	0.0091	29.10	0.0031	0.011	24.91	14.42
E	1	28.73							24.70	14.04
	2	28.20							23.36	17.19
	3	29.37							24.93	15.11
	4	28.55							23.57	17.45
	5	28.19							25.53	9.44
	6	28.45							25.94	8.82
	7	29.40							25.96	11.70
	8	29.09							27.31	6.13
	9	27.77							23.63	14.92
	10	28.48							24.40	14.33
	11	28.10							25.85	8.01
	12	27.81							24.36	12.41
	13	28.64							24.29	15.20
	14	27.67							25.83	6.64
	15	29.67							27.08	8.73
	16	28.46							25.75	9.53
	17	27.84							22.15	20.43
	18	28.11							24.40	13.20
	19	27.52							23.93	13.03
	20	27.56							22.51	18.32
	21	27.81							21.21	23.72

Anhang VII

Bilder ausgewählter Konstruktionsmerkmale

Abbildung A.1: Über 50jährige Sperre in der Gemeinde Einsiedeln (SZ). Die Einbindungen sowie die Sperrenflügel bestehen aus Trockenmauerwerk. Holz wurde nur im Bereich der Abflussektion eingesetzt (Holzkasten, Ausfachung mit Blocksteinen), wo es dem Befall durch Basidiomyceten weitgehend entzogen ist. Die verbauten Rundhölzer weisen denn auch nach mehreren Jahrzehnten lediglich Abrasionserscheinungen durch Geschiebe auf.

Abbildung A.2: Eingesenkte Sperrenflügel, Konstruktionsweise aus Österreich. Die Längshölzer der Flügel werden in den Sperrenkörper eingelassen. Der direkte Kontakt der Rundhölzer mit dem Fliesswasser im Gerinne könnte sich durch erhöhten Wassergehalt positiv auf die Lebensdauer der Sperrenflügel auswirken. Im Bild eine Sperre aus Kastanienholz im Bau, Aostatal (I). *Foto: F. Florineth.*

Abbildung A.3: Angeschweisste Nagelköpfe erleichtern das manuelle Einschlagen verringern die Gefahr von Holzverletzungen durch den Hammerkopf. *Foto: F. Florineth.*

Abbildung A.4: Verbauung Steinibach bei Hergiswil (NW) wenige Jahre nach dem Bau. Die Sperrenkörper bestehen aus Holzkasten, die Flügel sind aus Steinkörben erstellt. Bei derartigen Konstruktionen sind – anders als bei den untersuchten Sperren – die durch Pilzbefall am stärksten gefährdeten Bauteile nicht aus Holz und stellen damit keine kritischen Stellen bezüglich Pilzbefall dar. Foto: *F. Graf, WSL Birmensdorf.*