



Universität für Bodenkultur Wien  
Department für Bautechnik und Naturgefahren  
Institut für Alpine Naturgefahren



---

Masterarbeit

**Räumliche und zeitliche Rekonstruktion der Murgangaktivität  
für alpine Einzugsgebiete  
eine dendrogeomorphologische Fallstudie**

Spatio-temporal reconstruction of debris flow activity for alpine catchments – a  
dendrogeomorphological case study

Studiengang Mountain Risk Engineering

Eingereicht von

Mathias Neumann

Zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenueiur

Betreuer BOKU Wien: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Johannes Hübl

Externer Betreuer Universität Bern: Dipl.-Geogr. Dr. rer. nat. Markus Stoffel

Mitbetreuer BOKU Wien: Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Michael Grabner

Wien, September 2011

## **Danksagung**

Viele Menschen haben mich bei der Arbeit an meiner Diplomarbeit fachlich wie persönlich unterstützt.

Besonders möchte ich meinem Betreuer Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Hübl, Universität für Bodenkultur Wien, danken. Seine Initiative und Organisation hat diese Arbeit erst möglich gemacht. Durch seine Betreuung und die kritische Auseinandersetzung mit meiner Methodik und Ergebnissen hat die Arbeit stark an Wert gewonnen.

Dankbar bin ich auch meinen externen Betreuern, Dipl.-Geogr. Dr. Markus Stoffel und Dipl.-Geogr. Dr. Michelle Bollschweiler, vor allem für die Organisation der Felderhebungen und Unterstützung bei der Probenanalyse. Die fachliche Auseinandersetzung mit ihnen und mein Forschungsaufenthalt am Labor für Dendrogeomorphologie der Universität Bern haben einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet.

Mein Dank gilt auch Dipl.-Ing. Dr. Michael Grabner, Universität für Bodenkultur Wien, und seinem Team für die Ermutigung zur Durchführung dieser Arbeit, die fachliche Betreuung sowie die Möglichkeit, im Jahrringlabor des Instituts für Holzforschung meine Proben zu analysieren.

Die reibungslose Durchführung der Felderhebungen im Untersuchungsgebiet wäre ohne die freundliche und wohlwollende Unterstützung von Dipl.-Ing. Siegbert Terzer und seines Teams bei der Agrargemeinschaft Nenzing nicht möglich gewesen. Mein herzlicher Dank gilt auch dem Archivar der Gemeinde Nenzing, Thomas Gamon, für die Versorgung mit Archivdaten.

Für die Bereitstellung von Luftbildern und Geo-Daten des Untersuchungsgebietes möchte ich dem Forsttechnischen Dienst der Wildbach- und Lawinerverbauung danken. Ganz besonders sei hier Dipl.-Ing. Barbara Mayer genannt, der mein besonderer Dank gilt für ihre Unterstützung bei der Organisation der Felderhebungen, die fachliche wie auch ganz persönlich aufmunternde Unterstützung.

Für die Bereitstellung von meteorologischen Messdaten bin ich Dr. Viktor Weilguni vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion VII (Wasser) sowie Mag. Dr. Herbert Formayer vom Institut für Meteorologie und Zentrum für Globalen Wandel und Nachhaltigkeit, Universität für Bodenkultur Wien, zu Dank verpflichtet.

Ganz besonders möchte ich Emily Procter danken, die mir während der langen und oft anstrengenden Felderhebungen nicht nur eine große praktische Unterstützung, sondern vor allem eine moralische Stütze und Freundin gewesen ist.

Zuletzt möchte ich all jenen Leuten danken, die noch unerwähnt geblieben sind, aber dennoch entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. So danke ich meiner Familie und all meinen Freunden, deren hilfreiche Kommentare, aufmunternden Worte sowie deren kritisches Feedback mich während meiner Arbeit begleitet und geleitet haben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>2</b>
<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
1.1 <b>FOKUS UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>5</b>
<b>2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>6</b>
2.1 <b>PROZESSE ALPINER EINZUGSGEBIETE .....</b>	<b>6</b>
2.1.1 <i>Gerinne-basierte Prozesse .....</i>	<i>6</i>
2.1.2 <i>Lawinen und Schneegleiten.....</i>	<i>8</i>
2.2 <b>PFLANZENWACHSTUM UND UMWELTBEDINGUNGEN .....</b>	<b>9</b>
2.3 <b>BILDUNG VON HOLZ .....</b>	<b>11</b>
2.4 <b>JAHRRINGFORSCHUNG - DENDROCHRONOLOGIE UND DENDROÖKOLOGIE.....</b>	<b>12</b>
2.4.1 <i>Dendrogeomorphologie .....</i>	<i>13</i>
2.5 <b>MÖGLICHKEITEN DENDROGEOMORPHOLOGISCHER DATIERUNG VON MURKEGELN .....</b>	<b>14</b>
2.5.1 <i>Datierung mittels Zuwachsreaktionen.....</i>	<i>15</i>
2.5.2 <i>Altersbestimmung mittels Stammverletzungen .....</i>	<i>16</i>
2.5.3 <i>Altersbestimmung mittels traumatischer Harzkanalreihen .....</i>	<i>18</i>
2.5.4 <i>Datierung mittels Reaktionsholz .....</i>	<i>19</i>
2.5.5 <i>Datierung mittels Adventivwurzeln .....</i>	<i>20</i>
2.5.6 <i>Altersbestimmung auf Basis des Alters aufwachsender Bäume .....</i>	<i>21</i>
2.5.7 <i>Dendrogeomorphologie und Murgänge - state of the art.....</i>	<i>22</i>
<b>3. BESCHREIBUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS.....</b>	<b>25</b>
3.1 <b>GEOLOGIE UND GEOMORPHOLOGIE .....</b>	<b>27</b>
3.2 <b>HYDROLOGIE UND METEOROLOGIE .....</b>	<b>36</b>
3.3 <b>VEGETATION .....</b>	<b>38</b>
3.3.1 <i>Pinus mugo ssp. uncinata (Spirke oder Hakenkiefer) .....</i>	<i>41</i>
3.4 <b>WILD .....</b>	<b>44</b>
3.5 <b>GESCHICHTE UND CHRONIK.....</b>	<b>47</b>
3.6 <b>RELEVANTE PROZESSE IM EINZUGSGEBIET.....</b>	<b>50</b>
<b>4. METHODEN .....</b>	<b>52</b>
4.1 <b>AUFNAHMEMETHODEN .....</b>	<b>52</b>
4.1.1 <i>Unterteilung des Untersuchungsgebietes.....</i>	<i>53</i>
4.1.2 <i>Vorgangsweise bei Auswahl der Probestämme und Art der Beprobung .....</i>	<i>56</i>
4.1.3 <i>Dokumentation der Proben und Zusatzinformationen .....</i>	<i>58</i>
4.2 <b>VORBEREITUNG DER PROBEN .....</b>	<b>60</b>
4.3 <b>ANALYSIEREN DER JAHRRINGE.....</b>	<b>61</b>
4.3.1 <i>Vorgangsweise bei Besonderheiten der Jahrringe.....</i>	<i>62</i>

4.4	ÜBERPRÜFUNG UND SYNCHRONISIERUNG DER DATENREIHEN .....	63
4.4.1	<i>Mittelkurve aus vom Prozess beeinflussten Proben .....</i>	64
4.4.2	<i>Synchronisierung der Messkurven .....</i>	64
4.5	ALTERSBESTIMMUNG DER BEPROBTEN BÄUME .....	65
4.6	IDENTIFIZIERUNG VON EREIGNISJAHREN .....	66
4.6.1	<i>Wachstumsreaktionen.....</i>	66
4.6.2	<i>Ereignisjahre.....</i>	68
4.7	IDENTIFIZIERUNG VON LAWINENEREIGNISSEN .....	70
4.8	SONSTIGE EINZUGSGEBIETS-BEZOGENE DATEN .....	71
4.8.1	<i>Luftbilder der Bärenrufe .....</i>	71
4.8.2	<i>Analyse von Niederschlagsdaten.....</i>	71
4.8.3	<i>Ereignisauslösende Niederschläge.....</i>	73
4.8.4	<i>Trockenperioden und Jahrringbreite .....</i>	74
<b>5.</b>	<b>RESULTATE.....</b>	<b>76</b>
5.1	BEPROBTE BÄUME UND JAHRRINGANZAHL .....	76
5.2	ALTERSSTRUKTUR DES BESTANDES.....	77
5.3	REFERENZKURVEN.....	80
5.4	WACHSTUMSSTÖRUNGEN UND EREIGNISJAHRE.....	81
5.5	FILTERUNG DES LAWINENEINFLUSS.....	85
5.6	AUSGEWÄHLTE EREIGNISJAHRE IM DETAIL.....	85
5.7	NIEDERSCHLAGSDATEN.....	90
5.7.1	<i>Ereignisauslösende Niederschläge.....</i>	90
5.7.2	<i>Monatssummen des Niederschlages im Vergleich mit Ereignisjahren.....</i>	93
5.8	VERGLEICH HISTORISCHER LUFTBILDER.....	94
<b>6.</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>100</b>
6.1	INTERPRETATION VON ALTER UND ALTERSTRUKTUR DER BEPROBTEN BÄUME.....	100
6.2	REFERENZKURVEN, GEOMORPHISCHE UND KLIMATISCHE SCHWANKUNGEN DER VERGANGENHEIT .	101
6.3	FILTERUNG DES LAWINENEINFLUSS.....	102
6.3.1	<i>Überlegungen zum Wuchsbild der Bäume in Sektor C.....</i>	103
6.4	MURGANGAKTIVITÄT DER BÄRENRÜFE.....	105
6.4.1	<i>Ereignischronik.....</i>	105
6.4.2	<i>Indexwert <math>I_t</math> der rekonstruierten Ereignisjahre.....</i>	105
6.4.3	<i>Räumliche Verlagerung der Prozessaktivität.....</i>	107
6.4.4	<i>Einschränkungen der räumlichen Rekonstruktion .....</i>	108
6.5	EREIGNISAUSLÖSENDE NIEDERSCHLÄGE.....	109
6.6	NIEDERSCHLAGSVARIABILITÄT UND EREIGNISJAHRE.....	110
6.7	DIE SPIRKE UND DIE DENDROGEOMORPHOLOGIE .....	111
6.7.1	<i>Referenzkurven aus prozess-beeinflussten Proben.....</i>	112
6.7.2	<i>Physiologische Einschränkungen.....</i>	113
6.7.3	<i>Variabilität des Wachstums.....</i>	113

<b>7. FACHLICHES NACHWORT .....</b>	<b>114</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>116</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>119</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>120</b>
<b>ANHANG.....</b>	<b>126</b>
A) AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER MITTELKURVENBILDUNG.....	126
B) BEISPIELE FÜR WACHSTUMSREAKTIONEN.....	127
C) ERGEBNISSE DER DENDROGEOMORPHOLOGISCHEN ANALYSE IM DETAIL .....	136
D) AUSWERTUNG NIEDERSCHLAGSDATEN.....	152
<b>ERKLÄRUNG.....</b>	<b>161</b>
<b>ENGLISH SUMMARY .....</b>	<b>162</b>
INTRODUCTION .....	162
METHODS.....	164
RESULTS .....	167
DISCUSSION .....	170

## Kurzfassung

Zahlreiche Forschungsarbeiten und Studien haben das Potential dendrogeomorphologische Methoden für die Untersuchung von Naturgefahren aufgezeigt. Durch die Analyse des Zuwachsverlaufes von Bäumen ist damit für bewaldete Einzugsgebiete eine räumliche und zeitliche Rekonstruktion der Murgangaktivität möglich.

Für die vorliegende Untersuchung wurden auf der „Bärenrufe“, einem Murkegel in Vorarlberg, Österreich, 206 Bäume mit Zuwachsbohrer und Säge beprobt. Ziel war eine räumliche und zeitliche Rekonstruktion der Murgangaktivität, Filterung des Lawineneinflusses sowie die Identifizierung von Ereignis auslösendem Niederschlag.

Die Größe des Sammelgebietes der „Bärenrufe“ ist 0,55 km<sup>2</sup>, einschließlich des Ablagerungsgebiets beträgt die Größe des gesamten Einzugsgebietes 0,68 km<sup>2</sup>. Das mittlere Gefälle des Murkegels beträgt etwa 28 %.

Es wurden vorwiegend Spirken (*Pinus mugo ssp. uncinata*) beprobt. Diese Art wurde bis jetzt noch nicht für die Rekonstruktion von Murgangaktivität verwendet. Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen jedoch die Eignung dieser Art für weitere zukünftige dendrogeomorphologische Untersuchungen. Üblicherweise werden auch vom Prozess unbeeinflusste Bäume beprobt, um eine Referenzkurve für die Korrektur der Messreihen zu erstellen. Da solche Bäume in diesem Untersuchungsgebiet nicht vorhanden waren, musste eine „Referenzkurve“ mit durch den Prozess gestörten Bäumen gebildet werden.

Bei der Analyse der Proben wurden hauptsächlich die Wachstumsreaktionen in Form von abrupten Zuwachsschüben oder –einbrüchen gefunden, seltener auch Verwundungen und Druckholzbildung, bei Fichten (*Picea abies* Karst.) auch traumatische Harzkanalreihen. Mit diesen Wachstumsreaktion und deren Datierung konnten Informationen über die Murgangaktivität der Vergangenheit gewonnen werden. Im Zeitraum 1839 - 2007 wurden 16 Ereignisjahre erkannt und die räumliche Lage der Murgangaktivität in diesen Jahren beschrieben. Für die Identifizierung von Ereignisjahren wurde ein semi-quantitativer Ansatz gewählt. Einerseits wurde über den Indexwert  $I_t$  die Anzahl von Bäumen mit Reaktionen berücksichtigt wie auch deren räumliche Verteilung und Lage zueinander. Es wurde für  $I_t$  ein Grenzwert von min. 4 % gewählt. Durch Vergleich mit Archivdaten konnte gezeigt werden, dass selbst Ereignisse, die große Teile des Murkegels beeinflusst haben, ein  $I_t$  von etwa 8 % aufweisen und damit der gewählte Grenzwert gerechtfertigt erscheint, da wohl nicht alle Ereignisse das gesamte Untersuchungsgebiet bestrichen haben.

Die Ergebnisse lassen vermuten, dass sich in diesem Zeitraum die räumliche Lage der Prozessaktivität auf dem Murkegel geändert hat. So haben nicht alle Murgangereignisse Reaktionen bei Bäumen im gesamten Untersuchungsgebiet bewirkt.

Die gewählte Methodik einer gezielten Beprobung augenscheinlich lawinenbeeinflusster Bäume zur Filterung des Lawineneinflusses hat sich für die Identifizierung einzelner Ereignisse als Lawinen als nicht geeignet erwiesen. Wahrscheinlich sind andere Gründe für den besonderen Wuchs dieser Bäume verantwortlich.

Mit den verfügbaren Niederschlagsdaten war es nicht möglich allen Ereignisjahren auch intensive Niederschlagsereignisse zuzuordnen. Der Literatur entnommene Grenzwerte des Tagesniederschlags, die potentiell Murgang auslösend sein sollen, wurden häufig überschritten, auch in Jahren ohne dendrogeomorphologisch erkennbare Murgangaktivität. Die mäßige Datenlage durch deren geringe zeitliche Auflösung und den Abstand der Messstationen zum Untersuchungsgebiet war nicht ausreichend, um Starkniederschlagsereignisse zu erkennen, die zur Auslösung von Murgängen geführt haben.

## Abstract

Several research projects and surveys have highlighted the potential of dendrogeomorphological methods in the field of assessment of natural hazards. By analyzing the past growth of trees both temporal and spatial reconstruction of the debris flow activity of forested catchments is possible.

For this survey 206 trees growing on the “Bärenrüfe”, a debris cone in Vorarlberg, Austria, were sampled using increment borer, chain - and hand saw. The object was a temporal and spatial reconstruction of the local debris flow activity, filtering of the influence of snow avalanches on sampled trees as well as an assessment of event-triggering precipitation.

The total size of the catchment is 0,68 km<sup>2</sup>, excluding the deposition area of the debris cone it has a size of 0,55 km<sup>2</sup>. The mean slope of the deposition area is approx. 28 %.

Samples were taken mainly from the species *Pinus mugo* ssp. *uncinata*. This species has not been used for the purpose of reconstruction of debris flow activity. The results of this survey have proven the suitability of this species for future dendrogeomorphological campaigns.

Usually samples are also taken from trees unaffected by the process, which is under examination. This is done to establish a reference curve for correction of the data series derived from the analysis of the samples. Hence such trees were missing for the survey site, a “reference curve” were created using trees affected by the process debris flow.

The results of the analysis of the samples showed mainly growth reactions in the form of abrupt growth release and growth suppression, more seldom occasionally injuries and compression wood were found, for Norway spruce (*Picea abies* Karst.) also lines of traumatic resin ducts. Using the growth reactions and their date information on the debris flow activity in the past were gathered. For the time period between 1839 and 2007 16 event years of debris flow activity were identified and the respective locations of the process activity were described. For the identification of event years a semi-quantitative approach was chosen. Via the index value the amount of trees with reactions were taken into account as well as their spatial distribution and relative location. For it a threshold of at least 4 % was chosen. Comparison with archival data showed that events, which affected big parts of the debris cone, had an It of merely approx. 8 %. Therefore the selected threshold seems reliable considering that not all events will affect the survey site to the same extent.

The results suggest that in the past the spatial location of the process activity on the debris cone has changed. Not all debris flow events have caused growth reactions in trees on the total survey site.

The chosen method of selective sampling of trees with apparent avalanche influence was not suitable for identification of single avalanche events and filtering of the avalanche influence. Probably there are other reasons, which caused the specific growth of these trees.

With the available data on precipitation it was not possible to allocate intensive rainfall events to all debris flow events. Thresholds for the daily precipitation sum, which were described in the literature as potential event-triggering, were often exceeded even in years without dendrogeomorphological evidence of debris flow activity. The temporal resolution of the data and the distance between meteorological measuring stations did not suffice to identify debris flow triggering rainfall events.

## 1. Einleitung

Murgänge sind wichtige geomorphische Prozesse steiler alpiner Einzugsgebiete, welche auf das Leben und Wirtschaften in solchen Gebiete großen Einfluss haben können. Unter einem Murgang versteht man meist ein mobiles Phasengemisch aus hauptsächlich Wasser und Steinen. Eine solche Masse bewegt sich meist innerhalb eines Gerinnes und kommt zur Ablagerung, sobald die Längsneigung einen kritischen Wert unterschreitet. Murgänge haben großes Schadenspotential auf Infrastruktur, landwirtschaftliche Flächen und andere Risikoobjekte. Unter gewissen Umständen können sie auch einen Gefahr von Leib und Leben von Personen darstellen. So sind Informationen über die Häufigkeit und räumliche Ausbreitung derartiger Prozesse wertvoll im Umgang mit diesen Prozessen. Allerdings ist es oft schwierig solche Daten zu sammeln. Dies liegt einerseits an der oft abgelegenen Lage der beeinflussten Gebiete, andererseits auch an der Charakteristik von Murgängen hohe Geschwindigkeit aber nur eine kurze Ereignisdauer aufzuweisen. Ein Werkzeug, Informationen über Murgänge in der Vergangenheit zu sammeln, ist die Dendrogeomorphologie.

Diese Variante angewandter Holzwissenschaft nützt die Eigenschaft von Bäumen Informationen über vergangene Umweltbedingungen in ihrem Stamm zu speichern. Während diese Methode in anderen Ländern bereits häufig angewandt wurde, gibt es in Österreich noch wenig Erfahrung in Zusammenhang mit der Rekonstruktion von Murgangaktivität.

Mit der organisatorischen Unterstützung von Wissenschaftlern der Universität für Bodenkultur in Wien, und der Universität Bern, Schweiz, sowie der finanziellen Unterstützung durch das EU-Programm „AdaptAlp“ wurde diese Arbeit durchgeführt.

Das Labor für Dendrogeomorphologie (Universität Bern) (unter der Leitung von Dr. Markus Stoffel) ist Projektpartner und leistet einen Beitrag zur Rekonstruktion von Murgängen mit Hilfe der Jahrringanalyse. Die Rekonstruktion von Häufigkeiten und Intensität von Murgängen sowie Entwicklung von Wegen und Mitteln zur Identifizierung und Quantifizierung von Bemessungsereignissen sind weitere Eckpunkte der Projektmitarbeit (Quelle: [www.dendrolab.ch](http://www.dendrolab.ch)).

„AdaptAlp“ mit dem Untertitel „Adaptation to Climate Change in the Alpine Space“ ist ein Projekt im „Alpine Space Programme (Interreg IVb)“ der „European Territorial Cooperation 2007-2013“. 16 Projektpartner aus 6 verschiedenen europäischen Ländern sind daran beteiligt. Ein Ziel von „AdaptAlp“ ist es zur Erfassung der Auswirkungen des Klimawandels

und den Möglichkeiten von Anpassungsstrategien beizutragen. Weiters sollen Empfehlungen für Politiker sowie lokale Entscheidungsträger hinsichtlich möglicher Anpassungsstrategien sowie Katastrophen- und Risikomanagement entwickelt werden. Ende August 2011 soll das Programm abgeschlossen werden (Quelle: [www.adaptalp.org](http://www.adaptalp.org)).

Die Ergebnisse dieser Arbeit können beitragen die Murgangaktivität eines Untersuchungsgebiets zu beschreiben und Veränderungen in der Vergangenheit aufzuzeigen, wie auch die möglichen Ursachen hierfür zu untersuchen. In dieser Hinsicht entspricht sie den Zielsetzungen von „AdaptAlp“.

### **1.1 Fokus und Zielsetzung**

Für diese Arbeit wurde als Untersuchungsgebiet die „Bärenrüfe“ ausgewählt, ein großer Ablagerungskegel im Gamperdonatal (im Südosten des Bundeslandes Vorarlberg, Österreich, nahe der Grenze zu Liechtenstein). Dieser ist hauptsächlich von der Art *Pinus mugo* ssp. *uncinata* (Spirke oder Hakenkiefer) bewachsen, einer Baumart, die bis jetzt kaum für dendrogeomorphologische Untersuchungen verwendet wurde. Im Untersuchungsgebiet scheint die Murgangaktivität der dominierende geomorphologische Prozess zu sein, allerdings sind auch Anzeichen für Schneelawinenaktivität vorhanden.

Folgende Ziele dieser Arbeit wurden definiert:

- Erstellung einer Ereignischronik und räumliche Rekonstruktion der lokalen Murgangaktivität durch die Anwendung dendrogeomorphologischer Methoden
- Filterung des Lawineneinflusses bzw. Unterscheidung zwischen Lawinen- und Murgang-Ereignissen mittels dendrogeomorphologischer Methoden
- Identifizierung von ereignisauslösenden Niederschlagsereignissen mit den Ergebnissen der dendrogeomorphologischen Analysen und meteorologischen Daten
- Prüfung der Eignung der Art *Pinus mugo* ssp. *uncinata* für dendrogeomorphologische Untersuchungen

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1 *Prozesse alpiner Einzugsgebiete*

Unter der Disposition eines Einzugsgebiets gegenüber geomorphologischer Prozesse versteht man die Anlage oder Bereitschaft von Material wie Wasser, Schnee, Eis, Stein- oder Erdmassen sich unter dem Einfluss der Schwerkraft talwärts zu bewegen. Werden die für eine Auslösung des Prozesses erforderlichen Umweltbedingungen erreicht und überschritten, kommt es zur Ausbildung eines Ereignisses (Lehmann 1993).

Derartige gravitative Prozesse besitzen in der Regel ein Sammel- oder Anbruchgebiet, wo die beteiligten Massen wie etwa Hangschutt, Geschiebmaterial oder Schnee akkumuliert werden. An das Sammelgebiet schließt das Transportgebiet oder das Transportgerinne an, das in das Ablagerungsgebiet übergeht. Hier werden die in Bewegung befindlichen Massen verzögert und kommen schließlich zur Ablagerung. Meist verflacht sich hier das Gelände oder die Rauigkeit des Geländes wird höher. Beides bewirkt letztendlich eine Reduktion der Bewegungsenergie des Ereignisses und damit die Ablagerung der beteiligten Massen (Blair et al. 1994).

#### 2.1.1 **Gerinne-basierte Prozesse**

Ständig oder zeitweise wasserführende Gerinne können abhängig von Parametern wie etwa der geographischen Lage, der Disposition, Geschichte, dem Alter oder der Art des Grundgesteins verschiedene Abflussprozesse ausbilden.

Diese sind einerseits fluviale Prozesse wie Reinwasserabfluss mit oder ohne Geschiebetransport an der Gerinnesohle. Diese Prozesse sind hauptsächlich flüssigkeitsgesteuert und folgen den physikalischen Gesetzen einer newton'schen Flüssigkeit (Lehmann 1993).

Bei feststoffgesteuerten Prozessen wie granularen oder nicht linear viskosen Strömen ändert sich teilweise das Fließverhalten und andere physikalische Gesetze müssen zur Anwendung kommen, um das Verhalten solcher Ströme zu erklären. Bei derartigen Prozessen haben Feststoffe einen wesentlichen Einfluss auf das Fließverhalten, im Gegensatz zu fluvialen, flüssigkeitsgesteuerten Prozess, bei denen dies nicht der Fall ist (Blair et al. 1994).

Allerdings ist die Einteilung in fluviale, flüssigkeitsgesteuerte und nicht-fluviale, feststoffgesteuerte Prozesse nicht ausreichend, um alle derartigen Prozesse zu gliedern und voneinander zu unterscheiden.

Die Einteilung von Hungr (2001) nimmt zusätzlich Bezug auf den Wassergehalt und das Ausgangsmaterial. Hungr unterscheidet unter anderem zwischen „mud flow“, „debris flood“, und „debris flow“.

Ein „mud flow“ (deutsch: Schlammstrom) besteht aus Wasser und Feinmaterial. Die häufigste Korngröße ist hier Schluff, neben Feinsand und tonigen Anteilen. Der Wassergehalt ist zumindest gesättigt. Ein „mud flow“ ist in diesem Zusammenhang eigentlich als eine Form eines „debris flow“ zu bewerten.

Ein „debris flood“ oder auch „hyperconcentrated flow“ (deutsch: hyperkonzentrierter Abfluss) ist eine Übergangsform zwischen fluvialen Abfluss mit Sedimenttransport an der Sohle und einem voll ausgebildeten „debris flow“. Der Sedimentanteil ist im Vergleich zum rein fluvialen Abfluss höher und wird nicht mehr ausschließlich entlang der Sohle sondern über den gesamten Fließquerschnitt verteilt transportiert. Der Wassergehalt ist gesättigt.

Bei einem „debris flow“ (deutsch: Geröllstrom, Murgang) wird auch gröberes Material transportiert. Die maximale Korngröße ist unterschiedlich, kann aber sehr groß sein. Der Wassergehalt und Anteil an Feinmaterial hat einen großen Einfluss auf das Fließverhalten, was eine weitere Klassifizierung notwendig macht (Hungr 2001).

Die weitere Unterteilung eines „debris flow“ wurde von Hübl (1995) versucht. Hübl weist unter anderem auf den Einfluss der Feinfraktion auf das Abflussgeschehen hin, da diese einen großen Einfluss auf das rheologische Verhalten haben kann. So wird zwischen kohäsiven und nicht-kohäsiven Murgängen unterschieden. Bei nicht-kohäsiven, granularen Murgängen ist der Einfluss der Feinfraktion gering und die Viskosität des Stromes stammt hauptsächlich von Interaktionen zwischen den Grobanteilen. Bei einer kohäsiven Mure ist der Anteil der Feinfraktion, der sogenannten Matrix, hoch und hat einen großen Einfluss auf das rheologische Verhalten (Hübl 1995).

Im deutschen Sprachraum ist für Bäche und Gerinne des Hochgebirges, des Berg- oder Hügelland, welche zu intensivem Sedimenttransport fähig sind, die Bezeichnung „Wildbach“ gebräuchlich. Die Unterteilung von Stiny aus dem Jahre 1910 ist nach wie vor aktuell und findet ihre Anwendung. Stiny unterteilt in „Jungschuttwildbäche“ und „Altschuttwildbäche“.

Unterschieden wird hinsichtlich der potentiellen Feststoffherden, also der Quellen, die zum Sedimentpotential für Geschiebetransport oder Murgänge beitragen.

Ein Jungschuttwildbach bezieht sein Material aus Ablagerungen jüngerer Zeit, häufig bestehend aus Produkten physikalischer Verwitterung. Dieses Material zeichnet sich meist

durch einen geringen Feinanteil aus und ist daher stark wasserdurchlässig. Ein Jungschuttwildbach zeigt meist regelmäßige Murgangaktivität.

Das transportierte Material eines Altschuttwildbachs stammt im Gegensatz von eiszeitlichen Moränen oder anderen reliktschen Schuttablagerungen. Der Feinanteil ist hier höher und die Murgangaktivität meist unregelmäßiger. Ein Wildbach dieses Typs kann lange Zeit inaktiv bleiben bedingt durch das Alter und die mechanische Stabilität der Ablagerungen. Nach einem Initialereignis kann sich aber unter Umständen eine regelmäßige Murgangaktivität einstellen (Stiny 1910).

### **2.1.2 Lawinen und Schneegleiten**

Unter gewissen topographischen und meteorologischen Randbedingungen kann es auf Hängen zur Bildung von Schneelawinen kommen. Unter einer Lawine sind schnelle Schneemassen zu verstehen, die durch ihre kinetische Energie, die vorlaufende Druckwelle oder ihre Ablagerungen Objekte beschädigen oder zerstören können. Schneelawinen können auch geomorphologisch wirksam werden und die Erdoberfläche beeinflussen und verändern. Besonders nasse Frühjahrslawinen können ein erhebliches Erosionspotential aufweisen (Land Tirol, 2000).

Das Gebiet, in dem eine Lawine entsteht, wird Anbruchsgebiet genannt. Dieses hat meist eine Neigung zwischen 30 und 45°. Bei flacherer Neigung wird die Auslösung einer Lawine unwahrscheinlicher, da die hangparallele Komponente der Gewichtskraft, welche für die Auslösung wichtig ist, mit geringer Neigung immer kleiner wird. An Hänge über 45-50° baut sich meist nur eine geringe Schneemächtigkeit auf, da Schnee durch die Schwerkraft regelmäßig abrutscht (McClung & Schärer 1993).

Die Einwirkung einer Lawine auf ein Objekt in ihrer Sturzbahn ist vor allem abhängig von der Dichte und Geschwindigkeit der Schneemassen. Der daraus resultierende Lawinendruck kann zwischen einigen kPa bis über 1000 kPa groß sein. Durch Beobachtungen konnten Schäden an Konstruktionen und Vegetation Lawinendrücken gegenübergestellt werden. Überschreitet der Lawinendruck 5 kPa nicht, so werden lediglich Türen eingedrückt. Lawinen, die einen Druck zwischen 5 und 30 kPa ausüben, vermögen Holzgebäude und gemauerte Gebäude einzudrücken oder zu beschädigen. Bei einem Druck zwischen 30 und 100 kPa können Bäume entwurzelt werden (Land Tirol, 2000).

Durch diese Druckwirkung können Lawinen beträchtlichen Schaden an Vegetation und Objekten in ihrer Sturzbahn verursachen.

Das Wirken der Schwerkraft kann auch eine langsame abwärtsgerichtete Bewegung der Schneedecke auslösen. Abhängig von der Reibung zwischen Schichten der Schneedecke und dem Boden ist die gesamte Schneedecke in Bewegung oder nur Schichten davon. Dieser Prozess wird Schneegleiten oder Schneekriechen genannt (In der Gand & Zupancic 1966). Andererseits kann es auch zu Setzungserscheinungen der Schneedecke kommen, wobei es zu einer Verringerung der Schneehöhe und einer Erhöhung der Dichte kommt.

Auch durch diese langsamen Bewegungen kann die Schneedecke Druck auf Objekte oder Vegetation ausüben. Die Druckintensität ist vor allem abhängig von Schneedichte, Geländeneigung und der Rauigkeit des Untergrundes (Höller et al. 2009).

Die Geschwindigkeit dieser Bewegungen ist andererseits auch abhängig von Temperatur und Witterungsbedingungen und kann zwischen einigen Millimetern und Metern pro Tag betragen. Meist aber wird ein Wert von 5 mm pro Tag nicht überschritten (In der Gand & Zupancic 1966).

Schneegleiten kann trotz der geringen Geschwindigkeit Schäden an junger Vegetation bewirken. Durch den Druck auf den Stamm kann es bei mangelnder Verwurzelung zu Schiefstellung oder Entwurzelung der Pflanze kommen. Auch können Äste von der in Bewegung befindlichen Schneedecke festgehalten und abgerissen werden. Die Kraft, die benötigt wird, eine Pflanze zu entwurzeln, steigt sowohl mit dem Stammdurchmesser als auch mit der Höhe der Pflanze. Ein weiterer Faktor, der den Widerstand einer Pflanze gegenüber Schneegleiten beeinflusst, ist die Rauigkeit der Pflanze im Winter. Arten, deren Blätter oder Nadeln im Herbst abfallen wie Laubbäume oder sommergrüne Nadelbäume, sind weniger empfindlich gegenüber Schneegleiten (Höller et al. 2009).

## **2.2 Pflanzenwachstum und Umweltbedingungen**

Pflanzen sind autotrophe Individuen. Sie besitzen die Fähigkeit Sonnenenergie in chemische Energie umzuwandeln (Prinzip der Photosynthese) und so Energie in Form von Kohlehydraten kurz- bis langfristig zu speichern. Aus mineralischen Bestandteilen (hauptsächlich Kohlendioxid und Wasser aber auch Nährstoffen wie etwa Stickstoff, Phosphor oder Kalium) und Energie werden organische Moleküle synthetisiert, die essentiell für Stoffwechsel und Körperbau der Pflanze sind. Das Primärprodukt der Photosynthese ist die Glukose, ein Einfachzucker. Dieser wird dann entweder unmittelbar verbraucht oder in eine Transport- oder Speicherform umgewandelt (Schütt & Koch 1978).

Die grünen Blätter und Nadeln von Pflanzen sind die Produktionsstätten dafür: In besonderen Zellorganellen, den Chloroplasten, befinden sich Ansammlungen des grünen Blattpigments Chlorophyll, das Sonnenenergie absorbieren kann und so der entscheidende Bestandteil in der Photosynthese ist (Schütt & Koch 1978).

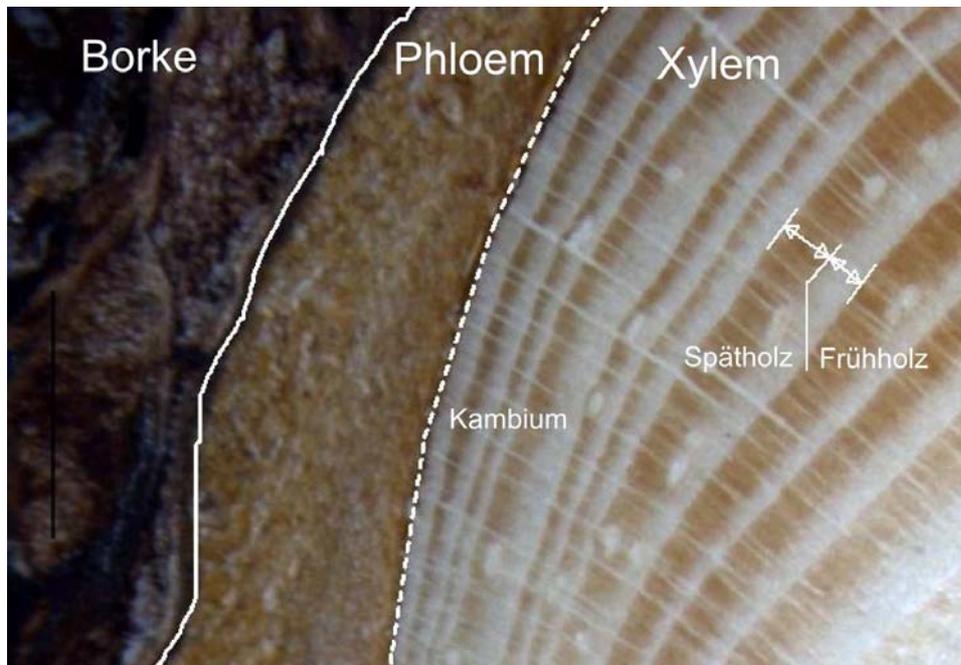
Pflanzen benötigen eine Energiequelle für die Photosynthese. Ein Mangel an Sonnenlicht kann die Produktion von Kohlenhydraten beschränken. Ein Übermaß an Sonnenlicht kann allerdings zu Gewebeschäden führen, wobei Pflanzen Schutzmechanismen gegen solche Schädigungen entwickelt haben (Taiz & Zeiger 1998).

Wasser kommt eine weitere entscheidende Rolle im Stoffwechsel von Pflanzen zu. Wie tierische Organismen bestehen auch Pflanzen zum Großteil aus Wasser und dieses übernimmt wichtige Funktionen im Pflanzenkörper wie etwa als Transportmedium innerhalb und zwischen Pflanzenzellen. Durch Verdunstung kommt es zur Abgabe von Wasserdampf durch die Pflanze an die Atmosphäre, während über das Wurzelsystem Wasser in flüssiger Form aufgenommen wird. Kontrollmechanismen wie Schutzschichten oder regelbare Öffnungen in der Blattoberfläche steuern und begrenzen die Abgabe von Wasser. Über diese Spaltöffnungen wird einerseits Wasserdampf abgegeben aber auch Kohlendioxid in den Pflanzenkörper aufgenommen. Mineralstoffe hingegen werden in gelöster Form aus der Bodenphase aufgenommen und gelangen über Leitgefäße in jene Teile der Pflanze, wo sie benötigt werden (Kozłowski & Pallardy 1997).

Die Temperatur (sowohl der Atmosphäre als auch des Bodens) beeinflusst und begrenzt diese Prozesse. Dies geschieht durch die Verfügbarkeit und Konzentration von für die Photosynthese benötigten Stoffen wie Wasser und Kohlendioxid. Liegt beispielsweise die Bodentemperatur unter dem Gefrierpunkt und ist das Wasser im Boden gefroren, ist ein Transport von flüssigem Wasser und den darin gelösten Stoffen nicht möglich. Auch wird die Geschwindigkeit des Ablaufes von Prozessen in der Pflanzenzelle von Temperatur beeinflusst (Taiz & Zeiger 1998).

## 2.3 **Bildung von Holz**

Das radiale Wachstum von Pflanzen geschieht durch das vaskuläre Kambium, eine dünne Schicht bestehend aus lebenden Zellen, die während der Wachstumsperiode neue Zellen bildet. Das vaskuläre Kambium ist von zylindrischer Form und liegt zwischen dem Xylem und Phloem von Stamm, Ästen und verholzten Wurzeln (Larson 1994).



**Abbildung 1: Aufnahme eines Stammquerschnitts, helle rundliche Strukturen im Xylem sind Harzkanäle**

Das Kambium bildet einerseits Zellen des Phloems (auch Bast genannt), das für den Transport von Syntheseprodukten sorgt, andererseits Zellen des Xylems (oder Holz), das dem Wassertransport sowie der mechanischen Stabilität der Pflanze dient. Die Holzzellen des Xylems werden an der Innenseite des Kambiums gebildet und bilden den Stamm der Pflanze. Nadelbäume bilden für das Xylem neben Parenchymzellen, die Speicherfunktionen übernehmen, vor allem längliche Gefäße, die so genannten Tracheiden. Tracheiden besitzen eine verholzte Zellwand, erscheinen meist lang gestreckt und sind untereinander durch perforierte Stellen in der Zellwand verbunden, wodurch Stofftransport zwischen derart verbundenen Zellen möglich ist. Bei Nadelbäumen besteht das Holz hauptsächlich aus diesen Tracheiden, deren Form und Größe aber Änderungen unterworfen ist (Wagenführ 1989).

Einige Arten bilden im Xylem zusätzlich noch Harzkanäle aus (etwa *Picea*, *Pinus* oder *Larix*). Diese sind wichtig für den Transport des von der Pflanze gebildeten Harzes (Schweingruber 1983).

In unseren Breiten der gemäßigten Zone mit Jahreszeitenwechsel beginnt das Pflanzenwachstum meist im Frühjahr und endet im Herbst. Die Qualität und Quantität des gebildeten Holz ändert sich im Laufe der Wachstumsperiode. Holz, gebildet im Frühjahr oder Frühsommer, wird Frühholz genannt. Es zeichnet sich durch eine generell eher helle Farbe aus sowie durch große Durchmesser der gebildeten Tracheiden und dünne Zellwände. Holz, welches im Sommer und Herbst gebildet wird, so genanntes Spätholz, hat im Vergleich zum Frühholz eine dunklere Farbe (siehe Abbildung 1), geringere Durchmesser der Tracheiden und verdickte Zellwände. Der Übergang zwischen Früh- und Spätholz während der Wachstumsphase ist fließend, während der Wechsel von Spät- auf Frühholz im Frühjahr abrupt passiert. Häufig finden sich im Frühholz mehr Harzkanäle als im Spätholz (Esau 1953, Tsoumis 1991).

In der Querschnittsfläche erscheint bei Nadelbäumen dieser Wechsel zwischen dunklem Spätholz und hellem Frühholz als eine Abfolge von Linien, die Jahrringe genannt werden. Deren Breite repräsentiert das jahreszeitlich schwankende Dickenwachstum der Pflanze (Schweingruber 1983).

### **2.4 Jahrringforschung - Dendrochronologie und Dendroökologie**

Die Jahrringforschung kann als Überbegriff für spezifischere Forschungsgebiete verstanden werden. So können durch die Analyse der Jahrringe verholzter Pflanzen gespeicherte Informationen über die Vergangenheit gewonnen werden (Schweingruber 1983).

Sehr alt ist die Anwendung der Jahrringforschung in der Forstwirtschaft. So wird die Jahrringanalyse schon seit langem zur retrospektiven Beurteilung der Zuwachsleistung, insbesondere des Volumszuwachses, verwendet (Guttenberg 1915).

Die Dendrochronologie im engeren Sinne beschäftigt sich hauptsächlich mit der Datierung von Hölzern und Holzproben. Durch Kombination von überlappenden Messreihen lassen sich lange Chronologien der Wachstumsbedingungen eines Gebietes erstellen (Douglas 1920; Fritts 1976). Liegen solche Chronologien für ein Gebiet und eine Baumart vor, so erlaubt dies Datierung von historischem Bauholz, fossilem Holz oder Kunstwerken (Klein 1985) oder die Rekonstruktion menschlicher Aktivitäten durch die Analyse von historischem Holz (Grabner et al. 2004).

Die Dendroökologie ist gewissermaßen aus dieser hervorgegangen und wendet die Methoden der Dendrochronologie für andere Fragestellungen an. Die Anwendungen sind sehr breit

gefächert. So haben zahlreiche Teilbereiche der Geowissenschaften Überschneidungsbereiche mit der Dendroökologie, wie etwa die Glaziologie, Hydrologie, Tektonik, Umweltforschung, Klimatologie oder Geomorphologie (Bräuning 1995).

### **2.4.1 Dendrogeomorphologie**

Der Begriff „Dendrogeomorphologie“ wurde erstmalig 1971 von Jouko Alestalo verwendet und von ihm geprägt. Die Analyse der Wachstumsreaktionen von Bäumen, die von geomorphologischen Prozessen beeinflusst wurden, mittels dendrochronologischer Methoden wird zur Beschreibung und Rekonstruktion eben dieser Prozesse verwendet. Mit geeigneten Methoden kann sowohl Zeitpunkt, Intensität, räumliche Ausbreitung und Häufigkeit solcher Prozesse rekonstruiert werden (Alestalo 1971).

John F. Shroder und David R. Butler sind zwei weitere Autoren, die durch ihre Arbeiten zu dieser relativ neuen Wissenschaft die Grundlage für die umfangreiche Forschungsarbeit der letzten Jahren gelegt haben (z.B. Shroder 1980, Shroder & Butler 1986).

Die Dendrogeomorphologie hat zahlreiche Anwendungsgebiete. In Stoffel et al. (2010) findet sich ein Überblick über deren Möglichkeiten und aktuelle Anwendungsbereiche. Verschiedene Studien und Forschungsarbeiten aus dem Gebiet der angewandten Jahrringanalyse befassen sich mit verschiedenen Prozessen wie Schneelawinen, Rutschungen, Steinschlag, Murgängen, Hochwasser, meteorologische Gefahren, Waldbrand, Erdbeben und vulkanische Aktivität. Diese Auflistung zeigt die Vielzahl der Möglichkeiten dieser Wissenschaft auf.

Im Zentrum der Dendrogeomorphologie steht das „process-event-response“-Konzept nach Shroder (z.B. Shroder 1980). Frei interpretiert und übersetzt lässt sich dies derart beschreiben, dass ein Prozess durch ein Ereignis eine Reaktion in einem Baum auslöst (Abbildung 2).

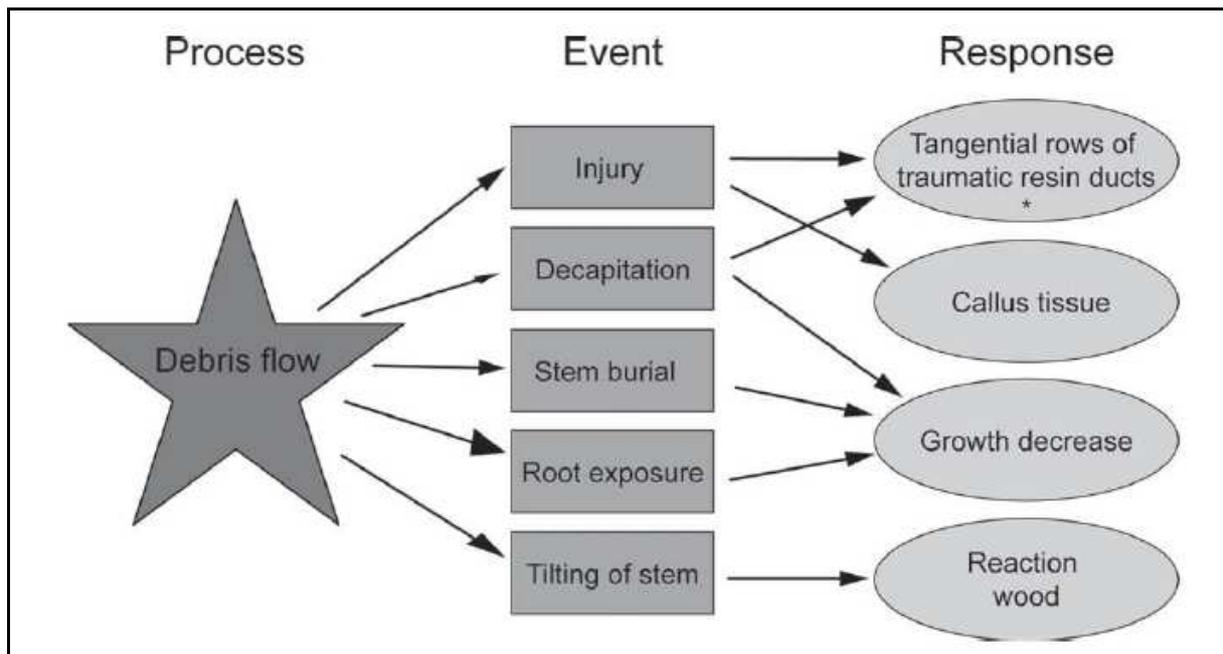


Abbildung 2: Process-event-response concept nach Shroder (1980) angepasst für Murgänge (aus Stoffel & Bollschweiler 2010)

Auf den konkreten Fall dieser Arbeit umgelegt, stellt die allgemeine Disposition eines alpinen Einzugsgebietes zur Fähigkeit Murgänge oder murgangähnliche Ereignisse zu bilden den „Prozess“ dar. Unter gewissen Umständen kommt es zur Auslösung eines „Ereignisses“, in diesem Fall eines Murganges im Einzugsgebiet. Das Ereignis kann dann Reaktionen von Bäumen bewirken, wenn diese davon beeinflusst wurden. Diese Reaktionen werden in den Jahrringen und auch im Wuchsbild eines Baumes festgehalten und so gespeichert. Solche Reaktionen werden in den Kapiteln 2.5.1 bis 2.5.5 beschrieben.

## 2.5 Möglichkeiten dendrogeomorphologischer Datierung von Murkegeln

Es existieren mehrere dendrogeomorphologische Arbeitsmethoden, die sich für eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse und Forschungsgebiete einsetzen lassen (Alestalo 1971, Shroder 1980). Es gibt nur wenige integrierende Publikationen, die sich mit der Anwendung dieser Methoden befassen. An einer Zusammenfassung und Beschreibung geeigneter Verfahren für dendrogeomorphologische Datierungen von Murkegeln hat sich Strunk (1995) versucht. Strunk bezieht sich bei seinen Ausführungen ausschließlich auf Untersuchungen an der Fichte (*Picea abies* L. Karst). Weiters seien hier Publikationen von Stoffel und Bollschweiler genannt, die intensiv die Möglichkeiten und Grenzen der dendrogeomorphologischen Datierung von Murablagerungen beleuchten (u.a. Bollschweiler et al. 2008, Stoffel et al. 2008).

### **2.5.1 Datierung mittels Zuwachsreaktionen**

Wie schon Alestalo in seinem Werk, in dem der Begriff „Dendrogeomorphologie“ erstmals verwendet wurde, erwähnte, kann die Verschüttung von Bäumen zu Zuwachsreaktionen führen, im Regelfall handele es sich dabei um Zuwachseinbrüche. Hier bezieht man sich ausschließlich auf das Dickenwachstum, somit entspricht ein Zuwachseinbruch einer Reduktion der Jahrringbreite (Alestalo 1971). Zum einen ist dies durch eine Beeinträchtigung der Funktion des Wurzelsystems bedingt, aber auch durch den Druck des dichtgelagerten Schuttes auf den Stammfuß. Durch die Datierung derartiger Zuwachseinbrüche kann der Zeitpunkt von Murgängen bestimmt werden (Strunk 1995).

Als Folge einer Verschüttung kann es unter Umständen auch zu einem Zuwachsschub kommen, also der Bildung breiterer Jahrringe. Strunk (1995) versucht dies durch eine Ausschaltung von Konkurrenz oder verbesserte Nährstoffversorgung zu erklären. Die geringmächtige Verschüttung von Böden, die meist nur schlecht mit Nährstoffen versorgt sind, durch eher feines Murgangmaterial, kann eine Abpufferung der sonst eher sauren Verhältnisse bewirken. In weiterer Folge kann so eine Mobilisierung und Mineralisierung des Rohhumus geschehen (Strunk 1995).

Anfangs wurden hauptsächlich Zuwachseinbrüche für die Datierung verwendet, da diese im Allgemeinen verlässlichere Indikatoren als Zuwachsschübe sind (Strunk 1995). In den letzten Jahren wurde vermehrt auch der Zuwachsschub als Indikator für geomorphologische Ereignisse erkannt und verwendet (Stoffel 2005, Mayer et al. 2010, Arbellay et al. 2010).

Solche Zuwachsreaktionen können aber auch durch andere Faktoren verursacht werden. Klimatologische, pathologische Faktoren sowie anthropogen bedingter Einfluss können ebenfalls Schwankungen des Dickenwachstums bewirken. Daher empfiehlt sich ein Vergleich des gestörten, vom jeweiligen Prozessgeschehen beeinflussten Bestandes mit einem Referenzbestand, der nicht durch den Prozess beeinflusst wurde. Dieser sollte sich in unmittelbarer Nachbarschaft auf möglichst derselben Seehöhe zum gestörten Bestand befinden und aus Bäumen der gleichen Baumart bestehen (Stoffel & Bollschweiler 2008).

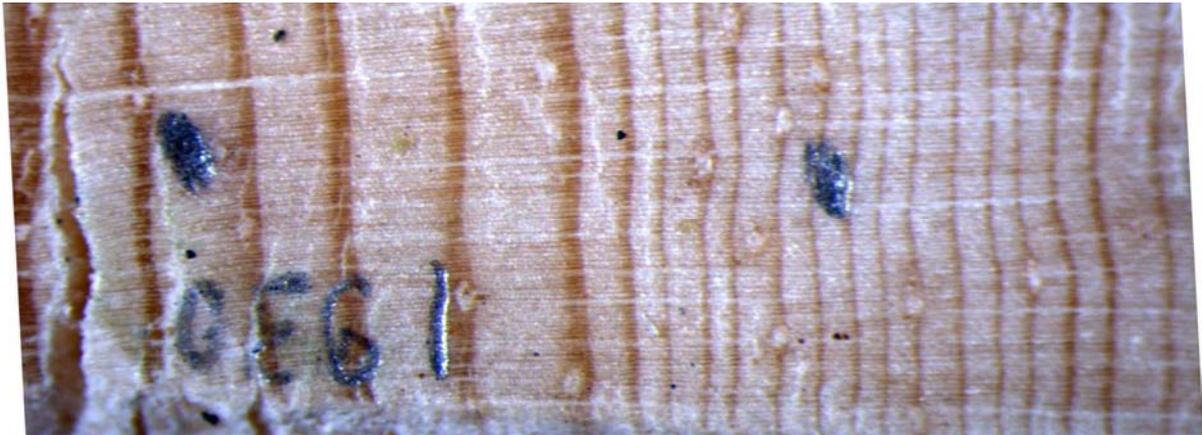
Es ergeben sich gewisse Unsicherheiten in der Datierung, da die Zuwachsreaktion meist etwas verzögert einsetzt. In den Untersuchungen von Strunk (1995) belief sich diese zeitliche Verzögerung auf 1-3 Jahre mit einem arithmetischen Mittel von 1,4 Jahren. Strunk bezieht sich hier nur auf den Zuwachseinbruch.

Trotz dieser Einschränkungen und Fehlerquellen ist die Datierung mit Hilfe von Zuwachsreaktionen eine relativ genaue Methode. Ein Vorteil ist auch der geringe

Zeitaufwand der Probennahme und der Umstand, dass für die Beprobung nur ein oder zwei Bohrkern entnommen werden müssen und der Baum nicht gefällt werden muss.

Diese Vorteile haben wohl dazugeführt, dass diese Methode in der Vergangenheit häufig und erfolgreich angewendet wurde.

Darstellungen von Zuwachsreaktionen finden sich in Abbildung 3. Die dargestellten Bohrproben wurden für diese Arbeit verwendet.



**Abbildung 3: Bilder von Bohrproben mit Zuwachsreaktionen, oben Zuwachseinbruch, unten Zuwachsschub mit gleichzeitiger Druckholzbildung**

### **2.5.2 Altersbestimmung mittels Stammverletzungen**

Diese Methode basiert darauf, dass Murgänge das Kambium eines Baumes beschädigen und verletzen können. Dies geschieht in der Regel an der bergauf weisenden Seite des Stammes in Bodennähe. Große durch den Murgang transportierte Steine können bei einem Aufprall Verwundungen aufgrund ihrer kinetischen Energie bewirken. Auch feineres Material kann Verletzungen verursachen, vor allem bei hohen Geschwindigkeiten des Gemisches durch die hohe erosive Wirkung (ähnlich Schleifpapier) auf den Stamm. Der Baum reagiert auf lokales Absterben des Kambiums mit der Ausbildung von Überwallungsgewebe, bis die Wunde wieder verschlossen ist. Die Stabilität des Baumes wird dadurch wiederhergestellt und der

Baum ist geschützt vor Schädlings- und Pilzbefall. Durch das Zählen der vorhandenen Jahrringe des Überwallungsgewebes kann die Schädigung datiert werden. Diese Methode kann hoch präzise sein mit einer Genauigkeit von einem Jahr und ermöglicht unter Umständen sogar eine Datierung der Jahreszeit der Schädigung. Die positiven Eigenschaften dieser Methode für die Rekonstruktion von Murgängen ist durch zahlreiche Studien und Untersuchungen belegt (u.a. Strunk 1995, Stoffel et al. 2008, Sorg et al. 2010).

Allerdings hat diese Methode auch Probleme und Einschränkungen. Wird ein Baum stark geschädigt, kann es zum Aussetzen der kambialen Aktivität kommen. Das Kambium ist dann inaktiv und die Jahrringbildung setzt oft für mehrere Jahre aus, so genannte „fehlende Jahrringe“. Es kann auch zur Bildung von unterbrochenen „auskeilenden Jahrringen“ kommen, in diesem Fall ist das Kambium nur an manchen Stellen inaktiv. Dies kann zu Fehlern bei der Datierung führen. Durch den Vergleich der Messkurve der Jahrringbreite eines verletzten Baumes mit einer Referenzkurve können fehlende Jahrringe erkannt werden (Schweingruber 1983).

Die Einwirkung des jeweiligen Prozesses muss jedenfalls ausreichend sein, um das Kambium des Baumes zu schädigen. Kommt es zu keiner Schädigung des Baumes, entsteht keine Wunde und Überwallungsgewebe. So ist diese Methode für Prozesse, die eher sanft mit betroffenen Bäumen umgehen, nicht geeignet (Strunk 1995).

Kam es in der Vergangenheit zu mehreren Murgangereignissen, die Verletzungen verursacht haben, kann eine korrekte Zuordnung von Stammwunden zu diesen Ereignissen schwierig sein. Dies ist in der Rheologie mancher Murgänge begründet. Die feinkörnige, aber hoch dichte Sediment-Wasser-Suspension eines Murganges vermag selbst große Blöcke in Schwebe zu halten und über weite Strecken zu transportieren (vgl. auch Takahashi 1981). Die Höhendifferenz zwischen einer Stammverletzung und der Oberfläche der Ablagerung des Murgangmaterials kann 0,7 – 1,1 m betragen (Strunk, 1995). Dies ist aber nur dann ein Problem, wenn Stammverletzungen einzelnen Ablagerungen zugeordnet werden sollen.

Stammschäden können auch durch Wild, Steinschlag, Lawinen oder Waldbewirtschaftung verursacht werden. Darum empfiehlt sich die Kombination mit anderen Datierungsmethoden.

Ein Beispiel eines wahrscheinlich durch einen Murgang verletzten Baumes ist in Abbildung 4 gegeben. Dieser Baum wurde für diese Arbeit beprobt.



**Abbildung 4:** links durch Murgang beschädigter Baum, dem Überwallungsgewebe wurde ein Keil entnommen, rechts Aufnahme der geschliffenen Probe mit Verletzung und Überwallungsgewebe

### **2.5.3 Altersbestimmung mittels traumatischer Harzkanalreihen**

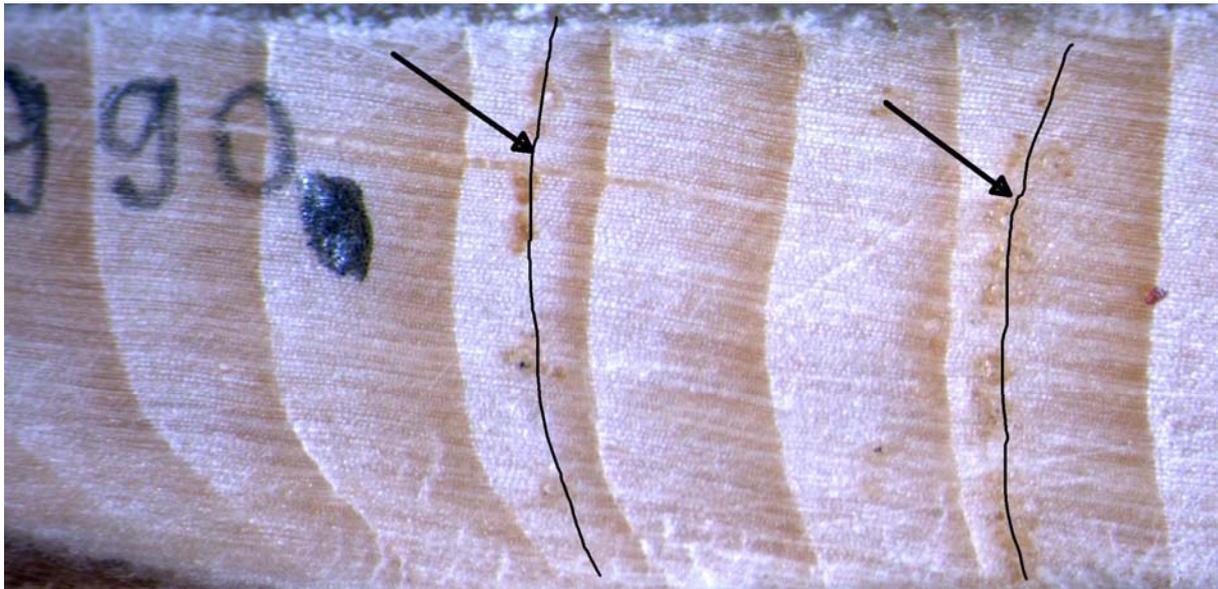
Verletzungen des Kambiums bewirken bei manchen Baumarten die Bildung so genannter traumatischer Harzkanalreihen (engl. „Traumatic resin ducts“ oder kurz TRD). Von den in Mitteleuropa häufigen Baumarten sind das vor allem Fichte, Weißtanne und Lärche (Bannan 1936, Nagy et al. 2000, Bollschweiler et al. 2008). Diese Harzkanalreihen erscheinen bei einem horizontalen Querschnitt durch die Gefäße eines Baumes als tangential aneinander gereihte Ringe, während normale Harzkanäle verstreut liegen. TRD werden nahe der Verwundung von der Pflanze bereits kurz nach der Einwirkung und Verletzung gebildet. Wird der Baum während der Wachstumsperiode getroffen, so ermöglichen sie eine sehr genaue Datierung von Ereignissen. Die Bildung von TRD setzt allerdings umso später ein, je weiter man von der Stelle der Verwundung entfernt die Probe entnimmt, was zu Ungenauigkeiten in der zeitlichen Datierung führen kann. Im besten Fall bei einer ausreichend großen Anzahl an Stichproben ist eine Genauigkeit der Datierung von Wochen bis Monaten möglich (z.B. Stoffel 2008).

Allerdings ist das bloße Vorhandensein von Harzkanälen nicht gleich ein sicheres Indiz auf eine Verwundung des Baumes. Physiologischer Stress kann beispielsweise auch zur Bildung

solcher Harzkanäle führen, manche Baumarten neigen hingegen selbst bei guter Vitalität zur Bildung von Harzkanälen (Schweingruber 2001).

Wie bereits erwähnt, bilden nicht alle Baumarten traumatische Harzkanalreihen nach einer Verwundung aus. Arten der Gattung *Pinus* etwa bilden zwar generell Harzkanäle, allerdings nicht als Folge auf eine Verwundung (Philips & Crouteau 1999).

In Abbildung 5 ist eine Bohrprobe einer Fichte mit traumatischen Harzkanalreihen dargestellt, die für diese Arbeit analysiert wurde.



**Abbildung 5: Aufnahme einer Bohrprobe mit zwei Reihen traumatischer Harzkanäle**

### **2.5.4 Datierung mittels Reaktionsholz**

Ein geomorphologischer Prozess kann die Schiefstellung eines Baumes bewirken. Auf eine Gleichgewichtstörung reagiert der Baum mit der Bildung von Reaktionsholz. Diese hält so lange an, bis das Gleichgewicht des Baumes wieder hergestellt ist. Bei Nadelbäumen kommt es vorwiegend zur Bildung von Druckholz. Dieses wird an jener Seite des Stammes gebildet, die auf Druck belastet wird. Es kommt auch meist zu exzentrischem Wuchs, wobei auf der druckbelasteten Seite mehr Zellreihen gebildet werden. Typische Druckholzzellen haben verdickte Zellwände und erscheinen im Querschnitt braun (siehe auch Schweingruber 2001).

Der Beginn der Bildung von Druckholz und des exzentrischen Wachses kann für die Datierung des Ereignisses verwendet werden, welches die Störung des Gleichgewichtes verursacht hat. Diese Methode hat sich bei der Datierung von Massenbewegungsprozessen wie Murgängen (u.a. Stoffel et al. 2008, Mayer et al. 2010), Rutschungen (Braam 1987) oder Steinschlag (z.B. Schneuwly 2009) als geeignet erwiesen und bewährt.

Für die Datierung von Murgängen ergeben sich aber Bedenken für die Verwendung von Druckholzansatz. Murgangssuspensionen üben auf Hindernisse in deren Ablagerungsgebiet oft nur wenig Druck aus und betten diese vielmehr sanft in ihre Ablagerungen ein, wodurch es zu keiner Schiefstellung kommt. Andere Prozesse wie Schneedruck auf den Stammfuß, Windeinfluss oder Instabilität des Wurzelsystems können auch Druckholzbildung bewirken (Strunk 1995). Auch Schneelawinen können eine Schiefstellung von überlebenden Bäumen und Druckholzbildung bewirken (Bartelt & Stöckli 2001).

Wie in Kapitel 2.5.2 für Stammverletzungen empfiehlt sich auch bei der Verwendung von Druckholzbildung für die Rekonstruktion von Murgängen die Kombination mit anderen Methoden wie etwa Zuwachsreaktionen.

Beispiele von Bäumen mit Druckholzbildung sind in Abbildung 6 gegeben. Druckholzansatz in einer Bohrprobe ist in Abbildung 3 unten zu sehen.



**Abbildung 6:** links schief gestellter Baum, rechts Baum mit aufgebogenem Ast, der nun den Wipfel bildet

### **2.5.5 Datierung mittels Adventivwurzeln**

Bäume reagieren oft auf die Verschüttung ihrer Stämme mit der Bildung von sekundären Adventivwurzeln. Diese Eigenschaft ist vor allem von Laubbäumen bekannt, aber auch einige Nadelbaumarten besitzen diese Fähigkeit. So sollen etwa Lärche und Fichte starke Adventivwurzelnbildner sein, während Schwarzkiefern nur eine schwache

Adventivwurzelbildung aufweisen. Diese Wurzeln können aus Proventivknospen, (sogenannten schlafenden Augen) an verschütteten Pflanzenteilen oder an den Kallusrändern einer Verletzung gebildet werden (Strunk 1995).

Zusätzlich zur Bildung von Adventivwurzelhorizonten kann es zur Bildung negativ geotropischer Wurzeln aus dem Primärwurzelwerk oder einem anderen Adventivwurzelhorizont kommen. Diese Wurzeln wachsen entgegen der Schwerkraft in die Verschüttung hinein (Schweingruber 1983).

Als Ursache für dieses Wachstum wird das geringere Sauerstoffangebot der Bodenluft im Vergleich zur atmosphärischen Luft in Betracht gezogen. So soll der behinderte Austausch von Sauerstoff und Kohlendioxid das Wachstum von Adventivwurzeln fördern (Strunk 1995).

Die Altersbestimmung solcher Wurzeln kann für die Datierung von Murgängen verwendet werden. Die Altersbestimmung einer Wurzel ist aber anspruchsvoll und zeitaufwendig. Vor allem die Präparation der Probe erfordert viel Fingerspitzengefühl und Erfahrung. Um überhaupt Proben von Adventivwurzeln zu erhalten, muss der verschüttete Stamm teilweise ausgegraben werden (Strunk 1995).

### **2.5.6 Altersbestimmung auf Basis des Alters aufwachsender Bäume**

Das Alter von Ablagerungen kann auch mit Hilfe des Alters der aufwachsenden Vegetation bestimmt werden. Die Sukzessionsgeschwindigkeit, die Geschwindigkeit der Besiedlung eines neuen Habitats durch Pflanzen, hängt von zahlreichen Faktoren ab, wie etwa den klimatischen Bedingungen, der Baumart, Höhenlage, Hangneigung, Exposition und Hauptwindrichtung, sowie der Existenz eines geeigneten Saatbettes als auch der Verfügbarkeit von fruchtbaren Samen.

Ein Vergleich der Ergebnisse mehrerer Studien in Strunk (1995) zeigt, dass die Zeitspanne zwischen Sedimentablagerung und der Keimung erster Baumsamen zwischen 1 und 75 Jahren variiert, je nach Untersuchungsgebiet und den lokalen Bedingungen. Auf Karbonat-Standorten soll das Vorhandensein von Samenbäumen eine größere Rolle spielen als Faktoren wie Substrat oder Nährstoffversorgung. Auf grobem, feinmaterial- und nährstoffarmem Dolomit-Murschutt soll eine Keimung von Baumsamen nach durchschnittlich 8 Jahren erfolgen, falls geeignete Samenbäume nicht weiter als 30 m entfernt waren (Strunk 1995).

Durch eine sorgfältige Bestimmung des Alters aufwachsender Bäume auf Murablagerungen kann zumindest deren minimales Alter abgeschätzt werden (Bollschweiler et al. 2008a).

### **2.5.7 Dendrogeomorphologie und Murgänge - state of the art**

Die Möglichkeiten mit dendrochronologischen Methoden Informationen über diverse geomorphische Prozesse zu gewinnen, haben zahlreiche Forscher und Forscherinnen zu Forschungsarbeiten zu diesem Thema veranlasst. Für den Prozess Murgang haben sich in den letzten Jahren neben der ausschließlichen Datierung von Ereignissen in der Vergangenheit auch andere spezifischere Forschungsgebiete entwickelt.

Die Rekonstruktion der räumlichen Verteilung von abgelagertem Murgangmaterial erlaubt eine Abschätzung des Volumens vergangener Ereignisse. Informationen über Zeitpunkt und Volumen von Ereignissen ermöglichen die Aufstellung von „Frequency-magnitude“-Beziehungen, also den Zusammenhang zwischen Ereigniswahrscheinlichkeit und Ereignisgröße. Diese können eine wichtige Grundlage für Risikoanalyse eines betroffenen Gebietes bilden. Für den Ablagerungskegel des „Ritigrabens“, Schweiz, konnte auf Basis dendrogeomorphologischer Analysen und der terrestrischen Vermessung von Ablagerungsformen das Ereignisvolumen und der Ereigniszeitpunkt von 62 Murgängen in den letzten 150 Jahren bestimmt werden (Stoffel 2010).

Für die Datierung dieser Ereignisse wurden Bäume der Arten *Pices abies*, *Larix decidua* und *Pinus cembra* mit Zuwachsbohrer beprobt. Die Datierung wurde mittels Wachstumsreaktionen wie Verwundungen, traumatischen Harzkanäle, Druckholzansatz oder abrupte Zuwachsänderungen vorgenommen (Stoffel 2010).

Für die Rekonstruktion der Murgangaktivität des „Große Grabe“ im Kanton Valais in der Schweiz wurde neben den eben erwähnten Wachstumsreaktionen auch das Alter von Bäumen verwendet. Durch das Zählen der Jahrringe von Bohrproben und der Anwendung von Korrekturfaktoren konnte ein Schätzwert für das Alter der beprobten Bäume gewonnen werden. So konnte für bestimmte Bereiche des Ablagerungsgebietes der Zeitpunkt der letzten Aktivität und so das minimale Alter der lokalen Ablagerungen abgeschätzt werden. Auch hier wurde die dendrogeomorphologische Arbeit mit der Aufnahme und Kartierung geomorphischer Merkmale des Ablagerungsgebietes ergänzt (Bollschweiler et al. 2008a).

Mittels dendrogeomorphologischer Methoden ist unter Umständen eine sehr genaue Datierung einzelner Ereignisse möglich. Wachstumsreaktionen wie Verwundungen oder traumatische Harzkanäle ermöglichen eine saisonale Datierung von Ereignissen. Voraussetzung ist in diesem Fall eine große Anzahl an Stichproben, die derartige Wachstumsreaktionen zeigen (Stoffel et al. 2006, Stoffel 2008).

Die zeitliche Genauigkeit von Datierungen mit Hilfe traumatischer Harzkanäle und Verwundungen kann mit 1-2 Wochen sehr hoch sein, sofern diese Ereignisse sich in der Vegetationsperiode ereignet haben. Für eine derart genaue Datierung, die über eine bloße Bestimmung der Jahreszeit hinausgeht, sind allerdings intensivere Untersuchungen und Messungen des Zuwachses erforderlich sowie ausreichend Proben mit diesen Wachstumsreaktionen (Kaczka & Morin 2006, Stoffel et al. 2010).

Ein weiterer Aspekt aktueller Forschung ist die Identifizierung von meteorologischen Bedingungen, die zu der Auslösung von Murgangereignissen geführt haben. Sind genaue zeitliche Datierungen von Murgangereignissen eines Einzugsgebietes sowie Niederschlagsmessdaten einer oder mehrerer nahe gelegener Messstationen verfügbar, so können einzelnen Murgangereignisse Niederschlagsereignisse zugeordnet werden. So können Informationen über die meteorologischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Auslösung eines Murgangereignisses gewonnen werden.

Bei einer Fallstudie für den Meretschibach im Kanton Valais in der Schweiz wurde ebenfalls mit Hilfe dendrogeomorphologischer Methoden eine Rekonstruktion der Murgangaktivität unternommen. Die beprobten Bäume waren hauptsächlich Fichten sowie einige andere Laub- und Nadelbaumarten wie etwa *Alnus incana* (Grauerle) oder *Betula pubescens* (Hängebirke). Es konnten 20 Ereignisjahre im Zeitraum 1930 bis 2008 identifiziert werden. Die Datierung erfolgte mittels Wachstumsreaktionen wie Verwundungen, traumatischen Harzkanäle, Druckholzansatz oder abrupte Zuwachsänderungen vorgenommen. Daten von nahe gelegenen Niederschlagsmessstationen wurden dann verwendet um ereignisauslösende Niederschläge zu identifizieren. In dieser Arbeit wurden Niederschlagsdaten mit stündlicher Auflösung (nur für 1981 bis 2008) sowie Tagesniederschlagssummen verwendet. Grenzwerte für die Identifizierung auslösender Niederschlagsereignisse für Murgänge waren eine Tagessumme des Niederschlags von min. 20 mm sowie eine Niederschlagsintensität von min. 5 mm/h. Mit diesen Grenzwerten und den Niederschlagsdaten konnten für die meisten Ereignisjahre Niederschlagsereignisse gefunden werden, die wahrscheinlich zur Auslösung des jeweiligen Murgangereignisses geführt haben. Allerdings war dies nicht für alle Ereignisjahre möglich. Für 4 der rekonstruierten Ereignisjahre konnten in den Niederschlagsdaten keine Tage oder Perioden gefunden werden, in denen die oben genannten Grenzwerte erreicht wurden (Szymczak et al. 2010).

Eine Fallstudie des Gratzentalbaches im Bundesland Tirol ist die aktuellste dendrogeomorphologische Arbeit in Österreich mit Fokus auf Rekonstruktion der

Murgangaktivität. Bei dieser Arbeit wurden größtenteils Fichten beprobt. Mit insgesamt 227 Probestämmen konnten 37 Ereignisjahre identifiziert werden. Die verwendeten Wachstumsreaktionen waren traumatische Harzkanäle, abrupte Zuwachsänderungen, Druckholz und Verletzungen, wobei Druckholz und Verletzungen mit 6 bzw. 1 % Anteil eher selten war. Für die meisten Ereignisse konnte auch eine Rekonstruktion der räumlichen Ausbreitung der jeweiligen Murgänge unternommen werden. Bei dieser Arbeit wurde von den Autoren der von Shroder (1978) vorgeschlagene Indexwert *It* als Grenzwert für die Identifizierung von Ereignisjahren angewandt und weiterentwickelt. So mussten in dieser Arbeit min. 4 % der Bäume im Untersuchungsgebiet Wachstumsreaktionen in zeitlichem Zusammenhang mit einem Ereignisjahr zeigen, um dieses Ereignisjahr mit ausreichender Sicherheit belegen zu können (Mayer et al. 2010).

Die bei der vorliegenden Arbeit hauptsächlich verwendete Art *Pinus mugo ssp. uncinata* (Spirke oder Hakenkiefer) wurde bereits mehrfach bei dendroklimatologischen und standortkundliche Untersuchungen verwendet (Brang 1989, Rolland & Schueller 1996, Camerero et al. 1998, Neuwirth & Rolland 1996), während diese Art für dendrogeomorphologische Fragestellungen noch kaum verwendet wurde.

Eine dendrogeomorphologische Studie in den spanischen Pyrenäen hat sich mit der Art *Pinus mugo ssp. uncinata* beschäftigt. Für das Untersuchungsgebiet „Canal del Roc Roig“ wurde die Lawinenaktivität der Vergangenheit untersucht. 132 Exemplare der Art *Pinus mugo ssp. uncinata* wurden beprobt. Für die Identifizierung von Ereignissen wurden die Wachstumsreaktionen Verletzung, Absterben, Druckholzansatz, Zuwachseinbruch und Zuwachsschub verwendet. Die Studie weist daraufhin, dass diese Art für dendrogeomorphologische Arbeiten geeignet ist (Muntan et al. 2004).

Allerdings können diese Ergebnisse nicht vorbehaltlos auf die Rekonstruktion von Murgangaktivität umgelegt werden. Eine große Lawine hat wahrscheinlich eine andere Wirkung auf Bäume in ihrem Einzugsgebiet als die Ablagerungen eines Murganges.

### 3. Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit ist die „Bärenrufe“. Es handelt sich hier um einen großen Ablagerungskegel, der in Chroniken und historischen Karten als „Bärenrufe“, „Bärenwiese“ oder „Bärenwald“ bezeichnet wird. Dieser befindet sich im Gamperdonatal im Bundesland Vorarlberg, Österreich (siehe Abbildung 7). Das Gamperdonatal wird vom Fluss Meng vom Süden kommend in Nordrichtung durchflossen. Orographisch rechts der Meng liegt die Bärenrufe (siehe auch Abbildung 8). Die Meng ist ein linksseitiger Zubringer des Flusses Ill ist. Die Ill mündet 15 km nach der Vereinigung mit der Meng bei Rüthi in den Rhein. Der Rhein ist in diesem Gebiet der Grenzfluss zwischen Österreich und der Schweiz. Das Einzugsgebiet der Meng hat eine Fläche von etwa 68 km<sup>2</sup> und erstreckt sich über eine Länge von etwa 15 km.

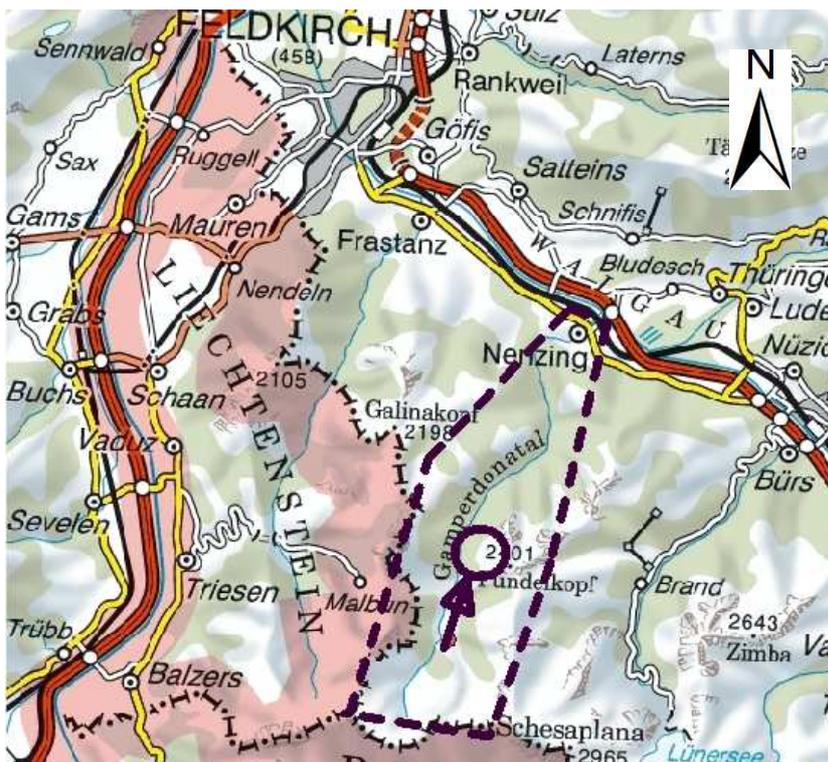


Abbildung 7: Übersichtskarte, Gamperdonatal und das Einzugsgebiet der Meng strichliert umrandet, Lage des Untersuchungsgebiet eingekreist mit Pfeil (Kartenausschnitt ÖK500, Quelle: BEV, Wien)

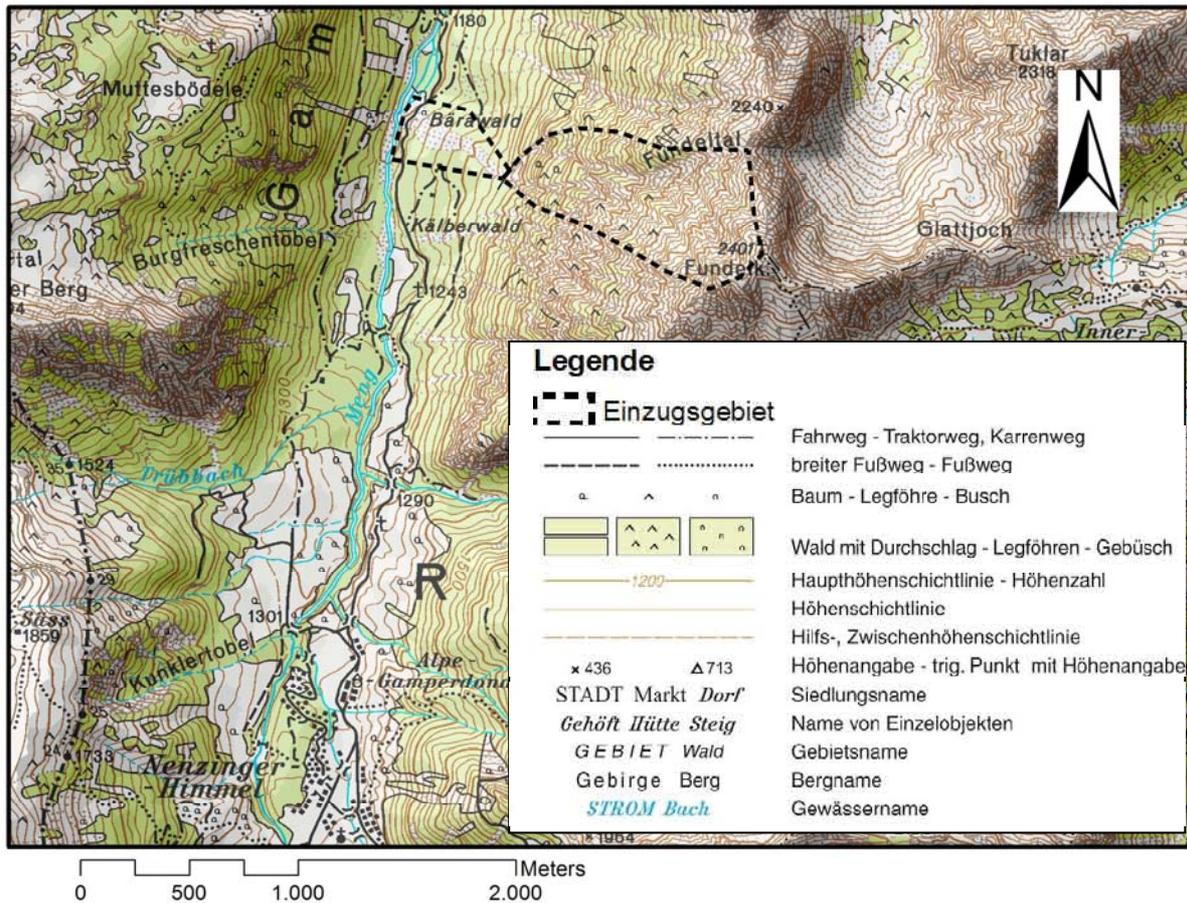


Abbildung 8: Detailkarte, Untersuchungsgebiet Bärenrufe orographisch rechts der Meng, Siedlung Nenzinger Himmel im Süden (Kartenausschnitt ÖK50, Quelle: BEV, Wien)

Die Bärenrufe befindet sich im Gamperdonatal orographisch rechts der Meng. Folgt man der Mautstraße von der Gemeinde Nenzing kommend in südlicher Richtung, so passiert man etwa nach 8 km das große Ablagerungsgebiet der Bärenrufe. Die Straße führt weiter zur Alpsiedlung Nenzinger Himmel, der einzigen Siedlung im Gamperdonatal. Diese besteht größtenteils aus saisonal bewohnten Hütten, weiters gibt es ein Hotel, ein Restaurant sowie ein Geschäft. Die Wiesen und Almen im Gamperdonatal werden für die Erzeugung von Milch und Käse bewirtschaftet.

### 3.1 Geologie und Geomorphologie

Das Grundgestein im Gamperdonatal besteht hauptsächlich aus Hautdolomit und Plattenkalk. Im Süden finden sich eingesprengt mehrere kleinere Gebiete mit meist karbonatischem Mischgestein wie Mergel, Kalkschiefer, Tonschiefer, Gips oder Sandstein, während in nördlicher Richtung das karbonatische Grundgestein von Flysch-ähnlichen Sedimenten abgelöst wird (siehe Abbildung 9).

Im Untersuchungsgebiet ist das Grundgestein allerdings überwiegend Kalk bzw. Dolomit.

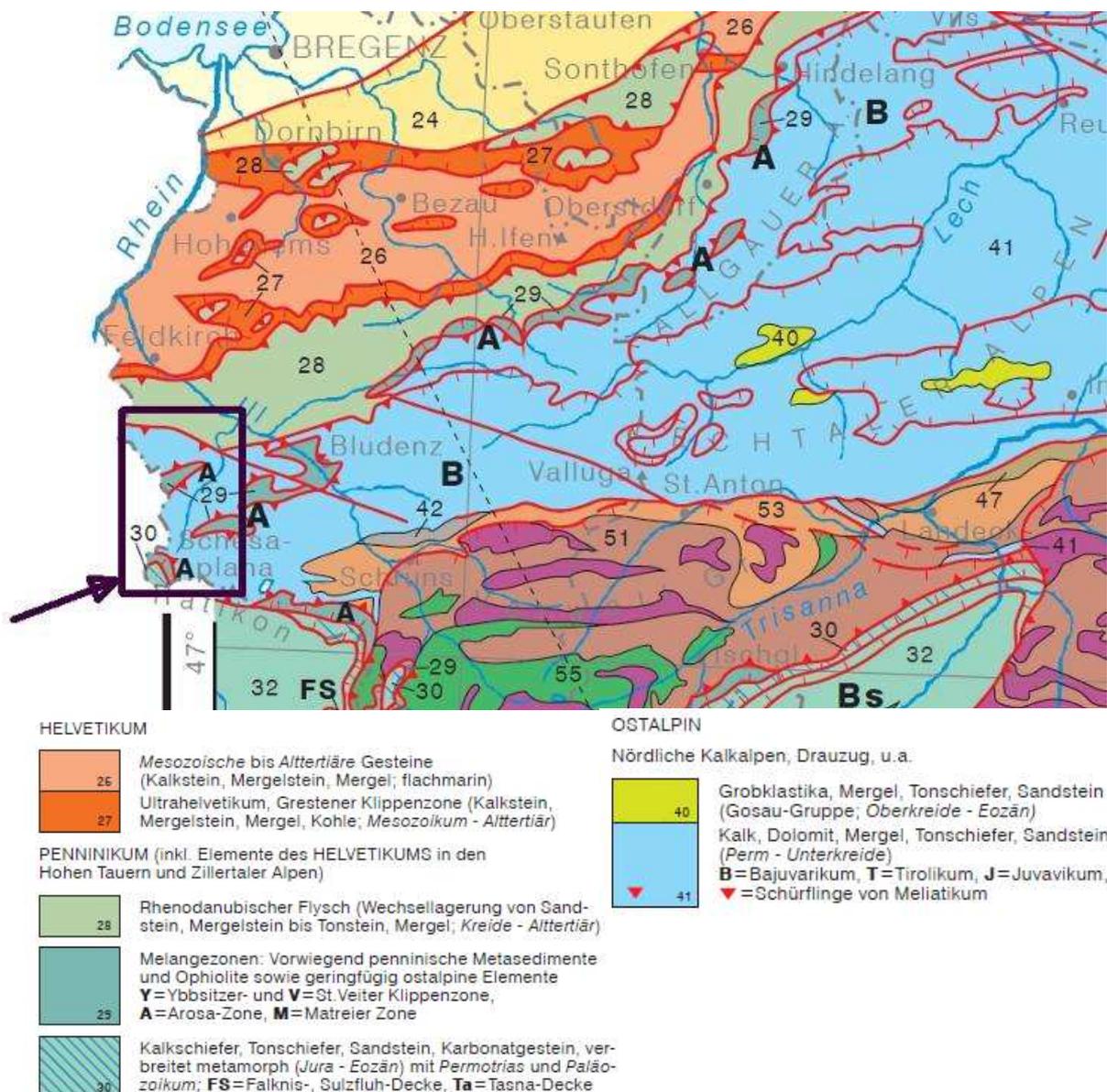


Abbildung 9: Ausschnitt Geologische Karte Vorarlbergs, Gamperdonatal umrahmt mit Pfeil, Ausschnitt aus Legende (Quelle: Geologische Bundesanstalt, Wien)

Das Gamperdonatal war während der letzten Eiszeiten des Quartärs vom Illgletscher beeinflusst. In Perioden starker Vergletscherung soll es auch selbst von einem Seitenarm dieses Gletschers bedeckt gewesen sein (de Graaf 1996).

Die Talverfüllung des Gamperdonatals besteht aus fluvialen Sedimenten, die das Bett des Mengflusses bilden. Der Fluss nimmt je nach Längsneigung unterschiedliche Formen an. Im Oberlauf, bei Steilstufen, hat er eher einen gestreckten Verlauf (Abbildung 10). Im Mittellauf, bei geringerer Neigung verzweigt sich der Fluss in mehrere wasserführende Arme (Abbildung 11). Eine Beschreibung dieser Flusstypen findet sich etwa in Summerfield (1991).



**Abbildung 10: Die Meng nahe der Siedlung Nenzinger Himmel, zu beachten sind u.a. gestreckter Verlauf und Geschiebeablagerungen, Aufnahme in Fließrichtung**



**Abbildung 11: Der Mittellauf der Meng, zu beachten sind u.a. der verzweigte Charakter sowie Ablagerungskegel seitlicher Zubringer, Aufnahme vom Gegenhang, Fließrichtung von rechts nach links**

Es gibt zahlreiche Zubringer links und rechts der Meng, die sowohl zum Abfluss als auch zum Sedimentpotential des Flusses beitragen (vergleiche Abbildung 8 und 11).

Die Bärenrufe ist einer dieser seitlichen Zubringer. Unterhalb des Fundelkopfs gelegen, präsentiert sie sich als großer Ablagerungskegel, die von mehreren Gräben gespeist wird. Der markanteste entspringt dem Fundeltal, einem hochgelegenen Kar nordwestlich des Gipfelaufbaus des Fundelkopfs (siehe Abbildung 8 und 12).



**Abbildung 12: Oberes Einzugsgebiet der Bärenröfe, durch zahlreiche Gräben geprägt wird, Fundeltal und Gipfel des Fundelkopfes mit Pfeilen markiert**

Wie in Kapitel 2.1.1 bereits erwähnt gibt es verschiedene Typen gerinne-basierter geomorphischer Prozesse, die man grob in feststoffgesteuert (Murgang) und flüssigkeitsgesteuert (fluvialer Abfluss) unterscheiden kann. Weiters wird ein intermediärer Prozesstyp unterschieden, der eine Übergangsform zwischen dem rein feststoff- und rein flüssigkeitsgesteuerten Prozesstyp bildet, der hyperkonzentrierte oder murgangähnliche Abfluss (Blair et al. 1994, Hungr 2001).

Parameter errechnet aus der Topographie des Einzugsgebietes wurden in der Vergangenheit häufig verwendet, um Informationen über den vorherrschenden Prozesstyp eines Ablagerungskegels zu erhalten (Melton 1965, Wilford et al. 2004, Welsh & Davies 2010). Das Melton-Verhältnis ist eine Verhältniszahl zwischen Höhendifferenz und der Quadratwurzel der Grundfläche eines Einzugsgebietes. Das Reliefverhältnis, ein weiterer Einzugsgebietsparameter, ist das Verhältnis zwischen Höhendifferenz und Gerinnelänge eines Einzugsgebietes.

Die für die Berechnung dieser Kennwerte und Erstellung der Graphiken erforderlichen Daten wurden einem digitalen Höhenmodell des Gebietes entnommen.

## Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Ein Vergleich der errechneten Werte (siehe Abbildung 13) mit Werten aus der Literatur lässt vermuten, dass Murgangaktivität der vorherrschende Prozessstyp ist (Wilford et al. 2004) und es sich somit um einen Murkegel handelt.

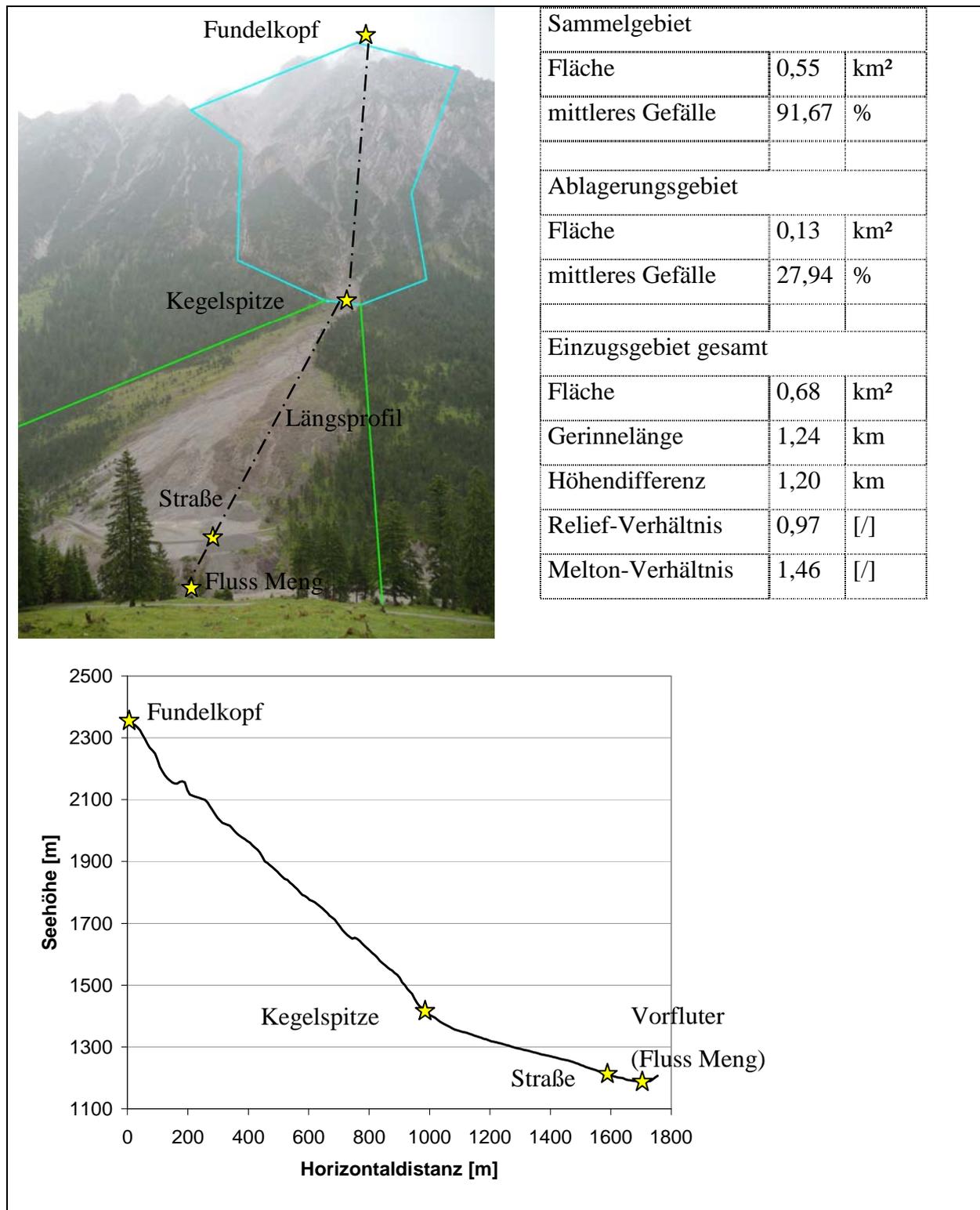
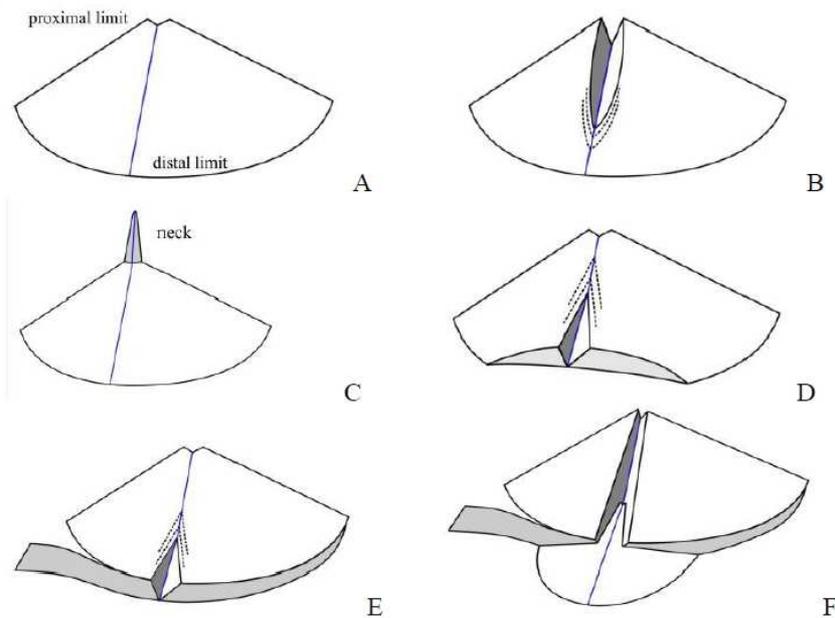


Abbildung 13: oben links Einzugsgebiet der Bärenrufe (Bild aufgenommen vom Gegenhang), oben rechts Tabelle mit Kennwerten des Einzugsgebietes, unten Längsprofil des Einzugsgebietes, wichtige Punkte markiert und beschriftet

Vom Beginn des Kegels bis etwa zur Mitte der Ablagerungen erstreckt sich ein auffälliger Graben, der im oberen Bereich im Mittel 10-15 m tief (Abbildung 15 und 16). Mit diesem Merkmal zeigt der Kegel Charakteristiken eines Kegels des Typs B (siehe Abbildung 14).

Dieser Kegeltyp befindet sich nicht mehr im Gleichgewichtszustand von Sedimentinput und – output, vielmehr kommt es zu einer abwärts schreitenden Erosion der Ablagerungen kommen, bedingt durch Änderungen im Einzugsgebiet (Hübl 2008).



**Abbildung 14: verschiedene Stadien der Entwicklung eines Ablagerungskegels: A. Kegel in dynamischen Gleichgewicht, B. abwärts-schreitende Erosion aufgrund Änderungen im Einzugsgebiet, C. Ablagerungen an der Kegelspitze aufgrund erhöhtem Sedimentinput, D. aufwärts-schreitende Erosion aufgrund seitlicher Prozessänderungen am unteren Kegelrand, E. aufwärts-schreitende Erosion aufgrund Änderungen der Höhenlage am unteren Kegelrand, F. Typ E mit zusätzlicher Ausbildung eines Sekundärkegels (Quelle: Hübl, 2008)**

Ein Vergleich von Längsprofilen der Erosionsrinne und der Kegeloberfläche ist in Abbildung 15 dargestellt. Bis etwa 1270 hm liegt die Rinne tiefer als die angrenzenden Ablagerungen. Im Bereich um 1270 hm gibt es keinen Höhenunterschied von Erosionsrinne und der Kegeloberfläche. Hier liegt der so genannte „fan intersection point“ (Blair et al. 1994). Dieser Begriff kann mit Verschneidungspunkt übersetzt werden (siehe auch Abbildung 22).

Weiter unterhalb liegt dann das Profil der Erosionsrinne höher oder gleich hoch wie die angrenzenden Ablagerungen. Auch das Foto in Abbildung 15 zeigt, dass ab dem Verschneidungspunkt die Kegeloberfläche aufgewölbt erscheint. Material, das oberhalb des Verschneidungspunkt abgetragen wurde, wurde im unteren Bereich abgelagert und bewirkt hier eine Aufwölbung der Kegeloberfläche.

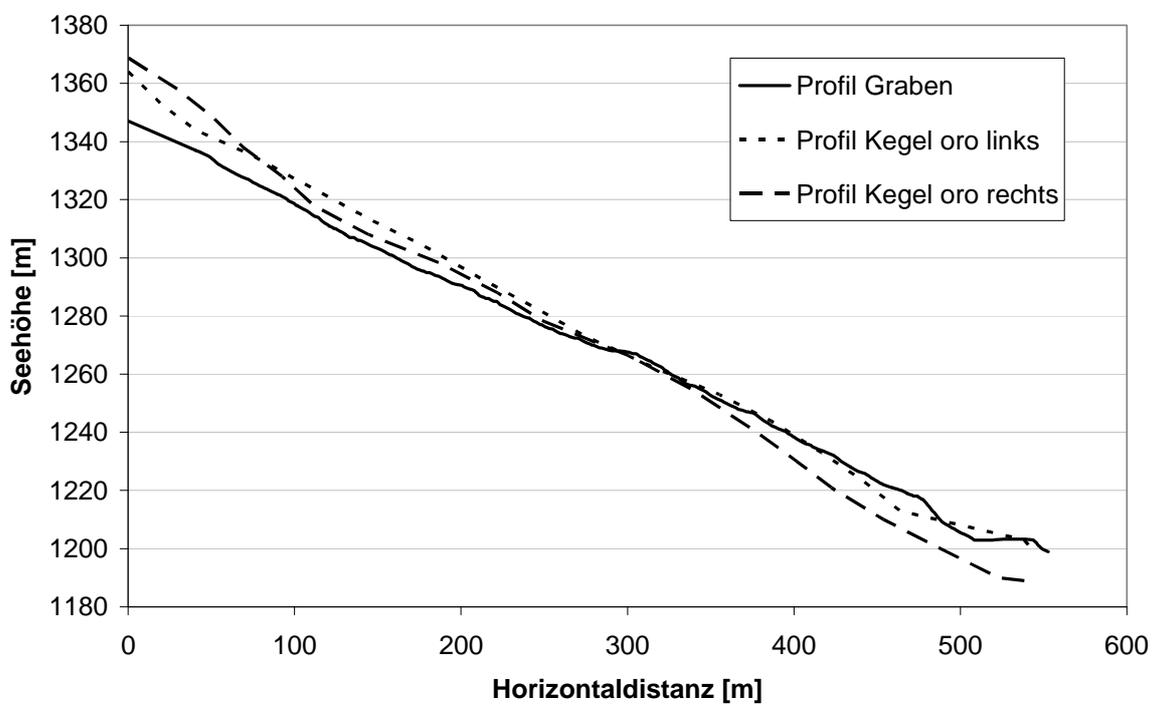
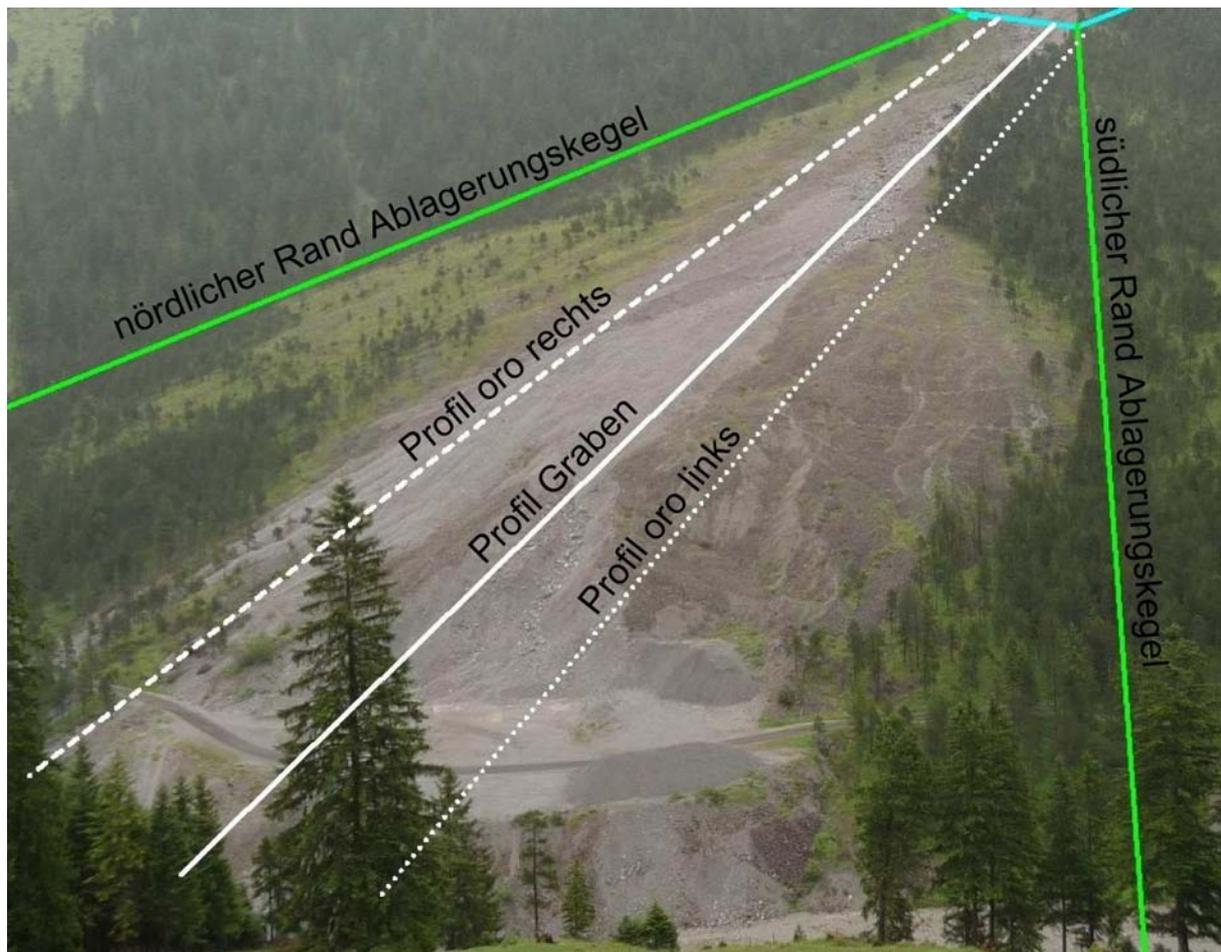


Abbildung 15: oben Bildausschnitt Ablagerungsgebiet der Bärenrufe, Lage der Profile mit Linien eingezeichnet, unten Profile des Erosionsgrabens und der Kegeloberfläche orographisch rechts bzw. links des Grabens

Zu beiden Seiten des Grabens sind Spuren frischer lateraler Erosion sichtbar (geneigte Bäume, abgerissene Grasnarbe).

Zum Zeitpunkt der Felderhebungen hat sich hier eine 80-100 % steile Böschung eingestellt (siehe Abbildung 16). Im Graben finden sich stellenweise große Blöcke, vor allem im proximalen Kegelbereich (Abbildung 16 und 17). Blöcke dieser Größe sind aber eher die Ausnahme in diesem Gebiet. Die Ablagerungen, aus denen der Kegel zum Großteil zu bestehen scheint, gehören der Kies- und Steinfraktion an (siehe Abbildung 17 rechts). Generell nimmt die Größe der Ablagerungen zur Kegelbasis hin ab.

Das Vorhandensein von großen Blöcken deutet auf Kalk als geologisches Grundgestein hin, während der spröde Dolomit meist in kleinere Fragmente zerfällt.



**Abbildung 16: Erosionsrinne Bärenrüfe von unten gesehen, zu beachten sind Blöcke im Graben, terrassenartige Struktur und scharfe Erosionskante, Größenvergleich mit Person in Bildmitte**



**Abbildung 17: links große Blöcke auf den Ablagerungen orographisch rechts des Erosionsgrabens, rechts Ablagerungen der Stein- und Kiesfraktion, jeweils Mobiltelefon (Pfeil) in Bildmitte für Größenvergleich**

Muren oder murähnliche Prozesse hinterlassen häufig typische geomorphologische Strukturen (Aulitzky 1992). Auf der Oberfläche des Kegels sind durch häufige fingerförmige Murlappen oder lobenähnliche Sedimentakkumulationen weitere Hinweise für Murgänge in diesem Gebiet zu erkennen (siehe Abbildung 18). Merkmale wie Murköpfe oder Levees sind nicht zu finden. Die Ablagerungen sind teilweise bereits von krautiger Vegetation bedeckt, vereinzelt gibt es bereits Verjüngung von Fichte und Spirke auf den Ablagerungen.

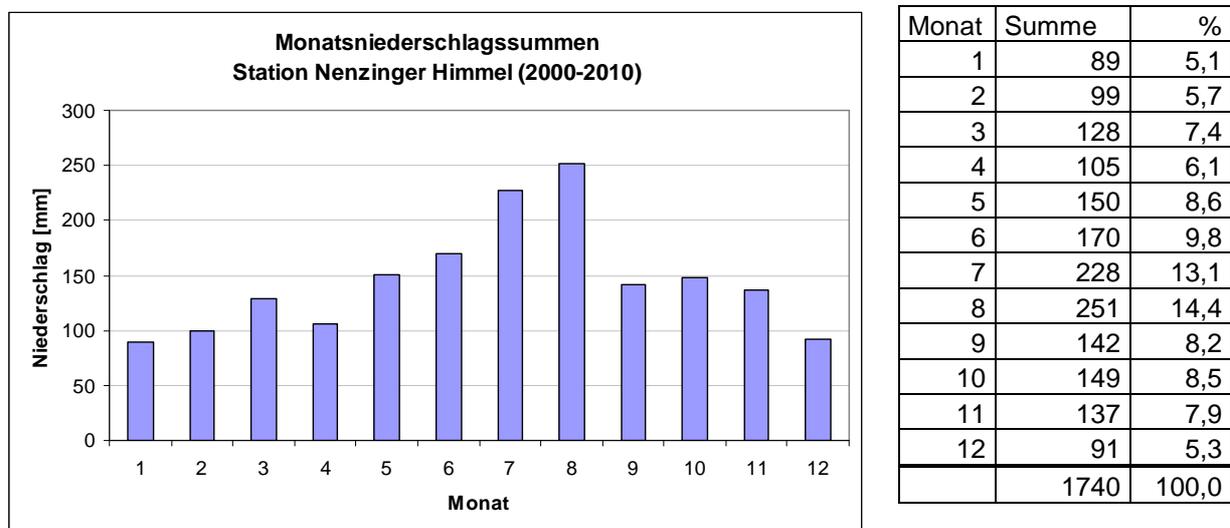
Die Straße wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach durch die Bärenrufe verschüttet. Das abgelagerte Material wurde infolgedessen von der Straße geräumt. Durch diese Arbeiten ist der Aufbau des Ablagerungskegels im Nahbereich zur Straße verändert und gestört.



**Abbildung 18: links frischer Murlappen im unteren Kegelbereich, rechts mehrere ältere bereits mit Vegetation bedeckte Murlappen, rechts oben sind einige große Blöcke sichtbar, im Vordergrund ein Wildwechsel**

### 3.2 Hydrologie und Meteorologie

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich der nördlichen Randalpen. Das lässt vermuten, dass bei Westwetterlagen große Niederschlagsmengen zu erwarten sind. Aufgrund der geringen Größe des Sammelgebiets der Bärenrufe von etwa 0,6 km<sup>2</sup> sind es wahrscheinlich punktuelle, kleinräumige aber intensive Regenereignisse, die hohe Abflussspitzen im Einzugsgebiet bewirken. In Abbildung 19 sind die durchschnittlichen Monatssummen des Niederschlages der nächst gelegenen Messstation (Nenzinger Himmel) gegeben. Die durchschnittliche Jahressumme beträgt 1740 mm. In den Monaten Juli und August fällt durchschnittlich knapp 28 % des Jahresniederschlags.



**Abbildung 19: Monatsniederschlagssummen [mm] berechnet auf Basis der Daten der Messstation Nenzinger Himmel**

Der Murkegel der Bärenrufe scheint gut drainiert und der Graben in seiner Mitte nur zeitweilig wasserführend zu sein. Während der Felderhebung bot sich die Gelegenheit das Einzugsgebiet zu einem Zeitpunkt zu beobachten, in dem es Abfluss produziert. Die Aufnahme in Abbildung 20 wurde am 29.7.2010 unmittelbar nach einem kurzen Regenereignis gemacht. Es zeigt sich, dass die oberen Gräben und Rinnen im Einzugsgebiet wasserführend sind, während der Graben im Ablagerungsgebiet keinen Oberflächenabfluss zeigt. Die gesammelten Niederschlagswässer aus den Runsen des oberen Einzugsgebiets versickerten nahe dem Kegelhals. Am Fuß des Kegels nahe der Straße konnte an mehreren Stellen Wasseraustritt beobachtet werden. An diesen Stellen wurden auch feine Sedimente aus den Ablagerungen ausgeschwemmt. (Abbildung 21). Unter Umständen gibt es hier einen wasserstauenden Bodenhorizont, was allerdings nur eine Spekulation ist.

Diese Beobachtung lässt vermuten, dass in der Regel ein Großteil des Niederschlages unterirdisch im Material des Murkegels abgeleitet wird und der Graben nur nach Starkregenereignissen wasserführend ist. Diese Theorie wird auch von mündlichen Überlieferungen der Anrainer unterstützt (mündlich Herr DI Terzer).



**Abbildung 20: Bärenrufe bei Regenwetter, Gräben im oberen Einzugsgebiet sind wasserführend, im Ablagerungsgebiet ist kein Oberflächenabfluss sichtbar**



**Abbildung 21: links Wasseraustritt unterhalb Ablagerungen, rechts Ablagerung von Feinmaterial im Vorfeld der Bärenrufe**

### **3.3 Vegetation**

Der Murkegel der Bärenrüfe ist zum Teil bewaldet. Wie das Längsprofil in Abbildung 13 zeigt, liegt dieser zwischen etwa 1200 und 1400 m Seehöhe. Nach der Naturraumgliederung des Bundesamts und Forschungszentrum für Wald (BFW) gehört das Gebiet zum forstlichen Wuchsgebiet 4.1, Nördliche Randalpen – Westteil. Für dieses Wuchsgebiet gelten folgende Einteilungen der Höhenstufen: hochsubalpin zwischen 1650-1950 m, tiefsubalpin 1450-1650 m, hochmontan 1200-1450 m, mittelmontan 800-1200 m (Kilian et al. 1994). Die beprobten Bäume der Bärenrüfe wachsen demzufolge in der hochmontanen Höhenstufe.

Die natürliche Waldgesellschaft dieser Höhenstufe ist ein Fichten-Tannenwald (Abietetum). Das karbonatische geologische Grundmaterial bewirkt die Ausbildung einer Unterart des Abietetum, ein Karbonat-Alpendost-Fichten-Tannenwald (*Adenostylo glabrae*-Abietetum). Zum Konzept der „natürlichen Waldgesellschaft“ sei auf einschlägige Literatur wie Mayer (1974) verwiesen.

Diese Waldgesellschaft wird mit steigender Seehöhe durch einen Subalpinen Karbonat-Alpendost-Fichtenwald abgelöst. Die Weißtanne (*Abies alba* Mill.) wird hier seltener, während Fichte (*Picea abies* (L.) Karst) und Lärche (*Larix decidua* Mill.) an Bedeutung gewinnen (Mayer 1974).

Auf dem Murkegel des Untersuchungsgebiets hat sich allerdings eine Ersatzgesellschaft zu der für diese Höhenlage und dieses Wuchsgebiet typische natürliche Waldgesellschaft eines Fichten-Tannenwaldes oder subalpinen Fichtenwaldes gebildet.

Auf Trockenstandorten der subalpinen Stufe besonders auf karbonatischem Grundgestein und stark durchlässigem Untergrund kann sich als natürliche Waldgesellschaft ein Bergkiefernwald (*Mugetum arborae*) als Dauergesellschaft bilden. Die Dominanz der Spirke und das weitgehende Fehlen anderer Baumarten im Untersuchungsgebiet deuten auf eine solche Ersatzgesellschaft hin. Ein Bergkiefernwald kann in verschiedenen Ausprägungen auftreten.

Der Schneeheide-Bergspirkenwald (*Erico-mugetum*) ist typisch für sonnseitige, schneearme, stark drainierte Standorte, während der Alpenrosen-Bergspirkenwald (*Rhododendro hirsuti*-*Mugetum*) charakteristisch für schattigere Standorte, die mehr und länger durch Schnee beeinflusst werden. Der Schneeheide- und der Alpenrosen-Bergspirkenwald sind allerdings beides Wälder der subalpinen Zone. Montane Spirkenwälder finden sich auf Schutthalden, Bergstürzen, etc. und befinden sich außerhalb des Klimaxwaldes (Mayer 1974).

Im Untersuchungsgebiet waren beide typischen Zeigerpflanzen zu finden, die Schneeheide (*Erica carnea*) und die behaarte Alpenrose (*Rhododendron hirsutum*). Dies lässt vermuten, dass der Bestand im Untersuchungsgebiet in seinen Standortmerkmalen zwischen den beiden erwähnten Ausprägungen eines Bergkiefernwaldes zu liegen scheint. Allerdings ist an dieser Stelle auch zu erwähnen, dass die beprobten Bäume über ein relativ großes Gebiet verteilt sind und in diesem Gebiet kleinklimatische Unterschiede zu unterschiedlichen Standorts- und Wuchsbedingungen führen können. So beträgt der Höhenunterschied zwischen dem am höchsten und am niedrigsten gelegenen Baum etwa 100 m und die beprobten Bäume waren auf einer Fläche von etwa 10 ha verteilt.



**Abbildung 22: Aufnahme des Ablagerungsgebietes, Grenze des von Spirken-dominierten Bestandes markiert (Unterschied in Farbe und Struktur)**

Durch Geländebegehungen, eigene Bilder und vorhandene Luftbilder kann Struktur und Zusammensetzung des Bestandes abgeschätzt (Abbildung 22, siehe auch Abbildung 15). und ein schematischer Vegetationsquerschnitt erstellt werden (Abbildung 23).

In der Mitte des Ablagerungsgebietes ist die Murgangaktivität am größten, hier ist die Kegeloberfläche weitgehend vegetationsfrei. Links und rechts des vegetationsfreien Bereiches ist die Vegetation eher grünbraun gefärbt, niedriger als angrenzende Bereiche, manchmal lückig mit Grasflächen zwischen Bäumen. Die Struktur des Bestandes in diesem Bereich

wirkt feinkörniger und Einzelbäume sind nur schwach zu erkennen. Diese Bereiche sind hauptsächlich von Spirken bewachsen, vereinzelt finden sich Fichten und strauchförmige Weiden (*Salix* sp.), wobei letztere auf den unteren straßennahen Bereich beschränkt sind.



**Abbildung 23: Schematischer Querschnitt durch Vegetation im unteren Kegelbereich (nicht maßstabsgetreu, Blickrichtung bergauf) Mitte der Ablagerungen vegetationsfrei, oro links davon expandierender Bestand, Verjüngung und grasige Vegetation zum Teil auf sichtbaren Ablagerungen, oro rechts aufgelockerter Bestand im Zerfall, tote absterbende Bäume in frischen Ablagerungen, wenig Verjüngung, am Kegelrand zu beiden Seiten höhere Bäume mit Gras als Unterwuchs**



**Abbildung 24: ungefähre Lage des Vegetationsquerschnitt**

An den Rändern des Ablagerungsgebietes ändert sich Struktur und Farbe des Bestandes. Dieser erscheint grünlicher, wirkt geschlossener und es lassen sich deutlich Einzelbäume erkennen. Weiters ist eine größere Bestandeshöhe zu erkennen. Der hauptsächlich von Spirken bestandene Bereich geht hier in einen von Fichten und Weißtannen geprägten Bestand über, der natürlichen Waldgesellschaft für dieses Gebiet. In dem vorwiegend aus Nadelbäumen bestehenden Bestand wurden bei der Geländebegehung vereinzelt Laubbäume entdeckt, u.a. Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) und Mehlbeere (*Sorbus aria*).

Orographisch rechts im oberen proximalen Bereich ist der Bestand besonders lückig und teilweise baumfrei (Abbildung 22). Hier befinden sich bei näherer Betrachtung Spirken von niedrigem und teilweise stark verkrüppeltem Wuchs (siehe Abbildung 34). Orographisch

rechts nahe der Straße gibt es zahlreiche tote Spirken, der Baumbestand befindet sich hier scheinbar bereits im Zerfall. (siehe Abbildung 24 bzw. 32).

Oberhalb des Ablagerungsgebietes ab etwa 1360 m, im durchwegs steilen Einzugsgebiet (Abbildung 12), findet sich nur mehr vereinzelt baumartige Vegetation. Zwischen den vegetationsfreien Rinnen des Einzugsgebiets haben sich gräser- und strauchdominierte Pflanzengesellschaften gebildet, geprägt von Latsche (*Pinus mugo* ssp. *mugo*) und Zwergsträuchern wie Alpenrose (*Rhododendron* sp.) oder Schneeheide (*Erica* sp.). Ab etwa 2000 m ist dann auch diese Vegetation nur noch vereinzelt zu finden.

### **3.3.1 *Pinus mugo* ssp. *uncinata* (Spirke oder Hakenkiefer)**

Die Spirke oder Hakenkiefer (auch aufrechte Bergkiefer) ist eine Unterart der *Pinus mugo*, der Bergföhre. Diese außergewöhnlich formenreiche und anspruchslose Art ist in den Gebirgen Süd- und Mitteleuropas verbreitet sowie auf der Balkanhalbinsel und in den Karpaten. Dort besiedelt sie meist hochmontane bis subalpine Extremstandorte bis zu 2400 m Seehöhe (Beyse 2003, Mayer 1977).

Lange wurde diese Artengruppe in der Literatur durch drei eigene Arten gegliedert, *Pinus mugo* Turra (Legföhre oder Latsche), *Pinus uncinata* Ram. (Spirke oder Hakenkiefer) und *Pinus rotundata* Link (Moor-Spirke).

Die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen diesen Arten war und ist Gegenstand genetischer und taxonomischer Untersuchungen (Boratyńska 2007; Garcia Alvaraz et al. 2009).

Es setzte sich doch die Auffassung durch, dass es sich bei diesem Artenkomplex um eine Art *Pinus mugo* mit zwei Unterarten handelt, der strauchförmigen *Pinus mugo* ssp. *mugo* (Legföhre oder Latsche) und der baumförmigen *Pinus mugo* ssp. *uncinata* (Hakenkiefer oder Spirke). Diese Arten neigen zu starker Bastardisierung und bilden leicht Mischformen aus.

Geographisch liegt das Hauptverbreitungsgebiet der Latsche eher im Ostalpenraum, während die Spirke ein Baum der Westalpen ist. In deren Überlappungsgebieten findet man häufig Hybridformen mit Merkmalen beider Unterarten. Der Wuchs ist dann meist kurzstämmig, teils baum- und teils strauchförmig. Besonders auf Hochmoorstandorten finden sich solche Mischformen häufig und werden dann als Moorspirken bezeichnet. Ursprünglich wurden diese ja als eigene Art angesprochen, nämlich *Pinus rotundata* Link (Starlinger 1999).

Die Spirke unterscheidet sich neben ihrem aufrechten Wuchs durch asymmetrische Zapfen mit deutlich hakigen Fortsätzen auf den Schuppenschildern von der strauchförmigen Latsche (Christensen 1987). Sie ist nicht nur in Europa heimisch, auch in Neuseeland im Craieburn

Forest Park ist diese Art zu finden (Benecke et al. 1980). In Österreich findet sich die typische aufrechte Bergkiefer nur in Vorarlberg und Tirol. Dort besiedelt sie lawinensichere Standorte, wo sie durchwegs auch Reinbestände bilden können. Sie ist eine Lichtbaumart, erreicht meist nur Höhen von 10-15 m (max. 25 m, 50 cm BHD) und wird konkurrenzbedingt auf Extremstandorte abgedrängt. Da sie generell langsamwüchsig ist, kann sie sich gegen andere Baumarten wie Fichte, Weißtanne, Zirbe und Laubbaumarten nicht dauerhaft behaupten. Sie besitzt ähnlich wie die Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) eine weite Standortsamplitude und kann so noch unter sehr extremen Standortbedingungen überleben und sich vermehren. Ihre geringen Wärmeansprüche lassen sie auf bis zu 2400 m Seehöhe steigen, während ihr geringer Nährstoffbedarf sie noch auf nährstoffarmen Standorten wie Dolomitgestein, Hochmooren oder Schutthalden gedeihen lässt. Auf letzteren tritt sie oft als Pionier auf und übernimmt nach Bodenverwundungen die Erstbesiedlung dieser Standorte. An solche Standorte und die örtlichen Bedingungen ist diese Art gut angepasst. Bereits im Alter von 6-10 Jahren wird sie blühreif und produziert reichlich Samen, auch vermag sie Schädigung und Schiefstellung gut zu überstehen (Starlinger 1999).

In der Standortwahl ist sie indifferent gegenüber dem Grundgestein, allerdings besteht durch die generell bessere Nährstoffversorgung auf Silikat höherer Konkurrenzdruck durch andere Baumarten. Hinsichtlich ihres Feuchtigkeitsbedarfs in Luft und Boden erscheint sie allerdings etwas anspruchsvoller. Ihr häufigeres Auftreten in den Westalpen (Pyrenäen, Schweiz) versucht Jugovic (1908) durch ihren Feuchtigkeitsbedarf zu erklären, wobei eine hohe Luft- und Bodenfeuchtigkeit ihre Verbreitung zumindest begünstigen soll. Dies erscheint auch plausibel, bedenkt man das Fehlen von Spirken im inneralpinen Bereich und in den Ostalpen.



**Abbildung 25: links für dieses Gebiet typischer lockerer Spirkenbestand mit Grasbewuchs, rechts zwei exponiert wachsende Spirken am Bestandesrand, mit Fichten- und Spirkenverjüngung darunter**

Mit dem Wurzelwerk der Spirke im speziellen hat sich noch keine Forschungsarbeit beschäftigt. Dennoch ist dieses sehr wichtig für die Pflanze, sorgt es doch für die Verankerung der Pflanze im Untergrund und die Versorgung mit Wasser und Nährstoffen. Dennoch wird die Bedeutung des Wurzelsystems manchmal unterschätzt (Kutschera & Lichtenegger 2002).

Die Spirke ähnelt anatomisch anderen Kiefernarten wie der Latsche oder der Waldkiefer (Beyse 2003). Und so kann ein Vergleich mit diesen verwandten Arten Rückschlüsse auf das Wurzelwerk der Spirke ermöglichen.

Die Wurzelsysteme von Latsche, Waldkiefer oder Schwarzkiefer (*Pinus nigra*) hinsichtlich des Grob- wie auch des Feinwurzelwerkes wurden von Kutschera und Lichtenegger (2002) ausführlich beschrieben. Kiefernarten sollen generell ein Pfahlwurzelsystem ausbilden, wobei dieses sehr variabel ausgeformt sein kann und sich an den jeweiligen Standort und Boden anpasst. Besonders die Waldkiefer soll ein sehr anpassungsfähiges, plastisches Wurzelsystem besitzen. Die Ausbildung und Wurzeltiefe des Wurzelwerkes ist abhängig vom Boden und Klima. Einerseits ist das Wurzelwachstum von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens abhängig. Ist der Boden warm und luftdurchlässig, verläuft das Wurzelsystem von Kiefern eher flach. Eine Waldkiefer, welche auf Kalkblockschutt wurzelte, erreichte nur eine Wurzeltiefe von 45 cm. Ebenfalls auf lockerem Kalkschutt wurde von einer Schwarzkiefer zumindest 80 cm maximaler Wurzeltiefe erreicht, allerdings verliefen die meisten Feinwurzeln flach bis etwa in eine Tiefe von 40 cm. Die Wurzeln von auf Schutthalden wachsende Latschen reichten sogar nur 20-30 cm tief (Kutschera & Lichtenegger 2002).

Ist der Boden hingegen eher schwer und kalt, so reichen die Wurzeln bis in eine Tiefe von 4 m (Waldkiefer auf Lösslehm). Der Großteil der Feinwurzeln, die für die Wasseraufnahme des Baumes sorgen, befindet sich allerdings stets oberflächennah bis in eine Tiefe von bis zu 2 m.

Ist der Boden reich an Blöcken, Steinen und Grobschutt, so bewirkt dies, dass die Wurzeln nur flach verlaufen und nur wenig in den skelettreichen Untergrund eindringen. Wenn sie dies tun, dann vor allem entlang von Spalten und Klüften, vor allem wenn diese mit Feinmaterial gefüllt sind. In mineralischen, wenig verwitterten, nährstoffarmen Untergrund dringen kaum Wurzeln ein.

Kühles Klima bewirkt allgemein eine geringere Durchwurzelungstiefe. Auf einem durchschnittlichen Standort in Schweden erreichten die Wurzeln einer Waldkiefer nur knapp 50 cm (Kutschera & Lichtenegger 2002).

Die wirtschaftliche Bedeutung der Spirke wird als gering eingestuft, vor allem bedingt durch ihre geringe Wuchsleistung. Am Fernpass in Tirol wurde in Spirkenreinbeständen ein Vorrat von 100-120 fm/ha bei einem Alter von 170-210 Jahren erreicht. Ihr Holz gilt als harzreich und aufgrund ihres generell eher langsamen Wachstums als sehr hart. Es wird allerdings meist nur als Brennholz verwendet (Starlinger 1999).

Ihre Bedeutung als Schutzwaldbaumart auf steilen, bodentrockenen Schutthalden und Felshänge ist wohl entscheidender. Bei Anbauversuchen in Aufforstungen von Schutzwald oder Brandflächen wurde die Spirke auch recht erfolgreich eingesetzt (Stern & Hopf 1988, Zwerger 1989).

Aufgrund der Seltenheit in Österreich wurde die Spirke hier unter Naturschutz gestellt. Die Seltenheit dieser Art in Österreich ist vor allem durch die Lage am Rande ihres Hauptverbreitungsgebiets bedingt und weniger durch eine aktuelle akute Bedrohung. Es wurden Naturreservate zum Schutz dieser Baumart eingerichtet, etwa in Tirol, im Fernpassgebiet aber auch in Vorarlberg. Zwei dieser Schutzgebiete, welche den Richtlinien des europäischen Schutzgebietssystems Natura2000 entsprechen, liegen im Gamperdonatal, die Spirkenwälder Innergamp und Oberer Tritt, mit einer Fläche von etwa 44 bzw. 12 ha. Im östlichen Nachbartal, dem Brandnertal, gibt es ebenfalls ein Schutzgebiet, die Spirkenwälder Brandnertal, mit einer Fläche von etwa 105 ha. Ein weiteres Schutzgebiet befindet sich in der Gemeinde Frastanz, die Spirkenwälder Saminatal mit 478 ha (Peter 2009).

### **3.4 Wild**

Bergwälder wie jene im Untersuchungsgebiet sind Lebensraum zahlreicher Tierarten, wie etwa der Rothirsch (*Cervus elaphus*) aus der Familie der Hirsche (*Cervidae*). Im Gebiet des Gamperdonatals in den höher gelegenen Regionen finden sich neben Rotwild vor allem Gamswild, Rehwild und Steinböcke (mündlich DI. Terzer).

Mit der Thematik der Wechselwirkungen zwischen Wald und Wild haben sich bereits Forscher verschiedener Disziplinen auseinandergesetzt (Reimoser 1996, Donaubauer 1994). Der Einfluss von Gamswild auf die Regeneration subalpiner Fichtenwälder wird etwa von Kupferschmid & Bugmann (2004) behandelt.

Im Gamperdonatal hat vor allem Rotwild einen negativen Einfluss auf die Waldentwicklung. Durch selektiven Verbiss sowie Fege- und Schälsschäden soll es zu beträchtlichen Schäden an Jungwuchs und Bestand kommen (mündlich DI. Terzer).

Auch im Untersuchungsgebiet sind solche Schäden relativ häufig (Abbildung 27). Orographisch links der Bärenrufe etwa 230 m vom Bestandesrand entfernt, befindet sich eine Wildfütterung, in deren näherer Umgebung ist der Wildeinfluss besonders deutlich zu sehen. Betrachtet man das Gebiet aus der Ferne (siehe Abbildung 26), so sind relativ deutlich hellere Linien im Ablagerungsgebiet zu erkennen. Dem Verlauf nach zu schließen, können es sich um Wildwechsel handeln. Im Feld erhärtete sich die Hypothese (Abbildung 18). Dies lässt darauf schließen, dass der Kegel häufig von Wild frequentiert und überquert wird.

So ist eine Beeinflussung des Bestandes im Untersuchungsgebiet durch Wild nicht auszuschließen sondern sogar wahrscheinlich.

Traditionell war die Jagd wichtig für die Bewohner des Gamperdonatals. Durch intensive Bejagung und Wilderei soll es um die vorige Jahrhundertwende kein Rotwild im Gamperdonatal gegeben haben. 1903 wurden einige Rothirsche ausgesetzt und seit etwa 1950 wird Fütterung des Wildstandes im Winter betrieben. Der Wildstand ist in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen. Es wurden die negativen Folgen auf die Verjüngung des Waldes erkannt und die Abschusszahlen drastisch erhöht. Zurzeit beträgt das Abschussoll 130 Stück pro Jahr. Außerhalb der Schonzeiten darf jedes Tier, dessen ein Jäger oder eine Jägerin ansichtig wird, geschossen werden, was einem so genannten „Totalabschuss“ entspricht (mündlich Hr. Gamon).



**Abbildung 26: Aufnahme des Ablagerungsgebietes, zu beachten sind in der Mitte und rechts im Bild helle Linien, wahrscheinlich Wildwechsel**



**Abbildung 27: links Fichte mit starkem Wildverbiss, im Hintergrund sind die Ablagerungen der Bärenrufe sichtbar, rechts Wildfütterungshaus südlich der Bärenrufe**

### **3.5 Geschichte und Chronik**

Die folgenden Informationen zur Geschichte des Untersuchungsgebietes entstammen dem Archiv des Forsttechnischen Dienstes der Wildbach und Lawinenverbauung, Vorarlberg sowie mündlichen Mitteilungen durch den Archivar der Agrargemeinschaft Nenzing, Thomas Gamon, und dem Geschäftsführer der Agrargemeinschaft, DI Siegbert Terzer. Weitere Quelle war eine Publikation der Gemeinde Nenzing zum Thema Hochwasser. Die Agrargemeinschaft Nenzing ist Hauptgrundeigentümer im Gamperdonatal.

Das Wort „Gamperdona“ hat seine Wurzeln im rätoromanischen und kann mit „rundes Feld“ übersetzt werden. Seit dem Mittelalter gibt es Alphütten und Siedlungen auf dem Gebiet der heutigen Alpsiedlung „Nenzinger Himmel“. Der Zugang zu diesen Niederlassungen war stets schwierig, bedingt vor allem durch die Enge des Tales und die Kraft des Mengflusses. Die Chroniken berichten von zahlreichen, oft sehr zerstörerischen Hochwasserereignissen der Meng und deren Zubringer.

Aufgrund dessen wurde das Holz der Wälder meist vor Ort verwendet und nur selten hinunter ins Tal transportiert. In der Vergangenheit wurde der Fluss für den Transport von Holz verwendet. 1967 fand auf der Meng die letzte Holztrift statt. Während des Winters wurde das geschlagene Holz in einer künstlich errichteten Klausen gesammelt und mit der Frühjahrsschmelze ins Tal geschwemmt. Generell gab es nur wenig forstliche Nutzung der Wälder. Bereits im Mittelalter wurde Wald in diesem Gebiet teilweise unter Bann gestellt, um die Alpweiden, Behausungen und Infrastruktur vor Verwüstungen durch alpine Naturgefahren zu bewahren (mündlich Hr. Gamon).

Im Jahr 1968 wurde die Agrargemeinschaft Nenzing gegründet und übernahm die Bewirtschaftung des Gebietes, welches vormals im Besitz der Gemeinde Nenzing und der Österreichischen Bundesforste war. Im Aufgabenbereich der Agrargemeinschaft liegt auch die Verwaltung der Mautstraße, welche zu der Siedlung Nenzinger Himmel führt. Diese Straße wird häufig von Ablagerungen der Wildbäche im Gamperdonatal verschüttet, unter anderem auch von der Bärenröfe.

Historische Hochwässer des Mengflusses fanden in den Jahren 1762, 1910, 1976, 2000 und 2005 statt. Zu diesen Hochwasserereignissen wurde meist auch große Menge an Material und Wildholz mobilisiert und talwärts transportiert.

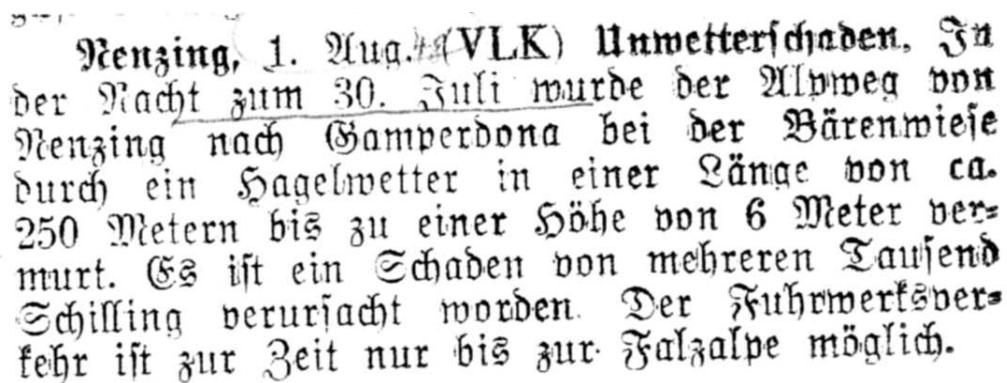
1762 kam es im Frühsommer, Anfang Juli, zu einem besonders starken Hochwasser des Mengflusses, es soll das größte der letzten 500 Jahre gewesen sein. Im Gemeindearchiv der

Gemeinde Nenzing gibt es zu diesem Ereignis eine sehr detaillierte und ausführliche Beschreibung durch den Nenzinger Bürger Matthias Drexel. Große Teile des nördlichen Alpenraumes sollen in diesem Jahr von Hochwasser betroffen gewesen sein, besonders das Rheintal. In dieser Schrift werden auch die Schäden im Gamperdonatal beschrieben. So sollen alle Brücken und Wege des Tales durch die Wassermassen fort gerissen worden sein. Die kleine Kapelle bei Kühbruck wurde ebenfalls Opfer der Fluten.

Das Hochwasser 1910 war ebenfalls sehr zerstörerisch. Im April dieses Jahres kam es zu starken Regenfällen. Zu dieser Zeit soll noch viel Schnee in den Bergen gewesen sein. Die Schneeschmelze und anhaltender Regenfall soll zu der Katastrophe geführt haben. Im Ortsgebiet kam es zu schweren Schäden. Die nach dem Hochwasser 1762 an anderer Stelle wieder aufgebaute Kapelle blieb diesmal verschont und unbeschädigt. Die Folgen des Hochwassers 1910 veranlasste die Gemeinde zu aufwändigen Verbauungsmaßnahmen in den darauf folgenden Jahren. So wurde das Gerinne der Meng im Ortsbereich mit Sohlschwellen und Pflasterungen der Böschungen gesichert (Gemeinde Nenzing, 2010).

Für die Jahre 1948, 1979, 1991 und 1999 wird von starken Massenverlagerungen in der Bärenrufe und Behinderungen auf der Mautstraße berichtet (mündlich Hr. Gamon und DI Terzer).

In Archiv des Forsttechnischen Dienstes der Wildbach und Lawinenverbauung Vorarlberg liegen sich für das Jahr 1948 zwei Einträge vor, darunter eine sehr authentische Beschreibung der Ereignisse in diesem Jahr. Leider sind die Quellen dieser Textstücke nicht überliefert wahrscheinlich dürfte es sich aber um einen Artikel der Vorarlberger Landeskorrespondenz (kurz VLK) handeln.



Nenzing, 1. Aug. (VLK) Unwetterschaden. In der Nacht zum 30. Juli wurde der Altweg von Nenzing nach Gamperdona bei der Bärenwiese durch ein Hagelwetter in einer Länge von ca. 250 Metern bis zu einer Höhe von 6 Meter vermurt. Es ist ein Schaden von mehreren Tausend Schilling verursacht worden. Der Fuhrwerksverkehr ist zur Zeit nur bis zur Falzalpe möglich.

Abbildung 28: Textstück zu Unwetterschaden der Bärenrufe, Datum 1.8.1948 (Quelle: Archiv der WLV Vorarlberg)

In dem zweiten Textstück wird das Ereignis und auch die meteorologischen Bedingungen noch näher beschrieben.

„(...) Am vergangenen Donnerstag ballte sich ein heftiges Gewitter im Gamperdonatal zusammen. Die schweren schwarzen Wolken verfangen sich am Fundelkopf und entleerten sich in noch nie dagewesener Ergiebigkeit über den schründigen Schrofen dieses Kalksteinmassives. Die plötzlich zusammentreffenden Wassermengen vermochten alle Rinnen und Spalten auszufegen und die alte Rufe in Bewegung zu setzen. Die Steinlawine legte sich in mehreren Armen über den Weg und blieb in ihrem etwa 40 Meter breiten Kern mehrere Meter hoch über dem Fahrweg liegen. Staunend steht der Wanderer vor dieser endlosen Steinwüste und bewundert die Wucht der Naturkräfte. (...)“

**Menzing, 2. Aug. Ausbruch der Bärenrufe.**  
Jeder Tourist, der in den Menzinger Himmel wandert, kennt die Bärenrufe zwischen Schafbrücke und Gamperdonaalpe, eine Steinhalde größeren Ausmaßes am Fuße des Fundelkopfes. Am vergangenen Donnerstag ballte sich ein heftiges Gewitter im Gamperdonatal zusammen. Die schweren schwarzen Wolken verfangen sich am Fundelkopf und entleerten sich in noch nie gesehener Ergiebigkeit über den schründigen Schrofen dieses Kalksteinmassives. Die plötzlich zusammentreffenden Wassermengen vermochten alle Rinnen und Spalten auszufegen und die alte Rufe in Bewegung zu setzen. Die Steinlawine legte sich in mehreren Armen über den Weg und blieb in ihrem etwa 40 Meter breiten Kern mehrere Meter hoch über dem Fahrweg liegen. Staunend steht der Wanderer vor dieser endlosen Steinwüste und bewundert die Wucht der Naturkräfte. Sollte man den Weg auf die alte Basis bringen, so müßten mindestens 150 Tagelöhner Arbeit angewendet werden. Nach einer Unterbrechung von vier Tagen kann der Fuhrwerkverkehr, allerdings sehr notdürftig und behelfsmäßig, wieder aufgenommen werden. In der Zwischenzeit haben Pfadfinder von Hard, die in Gamperdona ein Ferienlager aufgeschlagen haben, sich nützlich eingeschaltet, indem sie die wichtigsten Lasten, insbesondere die Lebensmittel für die Feriengäste abholten und nach Gamperdona brachten. Durch diese hilfsbereite Tat, aber auch durch ihre stramme Ordnung und vorbildliche Gesittung haben sich die Pfadfinder im Menzinger Himmel eine sehr gute Nummer geschaffen. *Hengstler 1948*

Abbildung 29: Textstück zu Ausbruch der Bärenrufe, Datum 2.8.1948 (Quelle: Archiv der WLV Vorarlberg)

1976 wird berichtet, dass die Meng durch eine Hangrutschung aufgestaut wurde und sich nach dem Bruch dieses natürlichen Staudamms mit einer Flutwelle ins Tal ergoss.

Im August 2005 kam es abermals zu einem starken Hochwasser. Die Straße im Gamperdonatal wurde schwer beschädigt und stellenweise fortgerissen. Es kam zu Vermurungen der Wege und Straßen. Durch Geschiebeablagerungen im Bett der Meng soll der Wasserspiegel nach Abklingen des Hochwassers etwa 4 m höher als sonst gewesen sein. Auch in anderen Ortsteilen Nenzings kam es zu Hangrutschungen und Muren (Gemeinde Nenzing, 2010).

Diese großen Hochwasserereignisse sind gut dokumentiert und verblieben im Gedächtnis der lokalen Bevölkerung. Im Gamperdonatal kommt es aber sehr viel häufiger zu kleineren Hochwässern, Rutschungen und Vermurungen. So soll es beinahe bei jedem stärkeren Regenereignis zu Vermurungen der Straße kommen. Diese geschehen allerdings derart häufig, dass sie in Chroniken und Archiven nicht vermerkt sind, auch sind die Folgen meist gering. Das Material wird von Arbeitern der Agrargemeinschaft mit einem Radlader von der Straße geräumt und die Straße wieder für den Verkehr freigegeben (mündl. DI Terzer).

Jahr	Beschreibung
1762	Hochwasser der Meng
1910	Hochwasser der Meng
1948	Murgang Bärenrufe, Verschüttung der Straße
1976	Durch Rutschung ausgelöste Aufstauung der Meng, nach Bruch Flutwelle
1979	Murgang Bärenrufe, Verschüttung der Straße
1991	Murgang Bärenrufe, Verschüttung der Straße
1999	Murgang Bärenrufe, Verschüttung der Straße
2005	Hochwasser der Meng, Murgänge in Zubringern

**Tabelle 1: Archivdaten der Bärenrufe und der Meng**

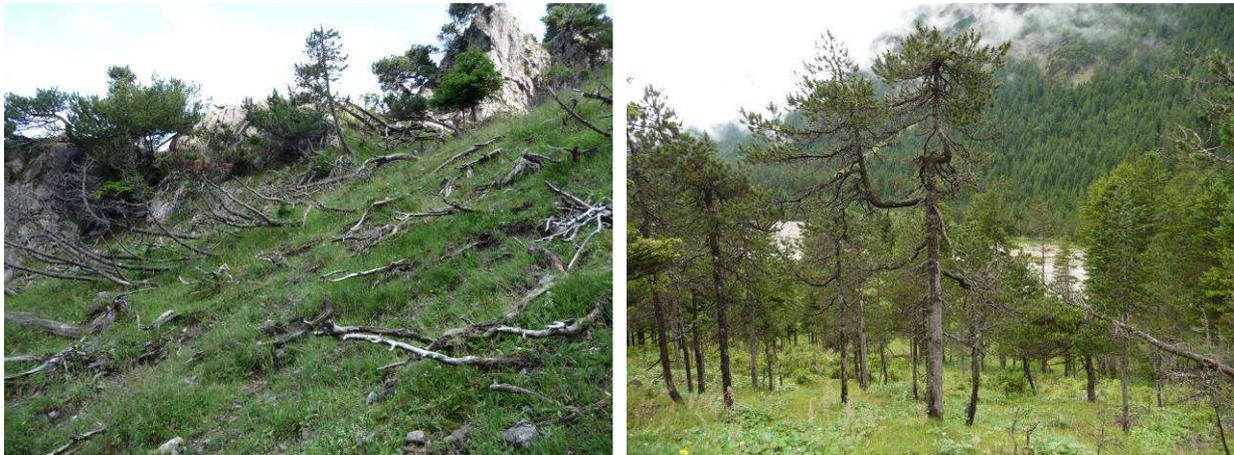
### **3.6 Relevante Prozesse im Einzugsgebiet**

Die Bärenrufe ist ein Einzugsgebiet, das von mehreren Massenbewegungsprozessen beeinflusst wird. Stumme Zeugen wie frische Ablagerungen in Form von Murlappen und geschädigte Bäume im Ablagerungsgebiet lassen auf Murgangaktivität schließen, wobei die Verlagerung großer Blöcke auf eine hohe Transportkapazität der Ereignisse in der Vergangenheit schließen lässt (siehe Abbildung 16 und 17 und Aulitzky 1992, Hübl et al. 2003). Diese Hypothese wird gestützt durch Vergleich von Einzugsgebietsparametern wie das

Kegelgefälle, das Relief- oder das Melton-Verhältnis (Abbildung 13) mit Werten aus der Literatur (Strunk 1995, Wilford et al. 2004).

Bei den Prozessen dürfte es sich um granulare Murgänge handeln mit relativ wenig Feinanteil, was typisch für derartige steile Einzugsgebiete auf Dolomit ist (Strunk 1995). Auch die Ablagerungsformen legen nahe, dass es sich um granulare, korngestützte Murgänge handelt (Bardou et al. 2003). Diese Prozesse bewirken sowohl laterale Erosion als auch Tiefenerosion in den oberen Bereichen des Einzugsgebiets (vergleiche Abbildung 16). In den unteren Abschnitten des Einzugsgebietes kommt es hingegen zu Ablagerung des erodierten Materials und zu Verschüttung der Straße und der Vegetation.

Im Einzugsgebiet sind auch mögliche Anzeichen von Lawinenaktivität sichtbar, besonders in den oberen Abschnitten orographisch rechts des Grabens, wo der Bestand nur lückig ist (siehe Abbildung 22). Vielen Bäume hier erschienen verkrüppelt und geneigt, teilweise kam es in der Vergangenheit zu Wipfelbruch. Auch sind auffällig häufig tote verkrüppelte Bäume zu sehen (siehe Abbildung 30). Derartige Anzeichen lassen auf eine Beeinflussung durch Schneelawinen schließen (Schönengruber et al. 1994, Bartelt & Stöckli, 2001).



**Abbildung 30: links geneigte und verkrüppelte Spirken, rechts Spirke mit mehrfachen Wipfelbruch nahe der Straße**

## **4. Methoden**

Die Methodik der Probennahme und deren Auswertung wurden auszugsweise aus Stoffel und Bollschweiler (2008) übernommen. Weitere Quellen waren Schweingruber (1983 und 2001), sowie Pollanschütz (1980). Die der Literatur entnommene Methodik wurde an die besonderen lokalen Bedingungen angepasst.

### **4.1 Aufnahmemethoden**

Im Untersuchungsgebiet gab es Anzeichen von Murgang- und von Lawinenaktivität. So deuten etwa Ablagerungen oder besondere Wuchsformen von Bäumen daraufhin, dass in der Vergangenheit sowohl Murgänge als auch Lawinen stattgefunden haben. Manche Bäume erschienen von beiden Prozessen beeinflusst, während andere entweder nur von Lawinen oder Murgänge beeinflusst wurde. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Rekonstruktion der Murgangaktivität. Aus diesem Grund bilden Lawinen einen Störfaktor und die Beeinflussung von Bäumen durch Lawinen bzw. deren Einfluss auf die Ergebnisse der Analyse muss möglichst verhindert werden.

Eine Differenzierung der Art der Beeinflussung eines Baumes ist möglich auf Basis einer optischen Analyse von Wuchsform und lokale Ablagerungen.

Deutliche meist lappen- oder fingerförmige Ablagerungen, Verletzungen am Stammfuß sowie eingeschüttete Stämme lassen auf eine Beeinflussung der Bäume durch Murgänge schließen. Die erwarteten Reaktionen der Bäume auf diese Ereignisse sind abrupte Wachstumsschwankungen, die Bildung von Reaktionsholz, Kallusgewebe bzw. bei Fichten traumatische Harzkanalreihen (Stoffel & Bollschweiler 2008).

Bäume, bei denen ein Einfluss von Schneelawinen vermutet wurde, wiesen oft sogar mehrfachen Wipfelbruch auf oder erschienen schief gestellt. In diesem Fall sind die erwarteten Reaktionen hauptsächlich abrupte Wachstumseinbrüche und Reaktionsholz (Stoffel & Bollschweiler 2008).

Diese Annahmen haben sich bei dendrogeomorphologische Untersuchungen von Bäumen, die nachweislich durch Murgänge oder Schneelawinen beeinflusst wurden, als geeignet erwiesen (Stoffel et al. 2008).

Durch die gezielte Beprobung von scheinbar nur von Lawinen beeinflussten Bäumen sollen gezielt Lawinenereignisse rekonstruiert werden. Mit diesen Ergebnissen soll dann der

Lawineneinfluss auf Bäume gefiltert werden, die von beiden Prozessen beeinflusst erscheinen.

So wurde das Untersuchungsgebiet in die Sektoren A, B und C unterteilt. In allen Sektoren waren stellenweise Anzeichen von Lawinen und Murgängen zu erkennen, in Sektor C lässt der besondere Wuchs der Bäume auf eine starke Beeinflussung durch Lawinen vermuten.

#### 4.1.1 Unterteilung des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet wird in 3 Sektoren unterteilt, A, B und C (für einen Überblick siehe Abbildung 31).

Der Graben in der Mitte des Ablagerungsgebietes, in Abbildung 31 als heller Streifen sichtbar, dient als Orientierung. Die orographischen Angaben beziehen sich auf dieses Merkmal des Ablagerungskegels.

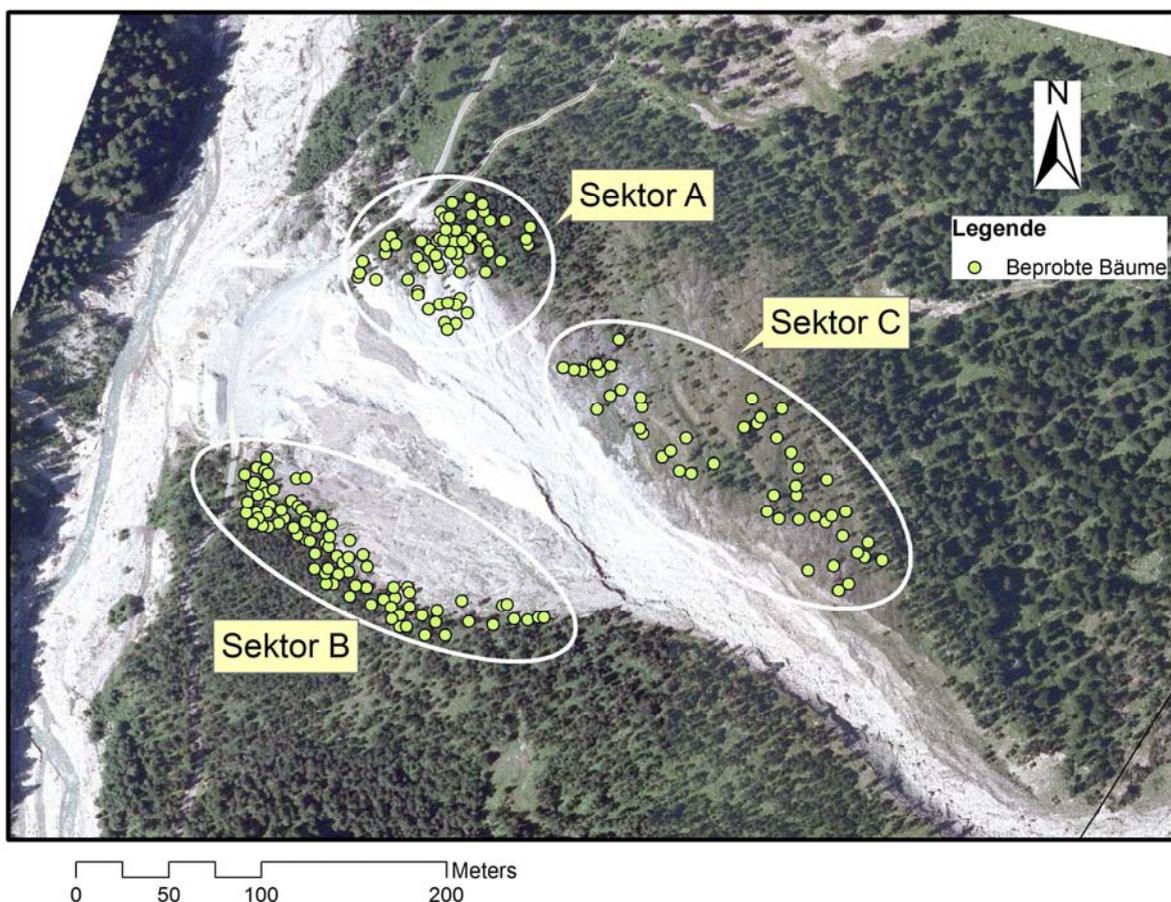


Abbildung 31: Luftbild des Untersuchungsgebiets, beprobte Bäume und Sektoreneinteilung eingezeichnet

Sektor A liegt distal auf der orographisch rechten Seite des Ablagerungskegels und zieht sich unmittelbar oberhalb der Straße etwa 80 m hangaufwärts. Die Beprobungsdichte ist hier

besonderes hoch. In diesem Sektor finden sich sowohl Anzeichen von Murgang- als auch Lawinenaktivität. Das Alter der Ablagerungen erschien sehr unterschiedlich, frische Ablagerungen waren vor allem am Bestandesrand zu erkennen (siehe Abbildung 32). Vor allem im höher gelegenen Bereich erscheinen Bäume gelegentlich von gekrümmtem Wuchs und/oder weisen Wipfelbruch auf, was eine Beeinflussung durch Lawinen vermuten lässt. Solche Bäume wurden von einer Beprobung ausgeschlossen, vielmehr wurden nur Bäume beprobt, die möglichst nur von Murgängen beeinflusst erschienen.



**Abbildung 32: exponierte von frischen Murgängen beeinflusste Bäume in Sektor A**

Sektor B ist auf der orographisch linken Seite gelegen und erstreckt sich von der Straße etwa 200 m hangaufwärts am Bestandesrand entlang (Abbildung 31 und 33). Dieser Sektor ist im Vergleich zu Sektor A mehr lang gestreckt. Wie in Sektor A wurden auch hier möglichst nur Bäume beprobt, die nur von Murgängen beeinflusst wurden. Das Alter der Ablagerungen erscheint älter als in Sektor A, da diese bereits stellenweise von Gras oder krautiger Vegetation bedeckt waren. Die Beprobungsdichte ist wieder relativ hoch.



**Abbildung 33: oberer Bereich von Sektor B, Blick bergauf, links jüngere Ablagerungen sichtbar**

Sektor C liegt auf der orographisch rechten Seite des Kegels (Abbildung 31). Dieser Sektor ist oberhalb von Sektor A zwischen 120 und 330 m von der unteren Straße entfernt gelegen. In Sektor C wurden nur Bäume beprobt, die vor allem von Lawinen beeinflusst erschienen. Solche Individuen waren von verkrüppelten, geneigten Wuchs und zeigten Wipfelbruch. Diese Bäume wurden in der Vergangenheit wahrscheinlich auch durch Murgänge beeinflusst. Bäume in diesem Gebiet wiesen meist einen deutlich sichtbaren Wurzelanlauf auf. Dies und die Tatsache, dass die Ablagerungen meist von krautiger Vegetation bedeckt waren, lassen vermuten, dass die Beeinflussung durch Murgangereignisse zeitlich schon länger zurück liegt (siehe Abbildung 34). Die Beprobungsdichte ist hier geringer, um ein möglichst großes Gebiet abzudecken.



**Abbildung 34: Bäume in Sektor C, zu beachten ist der niedrige, verkrüppelte Wuchs und Schiefstellung, Blickrichtung bergab**

#### **4.1.2 Vorgangsweise bei Auswahl der Probebäume und Art der Beprobung**

Da das Untersuchungsgebiet hauptsächlich von Spirke bestockt ist und deren genauere Untersuchung ein Ziel dieser Arbeit darstellt, wurden vor allem Spirken ausgewählt.

Besonders exponiert wachsende Bäume zeigten Verbiss- und Fegeschäden verursacht durch Wild. Solche Bäume wurden von einer Beprobung ausgeschlossen, um zu vermeiden, dass Verwundungen oder Wachstumsstörungen verursacht durch Wildeinfluss die Ergebnisse der Jahrringanalyse stören. Generell wurde stärkeren Bäumen gegenüber schwächeren der Vorzug gegeben, da schwächere Stämme häufiger gefegt oder verbissen waren.

Die beprobten Bäume wurden generell möglichst gleichmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilt. War der Bestand lückig oder waren keine geeigneten Bäume vorhanden, so wurde ein Mittelweg zwischen der Beprobung von Bäumen mit wahrscheinlich deutlichen Reaktionen und einer ausgewogenen räumlichen Verteilung der beprobten Bäume gewählt.

Beprobt wurde vor allem mit einem Zuwachsbohrer der Firma Suunto (Probendurchmesser 5 mm). Empfehlungen zur sicheren Handhabung eines Zuwachsbohrers wurden aus der Literatur entnommen (Schweingruber 1983, Grissino-Mayer 2003). In Sektor A und B wurden Stammscheiben von bereits abgestorbenen Bäumen genommen. Auch wurden bei einigen Bäumen Keile aus Kallusgewebe entnommen. Für die Probennahme wurde dann Hand- oder Motorsäge verwendet.

Falls es der Durchmesser des beprobten Baumes erlaubte, wurde der Stamm durchgebohrt, sodass sich zwei Proben auf einem Bohrkern befinden. Dies erleichtert die weitere Analyse und Auswertung der zwei Proben. Falls die entnommenen Proben von schlechter Qualität waren, wurde die Bohrung an anderer Stelle wiederholt. Oft konnte die Probe nur in Bruchstücken dem Bohrer entnommen werden oder die Probe war bereits stark durch Pilze oder Insekten abgebaut oder verfault. Auch wenn eingewachsene Äste oder Hohlräume angebohrt wurden, wurde die Beprobung wiederholt.

Die Bohrkern wurden möglichst im rechten Winkel zur Stammachse entnommen wird. Bei einem Bohrkern, welcher nicht im 90°-Winkel zur Stammachse entnommen wurde, erscheinen die Jahrringe verzerrt und breiter. Trifft der Bohrer nicht die Mitte des Stammes das Mark, so fehlt ein Teil der Jahrringe dieses Baumes auf der Probe. Dies war oft nicht zu vermeiden, doch wurde eine Bohrung wiederholt, wenn das Mark stark verfehlt wurde, um möglichst viele Jahrringe auf den Bohrproben zu haben (Schweingruber 1983).

Wenn mit dem Zuwachsbohrer beprobte wurde, wurden üblicherweise zwei Proben pro Baum genommen. Die Richtung und Höhe der Beprobung muss an den Wuchs und die Art der Beeinflussung des Baumes angepasst werden. So wurde unterschiedliche Strategien der Beprobung für Einschüttung, Verletzung und Schiefstellung angewandt.

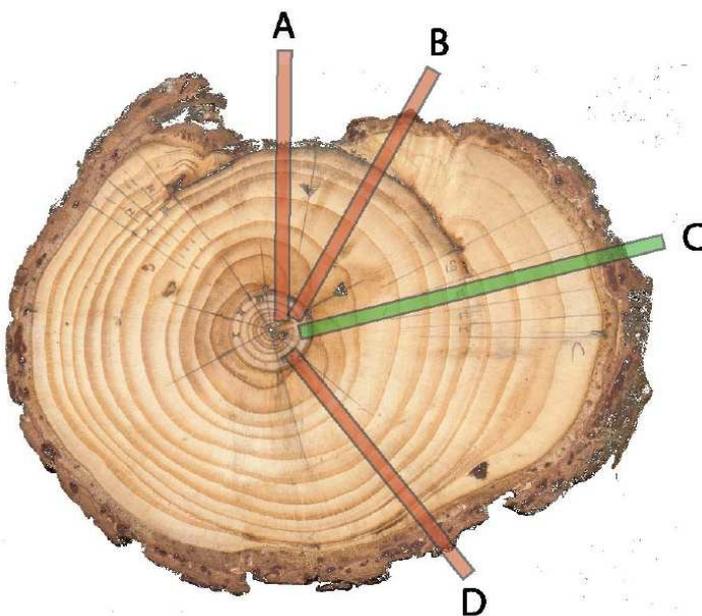
Von Stämmen, welche aufrechten Wuchs hatten und/oder sich in einer Ablagerung befanden, wurden zwei einander entgegen gesetzte Proben auf gleicher Höhe möglichst knapp über dem Boden genommen, einmal in Fallrichtung und einmal entgegen dieser. Wird ein Baum eingeschüttet, so kommt es oft zu einem abrupten Einbruch des Zuwachses. Dieser ist in der Regel in den Jahrringen nahe am Boden deutlicher ausgeprägt als weiter oben am Stamm, darum empfiehlt sich eine Beprobung möglichst nahe der Bodenoberfläche (Pollanschütz 1980, Stoffel & Bollschweiler 2008).

Erschien der Stamm schief gestellt, so wurde in Neigungsrichtung beprobt an der Stelle der stärksten Biegung des Stammes. Dies bedeutet, dass manche Bäume nicht in Bodennähe beprobt wurden. Es wurden wieder zwei Proben entnommen.

Bei sichtbaren Verletzungen wurden entweder ein Bohrkern und ein Keil aus dem Überwallungsgewebe oder zwei Bohrkern genommen, wobei ein Bohrkern nahe der Verletzung entnommen wurde.

Bei der ausschließlichen Beprobung mit Bohrkernen sei besonders auf Stoffel und Bollschweiler (2008) verwiesen. Bei der Beprobung von Überwallungsgeweben mit Bohrkernen besteht bei einer ungünstigen Wahl der Beprobungsstelle die Gefahr, dass nicht alle vorhandenen Jahrringe auf dem Bohrkern liegen (siehe auch Abbildung 35). Das Problem unvollständiger Proben oder Proben, deren Jahrringstruktur nur wenig Reaktion auf die Beeinflussung zeigen, kann oft nur iterativ gelöst werden, indem mehrere Bohrungen gemacht werden und nur die qualitativ besten Bohrkern erhalten werden.

Die Entnahme eines Keiles mit Hand- oder Motorsäge empfiehlt sich hier jedenfalls, doch ist hier auch darauf zu achten bis in das Gewebe zu sägen, wo das Kambium bei der Verletzung überlebt hat und so die komplette Jahrringstruktur sichtbar ist.



**Abbildung 35: Stammscheibe mit Verletzung, eine Bohrprobe bei c genommen ist ideal hinsichtlich ihres Informationsgehalts und Vollständigkeit, bei a und b fehlen einige Jahrringe auf dem Bohrkern, bei d ist die Zuwachsänderung nur schwach ausgeprägt (Abbildung aus Stoffel und Bollschweiler, 2008)**

### **4.1.3 Dokumentation der Proben und Zusatzinformationen**

Während der Probennahme wurden wichtige Kenndaten des beprobten Baumes und dessen Umfeld auf einem vorgedruckten Erhebungsformular notiert. So wurde unter anderem der Stammumfang auf Brusthöhe, die Baumhöhe, die soziale Stellung, die Art der Störung, die Lage des Baumes und die Art und Position der genommenen Proben schriftlich festgehalten.

## Methoden

Weiters wurde das Wuchsbild des Baumes skizziert sowie eine Skizze des näheren Umfeldes erstellt. Besonderheiten der näheren Umgebung wurde hier ebenso festgehalten wie etwa Bodenvegetation, Art und Alter der Ablagerungen oder Anzeichen von Lawinenaktivität hangaufwärts. Ein bis zwei Photos pro Baum rundeten die Beschreibung des Probebaumes ab. Diese Vorgehensweise hat sich bewährt und wird in der Fachliteratur empfohlen (etwa Schweingruber 1983).

Author: <i>Prof. Schmitt</i>		Site: <i>Ba-B</i>		Date: <i>14.7.10</i>	
Tree number: <i>NEB6-9</i>			Social position:		
Species <i>Pin. unc.</i>		Circumference <i>60</i> <sup>19.1</sup> cm		<input type="checkbox"/> dominant <input type="checkbox"/> medium <input checked="" type="checkbox"/> co-dominant <input type="checkbox"/> suppressed <input type="checkbox"/>	
Tree height: - <i>7</i> m <i>8.2</i> - <i>43</i> °		Photo no <i>0810</i>			
Location: <i>b-8: 5.35</i> <i>105°</i> <i>6.4 m</i>			Sketch 		
Nature of the disturbance <i>burial</i> <i>may be decapitated 2 times</i>					
Comments					
Increment cores					
Side	<i>04</i>	<i>05</i>			
Height	<i>0.4</i>	<i>0.2</i>			
Tree number: <i>NEB6-10</i>			Social position:		
Species <i>Pin. unc.</i>		Circumference <i>77</i> <sup>24.5</sup> cm		<input type="checkbox"/> dominant <input type="checkbox"/> medium <input checked="" type="checkbox"/> co-dominant <input type="checkbox"/> suppressed <input type="checkbox"/>	
Tree height: - <i>7</i> m <i>8.2</i> - <i>43</i> °		Photo no <i>0811</i>			
Location: <i>b-9: 4.2 m</i> <i>245°</i>			Sketch 		
Nature of the disturbance <i>burial</i>					
Comments <i>slightly inclined</i> <i>towards snow</i>					
Increment cores					
Side	<i>04</i>				
Height	<i>0.4</i>				

Abbildung 36: Beispiel eines Erhebungsformulars

Der Stammumfang wurde mit einem Maßband in etwa 1,3 m Höhe gemessen. Aus dem gemessenen Umfang wurde dann der Brusthöhendurchmesser errechnet (kurz: BHD).

Die Baumhöhe wurde entweder direkt gemessen, wenn es die Höhe des Baumes erlaubte. Andernfalls wurde von einem geeigneten Punkt die Distanz zum Stammfuß und mit einem Inklinometer der Vertikalwinkel zwischen Stammfuß und Wipfel gemessen. Aus diesen Werten wurde die Baumhöhe errechnet. Diese Methode ist für diese Arbeit hinreichend genau.

Für die Vermessung der Lage der Bäume wurde Kompass, Inklinometer und Maßband verwendet. Konnte nur die Schrägdistanz gemessen werden, wurde mit dem Vertikalwinkel die Horizontaldistanz berechnet. Durch geeignete Punkte konnte die lokale Vermessung an eine Karte oder ein Luftbild angehängt werden. Solche Punkte waren etwa auffällige Bäume, Punkte am Straßenrand sowie die Ecke einer Hütte.

Für die Bezeichnung der Proben wurde folgende Vorgehensweise gewählt. Die ersten drei Stellen waren ein Projektkürzel, in diesem Fall „NEB“ als Abkürzung für „Neumann Bärenrufe“. Dann folgt die Angabe des Sektors, in welchem der beprobte Baum steht, in Form eines klein geschriebenen „a“, „b“ oder „c“. Nach einem Unterstrich folgt die Nummer des beprobten Baumes. Für jeden Sektor wurde neu zu zählen begonnen. Zuletzt wurde die Beprobungsrichtung angegeben. Hier wurde die Einteilung mit den Buchstaben „a“, „b“, „c“ und „d“ verwendet. Eine Probe in d-Richtung wurde von unten entgegen der Fallrichtung entnommen. Die c-Richtung ist dieser entgegengesetzt. Die a-Richtung ist hangparallel von orographisch rechts, während die b-Richtung wiederum dieser entgegengesetzt ist. Wurde der Baum durchgebohrt wurde das Kürzel „cd“ oder „ab“ verwendet. Ein Beispiel einer solchen Probenbezeichnung ist „NEBa\_25c“. Diese steht für eine Probe, welche in Fallrichtung gebohrt wurde. Es handelt sich um Baum Nummer 25 in Sektor A des Untersuchungsgebietes dieser Arbeit.

Die entnommenen Bohrkern wurden vorerst in Behältern aufbewahrt, welche aus zusammengeklebten Trinkstrohhalm bestanden und auf denen auch die Probenbezeichnung notiert werden konnte.

### **4.2 Vorbereitung der Proben**

Die entnommenen Bohrkern wurden auf Probenträger aus Holz aufgeleimt, mit Klebeband befestigt und beschriftet. Hierbei ist unbedingt darauf zu achten die Proben so auf die Träger zu leimen, dass die axiale Wuchsrichtung normal auf den Träger steht. Anderenfalls sind

Gefäße und Gewebe bei der weiteren Analyse schlecht oder gar nicht sichtbar. Ist der Bohrkern in sich gedreht und gewunden, so muss die Probe im eingerichteten, zurückgedrehten Zustand gut mit Klebeband fixiert werden. Andernfalls sind jene Bereiche der Probe, in denen die Wuchsrichtung nicht normal auf den Träger steht, schwieriger zu analysieren, da Gefäße schlecht sichtbar und der Kontrast leidet. Um die Jahrringstruktur sowie Gefäße und Gewebe unter dem Mikroskop sichtbar zu machen, wurden die Proben angeschliffen. Für diese Arbeit wurde ein feststehender Tellerschleifer verwendet. Um optimalen Kontrast zu erzielen ist eine gute Abstufung der Schleifblätter wichtig. Es wurde mit 160er, 240er und abschließend mit 600er Körnung gearbeitet. Während mit dem groben 160er Papier vorwiegend eine ebene Oberfläche hergestellt wurde, diente das anschließende Schleifen mit den feineren Körnungen vor allem um einen glatten, sauberen Abschluss zu erzielen. Schleifrückstände und Staub wurden mit Druckluft entfernt. Bei Harzflecken auf den Proben wurden Aceton verwendet.

### **4.3      *Analysieren der Jahrringe***

Die vorbereiteten Proben wurden mit einem Jahrringmesstisch des Typs LINTAB und einem Leica-Stereomikroskop unter Verwendung der Software „TSAPWin“ vermessen (Rinntech 2010). Die Genauigkeit der Messanlage beträgt 0,01 mm. Die Messungen wurden jeweils im Zentrum, beim ältesten, deutlich sichtbaren Jahrring, begonnen und mit dem Jahrring 2009 beendet. Der heurige Jahrring des Jahres 2010 wurde nicht gemessen, da das jährliche Wachstum zum Zeitpunkt der Probennahme noch nicht abgeschlossen war.

Generell wurde der Jahrringabstand parallel zu der radialen Wuchsrichtung gemessen. Eventuell vorhandene Markstrahlen oder die Wuchsrichtung der Zellreihen sind hier gute Anhaltspunkte.

Nach dem Messen wurden die Jahrringe ausgehend von der Borke gezählt. Mit einem feinen Bleistift wurde unter dem Mikroskop alle zehn Jahre eine Markierung gesetzt. Alle hundert Jahre (Jahrring 2000, 1900, etc.) wurden mit drei Punkten, alle fünfzig Jahre (Jahrring 1950, 1850, etc.) mit zwei Punkten sowie alle übrigen Dekaden mit einem Punkt markiert. Diese Markierungen sind bei der Orientierung auf der Probe hilfreich und sollen die weitere Arbeit an den Proben erleichtern.

Bei durchgebohrten Proben (z.B. c- und d-Probe auf einem Bohrkern) kann so auch vorab kontrolliert werden, ob einige der Jahrringe fehlen. Ist die Anzahl der händisch gezählten und/oder der gemessenen Jahrringen zwischen den beiden Seiten unterschiedlich, so kann das

als Indiz für fehlende Jahrringe gewertet werden. Diese Information kann bei der weiteren Arbeit hilfreich sein.

#### **4.3.1 Vorgangsweise bei Besonderheiten der Jahrringe**

Nicht immer einfach ist das Finden und Erkennen der Jahrringe. Fehlende bzw. sehr schmale Jahrringe oder intraannuelle Dichteschwankungen sind potentielle Fehlerquellen der Messungen.

Fehlende Jahrringe sind Jahrringe, die entweder komplett fehlen oder so schmal sind, dass sie bei der Messung nicht wahrgenommen und daher nicht gemessen werden. In einem solchen Jahr hat der Baum an der beprobten Stelle nur sehr wenig Energie und Material in Dickenwachstum investiert, sodass der Jahrring nicht zu sehen ist und „fehlt“ (Schweingruber 1983). Hat eine Probe fehlende Jahrringe kann dies erst im nächsten Arbeitsschritt bei der Synchronisierung überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden.

Intraannuelle Dichteschwankungen erscheinen hingegen als dunkle, Jahrringen ähnliche Strukturen. Diese „falschen Jahrringe“ wurden als Anzeichen extremer klimatischer Schwankungen verstanden und interpretiert (u.a. in Wimmer und Strumia, 1998). Eine sichere Unterscheidung von echten Jahrringen und diesen Dichteschwankungen ist nicht immer zweifelsfrei möglich, allerdings gibt es einige Anhaltspunkte, die in diesem Zusammenhang helfen. Jahrringe weisen einen relativ abrupten Übergang vom Spätholz eines Jahres zum Frühholz des darauf folgenden Jahres auf. Abgeplattete Tracheiden mit dicken Zellwänden werden plötzlich von großlumigeren, nicht abgeplatteten Tracheiden mit wenig verdickten Zellwänden abgelöst. Bei Dichteschwankungen sind diese Übergänge zwischen den unterschiedlichen Gefäßen hingegen eher fließend und weniger abrupt. Auch erscheint ein Jahrring meist gleichmäßig und glatt, während Dichteschwankungen sich oft wellig und unregelmäßig präsentieren (Schweingruber 2001).

Werden diese „falschen Jahrringe“ dennoch gezählt, bedeutet das einen Fehler in der Messung. Der Zuwachs eines Jahres wird in dem Fall auf zwei aufgeteilt. Wie auch bei fehlenden Jahrringen muss ein solcher Fehler bei der Synchronisierung behoben werden.

Besondere Merkmale der Jahrringe wie Ansatz von Druckholz, Anhäufungen von Harzkanälen, Kallusgewebe, besondere Zellstruktur oder ähnliches wurden während der Messungen notiert.

Manche Proben zeigten unregelmäßige, wellige Jahrringe. Dieser so genannte „Haselwuchs“ tritt meist nahe von Markstrahlen auf (Schweingruber 2001). In diesem Fall wurde der

Jahringabstand an einer Stelle gemessen, die von dem unregelmäßigen Wuchs unbeeinflusst ist.



Abbildung 37: links oben Jahringmessanlage mit Stereoskop, rechts oben beschriftete Probe auf dem Messtisch, links unten Bild umgeleitet auf Fernseher, rechts unten Programm TSAPWin

### **4.4 Überprüfung und Synchronisierung der Datenreihen**

Die Überprüfung und Synchronisierung ist ein wichtiger Arbeitsschritt um die generierten Messreihen der Jahringabstände zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren. Üblicherweise wird dieser Schritt mit Hilfe einer so genannten Referenzkurve durchgeführt. Für die Erstellung dieser Referenzkurve werden meist eigens, von dem jeweiligen Prozess unbeeinflusste Bäume beprobt, diese Proben vermessen und aus den Messdaten durch Mittelwertbildung eine Mittelkurve generiert. Zahlreiche Publikationen und Forschungsarbeiten haben diese Vorgehensweise empfohlen und angewandt (z.B. Stokes & Smiley, 1968, Schweingruber 1983, Stoffel & Bollschweiler 2008, Arbellay et al. 2010).

Für diese Arbeit konnten keine unbeeinflussten Spirken beprobt werden. Alle Bäume dieser Art wuchsen auf dem Kegel und erschienen mehr oder weniger stark von dessen Aktivität beeinflusst. Aus diesem Grund wurde bei dieser Arbeit für die Synchronisierung eine

Mittelkurve erstellt mit den Messdaten beeinflusster Bäume verwendet. Es besteht die Annahme, dass die Störungen des Wachstums, verursacht durch Murgänge, gegenüber den klimatischen Schwankungen der Jahrringbreite nur wenig ins Gewicht fallen, wenn für die Erstellung der Referenzkurve eine große Anzahl an Proben verwendet wird. Dies erscheint plausibel, da Murgänge meist nur Teilbereiche des Untersuchungsgebietes beeinflussen, während weite Teile davon unbeeinflusst bleiben.

### **4.4.1 Mittelkurve aus vom Prozess beeinflussten Proben**

Die erzeugten Datenreihen wurden mit dem Programm „TSAPDOS“ weiter bearbeitet, der DOS-Version des Jahrringanalyse-Programm TSAPWin (Rinntech 2010).

Ziel ist die Erstellung einer Mittelkurve, die als Referenzkurve die Korrektur der Messreihen ermöglicht. Dafür wurde in mehreren Schritten für jeden Sektor einzeln eine Auswahl von Messreihen selektiert und mit dieser durch Mittelwertbildung eine Mittelkurve gebildet. Die genaue Vorgehensweise ist in Anhang A beschrieben.

Durch die Mittelwertbildung mit zahlreichen Datenreihen sollen diese Kurven nun die umweltbedingten, klimatischen Wachstumsschwankungen der Vergangenheit wiedergeben. Für Störungen, die nur einzelne Bäume betreffen, wie etwa Insektenfraß, Wildschäden oder Murgänge, wird angenommen, dass diese die Mittelkurven nicht oder nur schwach beeinflussen.

Im Folgenden wird der Begriff Referenzkurve für die ermittelte Mittelkurve verwendet. Eigentlich handelt es sich aber bei der Mittelkurve um keine Referenzkurve, da für deren Erzeugung keine unbeeinflussten Referenzbäume verwendet wurden, sondern ausgewählte beeinflusste Bäume.

### **4.4.2 Synchronisierung der Messkurven**

Mit der ermittelten Referenzkurve wurde nun versucht die Datenreihen der übrigen Proben zu datieren und gegebenenfalls auf Messfehler, fehlende oder doppelte Jahrringe zu überprüfen. Für jeden Baum wurden die Datenreihen untereinander und mit der Referenzkurve im Programm „TSAPDOS“ statistisch und visuell verglichen. Wiederum wurde auf die oben genannten statistischen Anforderungen geachtet.

Wenn etwa der letzte Jahrring nicht auf das Jahr 2009 sondern 2008, 2007 oder gar früher datiert wurde, wurde dies als Indiz für doppelte oder fehlende Jahrringe nahe der Borke

verstanden. In einem solchen Fall erschienen auch dann meist die Datenreihe und die Referenzkurve zueinander verschoben. Bei manchen Proben war die Übereinstimmung mit der Referenzkurve für einen Abschnitt der Datenreihe sehr gut, während ein anderer Abschnitt zur Referenzkurve verschoben erschien. Dies war dann ein Indiz, dass zwischen diesen zwei Abschnitten Jahrringe fehlen oder doppelte Jahrringe gemessen wurden.

Derartige Fehler wurden auf den Proben wenn möglich verifiziert und dann die Messreihen korrigiert. Etwa eine Region mit sehr schmalen Jahrringen wurde als gutes Indiz für einen oder mehrere fehlende Jahrringe gesehen. Ein Jahrring, welcher bei näherer Betrachtung nur eine Dichteschwankung zu sein scheint, legt nahe, dass an dieser Stelle ein Jahrring zu viel gemessen wurde. Wenn die Position einer solchen Fehlerquelle auf der Probe mit jener aus dem visuellen Vergleich der Messkurven und der Referenzkurve korreliert, wurde die Messreihe korrigiert. Im Falle von fehlenden Jahrringen wurden diese mit einer Breite von 0,01 mm eingefügt.

Wenn eine Verifizierung eines Fehlers auf der Probe nicht möglich war, wurde von einer Korrektur Abstand genommen. Manchmal etwa ließ ein Vergleich von Messreihe und Referenzkurve einen fehlenden Jahrring vermuten, aber auf der Probe war keine Stelle zu finden, wo Jahrringe fehlen könnten. Zum Beispiel präsentierte sich die Jahrringstruktur ohne auffällige Bereiche mit schmalen Jahrringen und die Jahrringabstände waren eher breit. Dass auf einen breiten Jahrring folgend plötzlich ein sehr schmaler, nicht sichtbarer Jahrring gebildet wird und im Jahr darauf das Wachstum wieder stark einsetzt, ist eher unwahrscheinlich.

Auch wurden, wenn eine Datierung mit der Referenzkurve nicht möglich war und auch kein optischer Zusammenhang der Datenreihen bestand, keine weiteren Korrekturen vorgenommen. Manche Proben waren etwa so stark gestört, dass sie kaum Ähnlichkeit mit der Referenzkurve aufwiesen und so keine sichere Datierung erlaubten. Andere Proben waren schon so stark zersetzt und morsch, sodass eine Auswertung nicht möglich war oder stark fehlerbehaftet wäre. Bei diesen Proben wurde von einer weiteren Analyse Abstand genommen. Bei manchen Proben waren die Teile der Bohrprobe, welche nahe dem Zentrum des Baumes lagen, schon zersetzt und morsch. In diesem Fall wurde in diesem Bereich auf eine weitere Korrektur verzichtet.

### **4.5 Altersbestimmung der beprobten Bäume**

Durch Zählen der Jahrringe von beprobten Bäumen kann das Alter der beprobten Bäume bestimmt werden. Dieses ist aber nur als Minimalalter zu verstehen, da nicht alle vorhandenen

Jahrringe eines Baumes durch die Beprobung erfasst werden können (Bollschweiler et al. 2008a, Mayer et al. 2010).

Da nicht auf Bodenhöhe beprobt werden kann, werden die unterhalb der Beprobungshöhe liegenden Jahrringe nicht erfasst. Auch wird bei einer Beprobung mittels Zuwachsbohrer gelegentlich das Mark verfehlt, wodurch dann Jahrringe auf der Probe fehlen.

Für die Korrektur dieser Fehler wurden Methoden entwickelt. Für die Korrektur fehlender Jahrringe beim Mark kann die Anzahl der fehlenden Jahrringe mit Hilfe transparenter Folien mit konzentrischen Kreisen geschätzt werden (Bosch & Gutiérrez, 1999). Mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate errechnet aus Baumhöhe und Jahrringanzahl kann eine Korrektur der Beprobungshöhe vorgenommen werden (McCarthy et al. 2001).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine dieser Korrekturen durchgeführt, daher sind die Altersangaben nur als Minimalalter zu verstehen und können unter Umständen um mehrere Jahrzehnte vom tatsächlichen Alter abweichen. Auf Basis der punktuellen Daten der beprobten Bäume wurde eine räumliche Interpolation der Altersverteilung für das Untersuchungsgebiet vorgenommen.

Aufgrund der Ungenauigkeiten ist die gewählte Einteilung der Altersklassen eher grob gewählt. Nichtsdestotrotz lässt sich ein Überblick über die Altersverteilung des Bestandes im Untersuchungsgebiet gewinnen.

## **4.6 Identifizierung von Ereignisjahren**

### **4.6.1 Wachstumsreaktionen**

Bei der visuellen Analyse der Proben und der dazugehörigen Messreihen der Jahrringabstände wurde nach Wachstumsreaktionen gesucht, die durch einen Murgang hervorgerufen wurden. So wurde auf abrupte Zuwachssprünge (GI), Zuwachseinbrüche (GD), Ansatz von Reaktionsholz (CW), traumatische Harzkanalreihen (TRD) sowie auf Verwundungen bzw. Kallusgewebe geachtet (injury).

Eine weitere Wachstumsreaktion, die bei dieser Arbeit verwendet wurde, war das Absterben des Baumes. Erschien der Baum bereits abgestorben (keine oder nur wenige gelbliche Nadeln in der Krone) und wurde bei der Synchronisierung der letzte Jahrring nicht auf das Jahr 2009 datiert, so kann davon ausgegangen werden, dass der Baum sein Wachstum eingestellt hat. Dies kann als extreme Form eines Zuwachseinbruches verstanden werden. Hierfür wurde die Wachstumsreaktion „dead“ verwendet.

Um eine Differenzierung der Stärke oder Intensität einer Reaktion zu ermöglichen, wurden den Wachstumsreaktionen verschiedene Intensitäten zugewiesen.

Es wurde keine rein quantitative Einteilung der Intensität von Zuwachsreduktionen angewandt, wie sie etwa von Schweingruber und Strunk empfohlen und verwendet wurde (Schweingruber et al. 1990, Strunk 1995). Diese Methode verwendet a priori festgelegte Grenzwerte, um Zuwachsreaktionen Intensitäten zuzuweisen. Strunk (1995) benutzt etwa ein System mit vier Intensitätsstufen von eins bis vier. So erhält ein Zuwachseinbruch, wenn er mehr als drei Jahre andauert und zwischen 40-55 % des Normalwuchses beträgt, die Intensität eins (Strunk 1995).

Bei dieser Arbeit wurde vielmehr eine flexible Einteilung der Intensität von Zuwachsreaktionen im Sinne der Empfehlungen von Stoffel und Bollschweiler (2008) angewandt. Argumentiert wird das durch die vorher erwähnten wenig flexiblen, weil a priori festzulegenden Grenzwerte. Das Wachstum von Bäumen ist bekanntlich abhängig von Art, Standort und anderen biotischen und abiotischen Faktoren. So erscheint es wenig sinnvoll Grenzwerte, welche für andere Untersuchungsgebiete mit womöglich gänzlich anderen Rahmenbedingungen entwickelt wurden, auf die Proben dieser Arbeit anzuwenden. Hinzu kommt, dass die für diese Arbeit verwendete Spirke noch wenig erforscht wurde hinsichtlich der Sensibilität gegenüber Störungen wie Murgängen oder Standortfaktoren wie Wasserverfügbarkeit. Die flexible Einteilung, welche bei der Analyse der Proben angewandt wurde, erlaubt eine Differenzierung der Intensität der Beeinflussung eines beprobten Baumes durch ein Ereignis und so eine Reihung der Wachstumsreaktionen hinsichtlich ihrer Stärke und Verlässlichkeit (Stoffel & Bollschweiler 2008).

Starke abrupte Zuwachsänderungen oder Druckholzansatz, die über mehrere Jahre andauerten, wurden mit der Intensität 3 bezeichnet. Weniger deutlich ausgeprägte Reaktionen, welche nur schwächer ausfielen und sich über kürzere Zeiträume erstreckten, wurde die Intensität 1 zugewiesen. Reaktionen, die in ihrer Ausprägungen zwischen diesen beiden Intensitätsstufen lagen, erhielten die Intensität 2.

Bei Verwundungen oder TRD wurde dem Ausmaß entsprechend die Intensität abgeschätzt. Der Wachstumsreaktion „dead“ wurde Intensität 3 zugeteilt, da es sich im Prinzip um einen sehr starken Zuwachseinbruch handelt.

Das Ergebnis der Analyse der Proben und deren Messkurven war eine Liste von Wachstumsreaktionen, welche die Art der Wachstumsreaktion, den Zeitpunkt der Reaktion sowie deren Intensität enthält.

Bei Reaktionen wie Zuwachseinbrüchen oder Zuwachsschüben wurde überprüft, ob vergleichbare Veränderungen auch in der Referenzkurve sichtbar waren. Wenn dies der Fall war, so kann dies ein Hinweis sein, dass die Reaktion eher klimatisch bedingt war als durch einen Murgang. Die Verlässlichkeit solcher Reaktionen war dann geringer und sie wurden nur mit Vorbehalten für die Rekonstruktion der Ereignisjahre verwendet.

Für die Illustrierung der bei dieser Arbeit angewandten Methodik finden sich in Anhang B Bilder von Wachstumsreaktionen und den dazugehörigen Messkurven der Jahrringbreite.

### **4.6.2 Ereignisjahre**

Die beschriebenen Wachstumsreaktionen wurden nun Ereignisjahren zugeordnet. Im Idealfall konnten anhand verlässlicher Wachstumsreaktionen einzelne Ereignisjahre identifiziert und dann andere Wachstumsreaktionen diesen zugeordnet werden.

Generell wurden Wachstumsreaktionen wie Verwundungen oder Kallusgewebe als die besten Anzeichen für ein Ereignisjahr gewertet, da diese Reaktionen in der Regel ohne zeitliche Verzögerung entstehen. TRD und Druckholzbildung sind in dem Zusammenhang ähnlich zu bewerten, da diese mit geringer zeitlicher Verzögerung nach einem Ereignis gebildet werden, wie bereits in Kapitel 2.5.2 und 2.5.3 beschrieben wurde.

Reaktionen wie Zuwachsschübe oder Zuwachseinbrüche hingegen können eine zeitliche Verzögerung in Bezug auf das auslösende Ereignis haben. Besonders Zuwachsschübe können um mehrere Jahre verzögert einsetzen, da ein Baum in der Regel nur langsam auf positive Veränderung der Wachstumsbedingungen reagiert. In dieser Untersuchung wurde angenommen, dass Druckholzbildung und Wachstumseinbrüche um ein bis maximal zwei Jahre verzögert einsetzen, Wachstumsschübe um maximal drei Jahre.

Zeigten Bäume in einem Jahr Verletzungen oder Kallusgewebe, so wurde für dieses Jahr ein Ereignis angenommen. Gab es keine Verletzungen, dafür aber in einem Jahr mehrere Zuwachseinbrüche oder Wachstumsschübe, so wurde der Zeitpunkt des Ereignisses auf Jahr zuvor gesetzt. Bäume, die in den darauf folgenden drei Jahren mit Wachstumsschüben (Zuwachseinbrüche innerhalb zwei Jahre) reagiert haben, wurden wahrscheinlich ebenfalls von dem Ereignis beeinflusst. Andernfalls wurden Reaktionen nicht dem Ereignis zugeordnet.

Für die Ereignisjahre wurde ein Indexwert  $I_t$  nach Shroder (1978) berechnet.

Die verwendete Formel ist,

$$I_t = \left( \sum_{i=1}^n R_t / \sum_{i=1}^n A_t \right) \times 100 \quad (1)$$

wobei  $R_t$  die Anzahl Bäume mit Reaktion und  $A_t$  die Gesamtanzahl verfügbarer beprobter Bäume zum Zeitpunkt  $t$  ist (Shroder 1978).

Ein Indexwert von 10 bedeutet somit, dass 10% der beprobten Bäume im gesamten Untersuchungsgebiet eine Reaktion in Zusammenhang mit dem jeweiligen Ereignis zeigen. Dieser gibt somit das Verhältnis von Bäumen, die auf das jeweilige Ereignis reagiert haben, zur Gesamtzahl beprobter Bäume wieder. Da das Alter der Bäume nicht gleich ist, wird die Anzahl der verfügbaren beprobten Bäume immer geringer, je weiter man in Vergangenheit blickt. Dieser Umstand wird bei der Indexerstellung berücksichtigt.

Mayer et al. (2010) verwendeten einen Indexwert  $I_t$  von zumindest 4% als Grenzwert für die Identifizierung eines Ereignisjahres.

Für die vorläufigen Ereignisjahre wurde nun der Indexwert, die Art und Intensität der Reaktionen sowie die räumliche Verteilung der beeinflussten Bäume überprüft. Im Idealfall gibt es für ein Ereignisjahr zahlreiche unterschiedliche Reaktionen der Intensität zwei oder drei und die beeinflussten Bäume liegen räumlich konzentriert etwa gehäuft oder in einem Streifen angeordnet. Scheinbar hat ein Ereignis einige Bäume in ihrem Wachstum deutlich beeinflusst, während andere Bäume unbeeinflusst blieben. Wenn sowohl Zuwachsschübe wie auch Zuwachseinbrüche vorhanden sind, so ist eine klimatische Ursache unwahrscheinlich.

Wenn  $I_t$  kleiner 4% war und diese Bäume nur schwache Reaktionen gezeigt haben, ist keine verlässliche Aussage über ein Ereignis in diesem Jahr möglich und das Ereignisjahr wurde von der Liste gestrichen. Als schwache Reaktionen gewertet wurden in dem Zusammenhang Zuwachsschübe und Zuwachseinbrüche mit einer Intensität von 1.

Die meisten Ereignisjahre liegen allerdings zwischen diesen zwei gegensätzlichen Szenarien. So wurde von Fall zu Fall entschieden. Generell wurde ein Ereignisjahr nur dann als verlässlich gesehen, wenn zumindest eine stärkere Reaktion (Intensität zwei oder drei) vorhanden war und insgesamt zumindest fünf Bäume Reaktionen aufwiesen, welche von diesem Ereignis ausgelöst worden sein könnten. Eine deutliche, starke Wachstumsreaktion, auch eine Verletzung, eines einzelnen Baumes ist jedenfalls nicht ausreichend, um ein Ereignis zu belegen.

Die gewählte Vorgehensweise bei der Identifizierung von Ereignisjahren deckt sich im Prinzip mit den Empfehlungen von Stoffel und Bollschweiler (2008). Die Vorgehensweise basiert dabei mehr auf einem „semi-quantitativen“ Ansatz für die Identifizierung von Ereignissen (Stoffel & Bollschweiler 2008).

#### 4.7 Identifizierung von Lawineneignissen

Da die Erstellung einer Ereignischronik des Untersuchungsgebiets möglichst ohne Lawineneignisse das Ziel ist, stellen Reaktionen auf Lawinen ein unerwünschtes Störsignal dar.

Eine Filterung derartiger Ereignisse ist daher erforderlich. Diese Aufgabenstellung wurde bereits von Forschungsarbeiten behandelt (Stoffel et al. 2006, Szymczak et al. 2010). Bei diesen Arbeiten wurde die Lage von traumatischen Harzkanälen innerhalb eines Jahrringes für die intra-saisonale Datierung eines Ereignisses verwendet. Wenn Harzkanäle am Beginn des Jahrringes zu finden sind, also während der Ruhephase (D) oder im frühen Frühholz (EE) gebildet wurden (siehe Abbildung 38), so wurden deren Bildung wahrscheinlich von einer Lawine bewirkt (Stoffel et al. 2006).

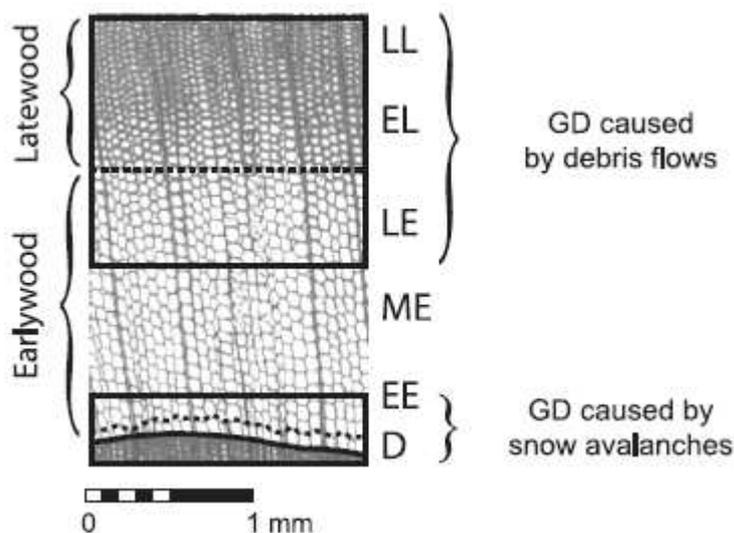


Abbildung 38: Bild eines Jahrringes links mit Abgrenzung von Früh- und Spätholz sowie genauere Einteilung rechts (aus Stoffel et al. 2006)

Da das Untersuchungsgebiet hauptsächlich von Spirken bewachsen ist und diese Art keine traumatischen Harzkanäle bildet (Philips & Crouteau 1999), ist diese Methodik für diese Arbeit nicht geeignet und eine andere Methodik ist erforderlich.

Als Alternative wurden in Sektor C eigens Bäume beprobt, deren Wuchs auf eine Beeinflussung von Lawinen und nicht von Murgängen schließen lässt (siehe auch Kapitel

4.1). Solche Bäume erschienen geneigt bzw. wiesen Wipfel- oder Astbruch auf. Die erwarteten Wachstumsreaktionen auf eine Beeinflussung durch eine Schneelawine sind Verwundungen, Druckholzansatz, exzentrischer Wuchs und Wachstumseinbrüche (Larocque et al. 2001, Stoffel et al. 2006, Stoffel & Bollschweiler 2008).

Die Analyse von Proben aus diesem Sektor soll es erlauben, einzelne Ereignisse als Lawinen zu identifizieren und damit Lawinenereignisse aus der Ereignischronik zu filtern.

## **4.8 Sonstige einzugsgebiets-bezogene Daten**

### **4.8.1 Luftbilder der Bärenrüfe**

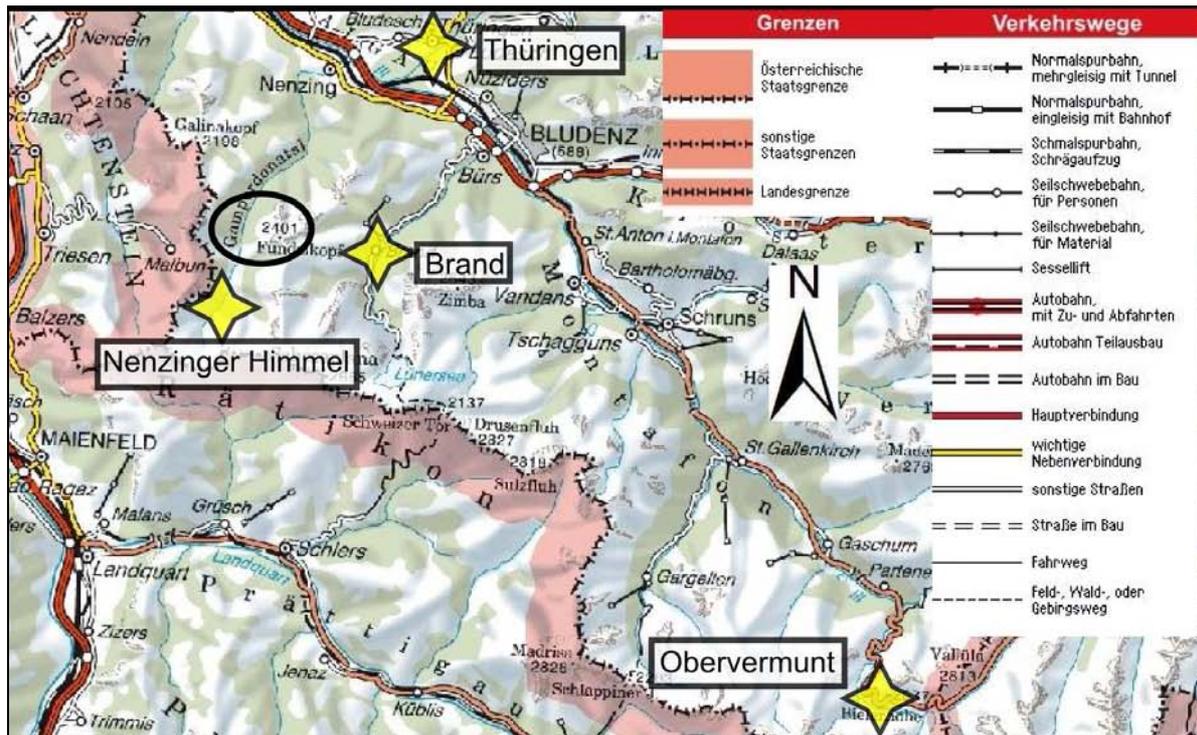
Bei der Feldarbeit wie auch bei der weiteren Analyse des Probenmaterials und Interpretation der Ergebnisse, wurden Luftbilder des Untersuchungsgebietes verwendet. Es sind Luftbilder der Bärenrüfe aus den Jahren 1950, 1973, 2001, 2005 und 2009 verfügbar. Diese stammen aus dem Archiv des forsttechnischen Dienstes der Wildbach- und Lawinenverbauung, Vorarlberg.

Durch Vergleich historischer und aktueller Luftbilder können Informationen über Veränderungen der Dynamik des Einzugsgebietes, Ereignisse in der Vergangenheit sowie über Änderungen der Vegetationsstruktur gewonnen werden.

### **4.8.2 Analyse von Niederschlagsdaten**

Mittels Niederschlagsdaten soll einerseits der Versuch unternommen werden potentiell ereignisauslösende Niederschlagsereignisse zu identifizieren. Andererseits soll überprüft werden, ob Wachstumsreaktionen (vor allem Zuwachseinbrüche) mit Trockenperioden korrelieren.

Es wurden meteorologische Daten von drei Messstationen des hydrographischen Dienstes (Thüringen, Brand, Nenzinger Himmel) sowie einer Station der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Obervermunt) erhoben (siehe Abbildung 39).



**Abbildung 39: Lage der verwendeten meteorologischen Messstationen, Untersuchungsgebiet eingekreist, Kartenausschnitt ÖK 500 (Quelle: BEV Wien)**

Informationen zu den Messstationen sind in Tabelle 2 gegeben. Die Station Nenzinger Himmel liegt mit etwa 3 km Entfernung dem Untersuchungsgebiet am nächsten und hat eine ähnliche Höhenlage wie das Untersuchungsgebiet, allerdings wurden hier die Messungen erst im Jahr 2000 aufgenommen. Die anderen Stationen sind unterschiedlich weit entfernt, haben aber längere Aufzeichnungen.

	Thüringen	Brand	Nenzinger Himmel	Obervermunt
Betreiber	Hydrograph. Dienst	Hydrograph. Dienst	Hydrograph. Dienst	ZAMG
Art der Daten	Niederschlag, Temperatur	Niederschlag	Niederschlag	Temperatur
Messperiode	1907-2009, 1984-2009	1961-2009	2000-2009	1963-1996
Entfernung zum Untersuchungsgebiet	13 km	6 km	3 km	37 km
Seehöhe der Station	550 m	1005 m	1305 m	2040 m

**Tabelle 2: Informationen zu den verwendeten Messstationen**

### 4.8.3 Ereignisauslösende Niederschläge

Die Bedeutung von konzentrierten intensiven Starkregenereignissen als Auslöser für Murgänge wurde von zahlreichen Autoren in deren Publikationen betont (u.a. Rapp 1987, Cannon & Ellen 1988, Strunk 1995, Jakob & Hungr 2005).

Für die Identifizierung ereignisauslösender Niederschläge werden zwei Grenzwerte des Tagesniederschlags verwendet. Ein Tagesniederschlag von über 30 mm soll laut Fliri (1962) morphologisch wirksam sein. In einer anderen Arbeit wird hingegen ein Wert von 50 mm als Schwellenwert für morphologisch wirksame Tagesniederschläge empfohlen (Wehry 1967). Dies deutet daraufhin, dass dieser Wert je nach Standort und Rahmenbedingungen variiert.

Diese zwei Grenzwerte, 30 und 50 mm, werden in Folge bei der Analyse der Niederschlagsdaten verwendet.

Um zu unterscheiden, ob es sich bei einem Niederschlagsereignis um Regen oder Schnee gehandelt hat, werden Temperaturmessdaten der Station Thüringen (Seehöhe 550 m) sowie der Station Obervermunt (Seehöhe 2040 m) verwendet. Für diese Stationen stehen Temperaturmessungen zu den Zeiten 7:00, 14:00 und 21:00 zur Verfügung. Leider ist die Zeitspanne, für die Messdaten verfügbar sind, nicht sehr lang, für die Station Thüringen 1984 bis 2009, für die Station Obervermunt 1963 bis 1996.

Aus diesen Daten wurden Tagesmitteltemperaturen errechnet mit der folgenden Formel.

$$T_m = \frac{T_{07} + T_{14} + 2 \cdot T_{21}}{4}$$

(Landsberg 1958, Weiss & Hays, 2005)

Die Messstation Thüringen liegt mit 550 m deutlich niedriger als das Einzugsgebiet der Bärenrufe (mittlere Höhe des Sammelgebietes etwa 1850 m). Die Differenz beträgt etwa 1300 m. Da die Lufttemperatur generell mit der Höhe abnimmt, ist die Messung auf 550 m Höhe nicht aussagekräftig für das Untersuchungsgebiet.

Die Möglichkeit der Interpolation der Temperatur auf ein höher gelegenes Gebiet ist schwierig und fehlerbehaftet. Unter der Annahme eines mittleren geometrischen Temperaturgradienten von 0,65 K pro 100 m Höhendifferenz wären die Messdaten der Station Thüringen um etwa 8,5 K zu reduzieren. Diese einfache Reduktion berücksichtigt allerdings keine komplexeren meteorologischen Phänomene wie Inversions- oder Föhnlagen, die großen Einfluss auf die Lufttemperatur haben können. Vor allem im Winter sind solche Wetterphänomene häufig. So soll für den Monat Januar der Temperaturgradient etwa 3 K pro

100 m betragen, jedoch ist dieser sehr variabel und kann je nach Wetterlage stark abweichen (mündlich Dr. Herbert Formayer).

Aufgrund dieser Unschärfen wird für diese Arbeit keine Interpolation der Temperaturdaten vorgenommen, sondern die unveränderten Messdaten der beiden Stationen verwendet um eine Unterscheidung zwischen Schnee und Regen zu treffen. Die Messstation Obervermunt liegt mit 2040 m auf einer ähnlichen Höhe wie das obere Sammelgebiet der Bärenrufe. Somit ist mit diesen Daten eine einigermaßen verlässliche Aussage über die meteorologische Situation im Untersuchungsgebiet möglich. Wenn bei der Station Obervermunt eine Tagesmitteltemperatur von unter 0 °C gemessen wurde, wird davon ausgegangen, dass der Niederschlag im Sammelgebiet der Bärenrufe zumindest größtenteils in fester Form (Schnee, Hagel) gefallen ist. Wenn nur Daten der Station Thüringen vorhanden sind, wurde als Kriterium eine Tagesmitteltemperatur der Station Thüringen von unter 4 °C verwendet. Für den Zeitraum, in dem Temperaturdaten beider Stationen vorliegen, zeigte sich, dass bei einem Wert von unter 4 °C bei der Station Thüringen, in Obervermunt durchwegs Temperaturen unter dem Gefrierpunkt gemessen wurden (siehe Kapitel 5.7.1).

#### **4.8.4 Trockenperioden und Jahrringbreite**

In mehreren dendroklimatologischen Untersuchungen an der Waldkiefer wurde auf den Zusammenhang zwischen Jahrringbreite und Niederschlag hingewiesen. Besonders der Niederschlag in den Frühlingsmonaten März bis Mai zeigt eine positive Korrelation mit der Jahrringbreite des kommenden Jahres (Rigling et al. 2002, Eilmann et al. 2009).

Untersuchungen an Waldkiefer haben gezeigt, dass ausgeprägte Trockenperioden ein chlorotisches Erscheinungsbild der betroffenen Bäume, abrupte anhaltende Zuwachsreduktionen und auch ein Absterben der Bäume nach sich ziehen können (Cech & Tomiczek 1996, Oberhuber et al. 2001).

Reaktionen wie Zuwachsreduktionen oder Absterben wurde bei der Rekonstruktion der Ereignisaktivität im Untersuchungsgebiet verwendet. Um den etwaigen Einfluss von Trockenperioden auf die rekonstruierte Ereignischronik zu prüfen, wird ein Vergleich der Variabilität des Niederschlages mit den rekonstruierten Ereignisjahren unternommen. Zuwachseinbrüche in der Jahrringstruktur von Proben, die als Reaktion auf einen Murgang interpretiert wurden, können auch durch eine Trockenperiode verursacht worden sein.

Verglichen wird mit Niederschlagssummen der Monate März, April und Mai sowie mit der Niederschlagssumme der Wachstumsperiode. Es wird angenommen, dass in den Monaten

April bis September der Großteil des Wachstums der Bäume im Untersuchungsgebiet stattfindet. Diese deckt sich mit Angaben in der Literatur (u.a. Tranquillini 1979).

Daten der Stationen Thüringen, Brand und Nenzinger Himmel wurden hierfür verwendet. Um die Werte der drei Stationen besser vergleichen zu können, wurde eine relative prozentuelle Abweichung von einem Mittelwert berechnet. Hierfür wurde der Mittelwert der Monatssummen für die jeweilige Station verwendet, die Monatsmittelwerte. Die Differenz von Monatssumme und Mittelwert wird durch den Mittelwert dividiert. Ein Wert von 1 bedeutet somit eine Abweichung vom Mittelwert um 100 %.

## 5. Resultate

### 5.1 Beprobte Bäume und Jahrringanzahl

Für diese Arbeit wurden insgesamt 206 Bäume beprobt, davon waren 201 Spirken und 5 Fichten. Bei der Probennahme wurden vorwiegend mit dem Zuwachsbohrer Bohrkerne entnommen. In Sektor A und B wurden einige Stammscheiben und Keile genommen. In Sektor A waren zahlreiche Spirken bereits abgestorben, so ist der Anteil an Stammscheiben hier besonders hoch(siehe Tabelle 3).

Beprobte Bäume			Entnommene Proben		
	Spirke	Fichte	Bohrkerne	Keile	Stammscheiben
Sektor A	64	3	67	1	38
Sektor B	82	2	149	1	9
Sektor C	55	0	110	0	0
Insgesamt	201	5	326	2	47

**Tabelle 3: Anzahl beprobter Bäume und entnommener Proben nach Sektoren unterteilt**

Tabelle 4 und Abbildung 40 lassen Unterschiede zwischen den Sektoren hinsichtlich der Jahrringanzahl der beprobten Bäume erkennen. Während der Median (das 50%-Quantil) von Sektor A und B ähnlich groß ist (118 bzw. 104), liegt dieser in Sektor C mit 214 deutlich höher. Auch die Quartile der Stichprobe von Sektor C liegen höher als in den anderen Sektoren. Hinsichtlich der Standardabweichung sind keine großen Unterschiede zwischen den Sektoren zu beobachten.

Gezählte und gemessene Jahrringe der Proben				
	Median	Standard- abweichung	Minimal- wert	Maximal- wert
<b>Sektor A</b>	118	68	47	372
<b>Sektor B</b>	104	70	43	450
<b>Sektor C</b>	214	65	70	364

**Tabelle 4: Median, Standardabweichung, Maximal- und Minimalwert der Jahrringanzahl der Proben, in Sektoren unterteilt**

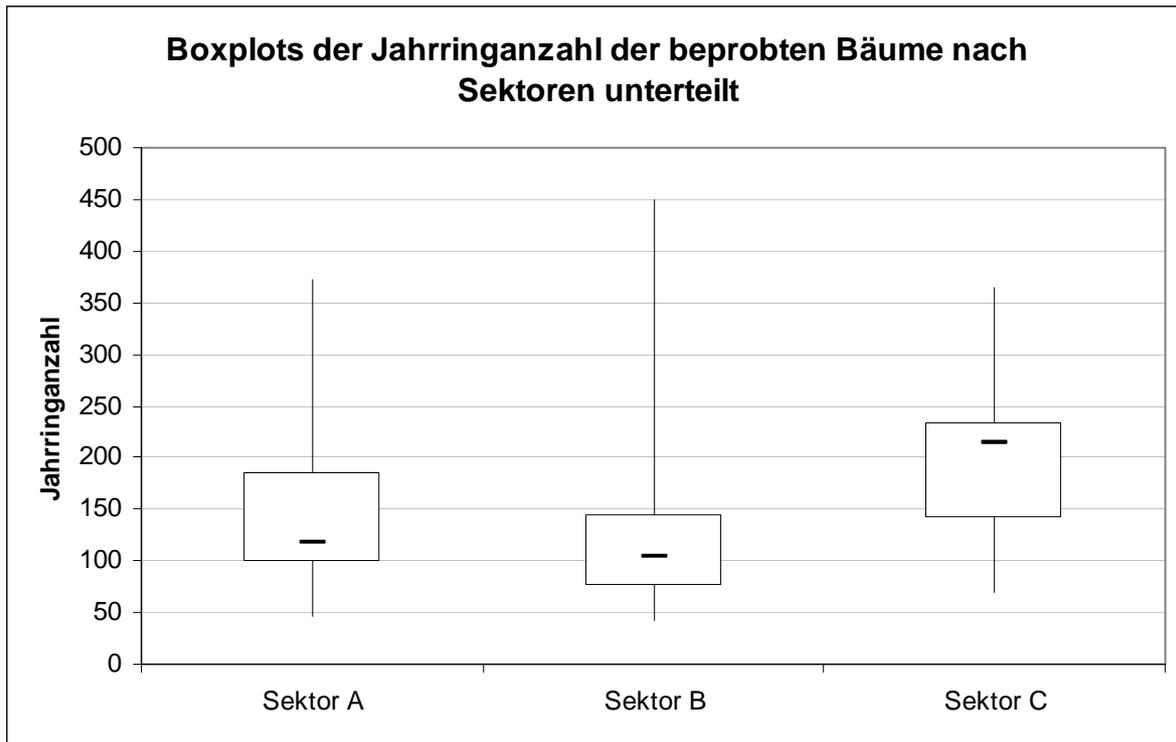
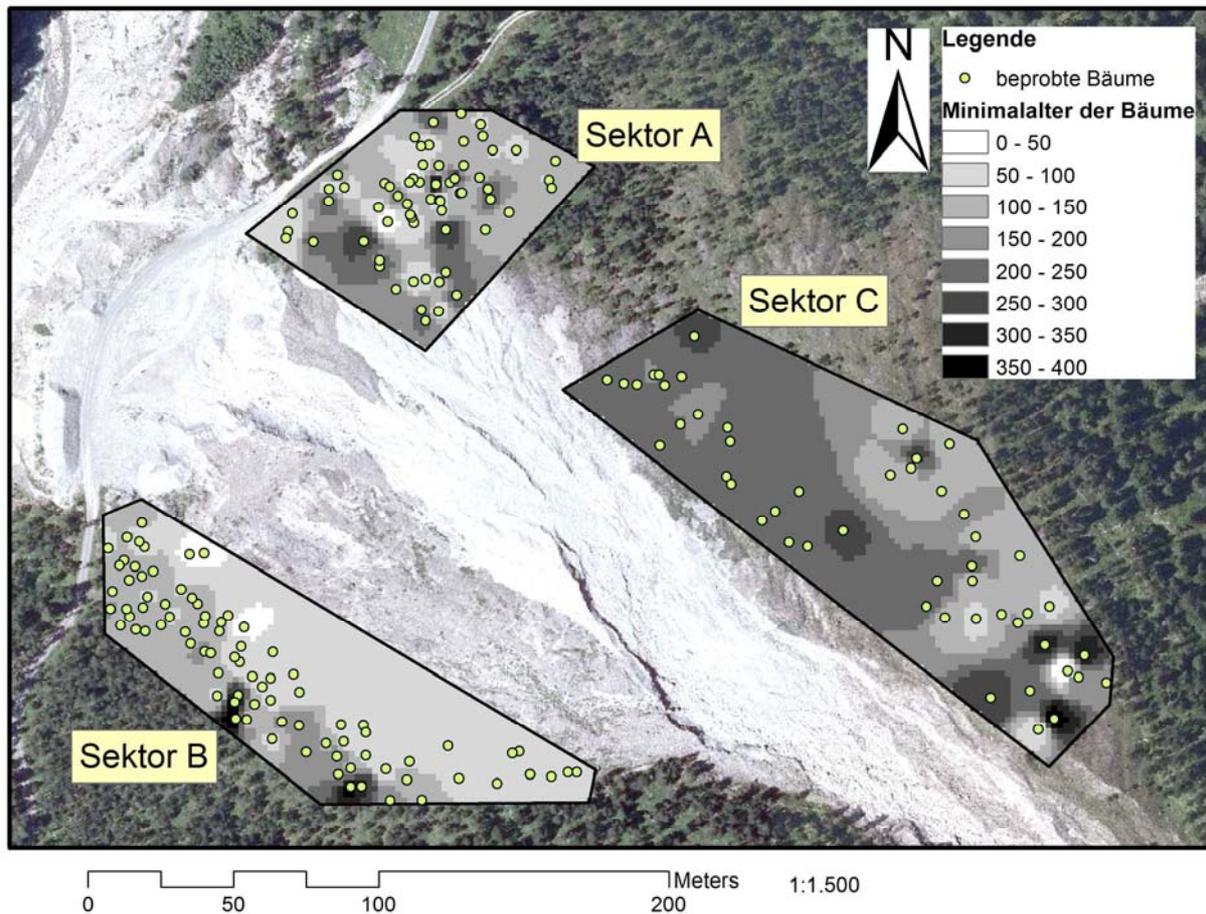


Abbildung 40: Boxplots der Jahrringanzahl der beprobten Bäume, Median - horizontale Linie, Quartile - obere bzw. untere Kanten der Boxen, Min- bzw. Max-wert - Ausdehnung der vertikalen Linien

## 5.2 Altersstruktur des Bestandes

Für Abbildung 41 wurde (wie auch für Tabelle 4 und Abbildung 40) die Anzahl der gemessenen Jahrringe der Proben verwendet. Es ist daher nur als Minimalalter der beprobten Bäume zu verstehen. Um die räumliche Verteilung des Alters zu visualisieren, wurde eine räumliche Interpolation durch Mittelwertbildung (inverse Distanzenmethode) vorgenommen. So zeigen sich gewisse Auffälligkeiten und Zonen unterschiedlichen Alters.



**Abbildung 41: Karte der Altersstruktur der beprobten Bäume, räumliche Interpolation mittels inverser Distanzenmethode (2. Potenz)**

In Sektor B befinden sich die ältesten Bäume eher am Rand des Ablagerungsgebietes, während zur Mitte der Ablagerungen hin das Alter der Bäume tendenziell abnimmt.

Sektor A zeigt andere Charakteristiken. Hier gibt es verstreut einige ältere Bäume, zwischen denen jüngere Exemplare zu finden sind. Recht auffällig ist ein Streifen in Nord-Süd-Richtung verlaufend, welcher von jüngeren Bäumen bewachsen wird, deren Alter zwischen 50-100 Jahre liegt. Am westlichen Ende des Sektor A befinden sich ebenfalls einige jüngere Bäume mit 50-100 gezählten Jahrringen.

Die Bäume in Sektor C unterscheiden sich nicht nur in ihrem Wuchsbild deutlich von Bäumen in den anderen Sektoren. Wie noch in Kapitel 6.3.1 näher erläutert wird, sind in diesem Sektor die Bäume meist von niedrigerem und oft verkümmertem Wuchs. Dennoch sind diese Bäume bedeutend älter. Die Altersverteilung ist vor allem im unteren Bereich homogener als in den anderen Sektoren, auch wenn hier der generell größere Abstand zwischen beprobten Bäumen beachtet werden muss. In diesem Sektor befinden sich jüngere Bäume mit wenigen Ausnahmen nicht wie bei Sektor B nahe der Kegelmittle sondern

vielmehr am Rand des Ablagerungsgebietes. Die ältesten Bäume hier befinden sich am oberen Ende des Sektors.

Mit einer Ausnahme sind die ältesten beprobten Bäume Spirken. Die Lage der ältesten Bäume ist anhand der dunklen Flächen in Abbildung 41 zu erkennen.

Der älteste beprobte Baum befindet sich in der Mitte von Sektor B mit 450 gezählten Jahrringen (BHD 20,7 cm, Höhe 10 m). Dieser Baum erreichte die Beprobungshöhe von ca. 20 cm etwa im Jahr 1550. In der Nähe wurde ein weiterer alter Baum beprobt. Dieser weist 380 gezählte Jahrringe auf, allerdings war hier die Probe bereits durch Fäule zersetzt und es konnten nicht alle Jahrringe erfasst werden (BHD 27,4 cm, Höhe 10,5 m).

Der älteste Baum in Sektor A war zum Zeitpunkt der Probenahme bereits abgestorben. Der letzte Jahrring wurde auf das Jahr 2004 datiert. Dieser Baum hat 376 Jahrringe und hat somit etwa im Jahr 1628 die Beprobungshöhe erreicht (BHD 31,2 cm, Höhe 14 m). In diesem Sektor befindet sich auch die älteste beprobte Fichte mit 302 gemessenen Jahrringen (BHD 36,6 cm, Höhe 15,1 m).

In Sektor C hat der älteste Baum 379 gemessene Jahrringe, ein anderer hat 371 Jahrringe. Diese Bäume hatten lediglich einen BHD von etwa 14 cm und eine Höhe von bis zu 2,7 m.

### 5.3 Referenzkurven

Die in Abbildung 42 dargestellten Referenzkurven wurden durch Mittelwertbildung der Jahrringabstände ausgewählter Proben erstellt.

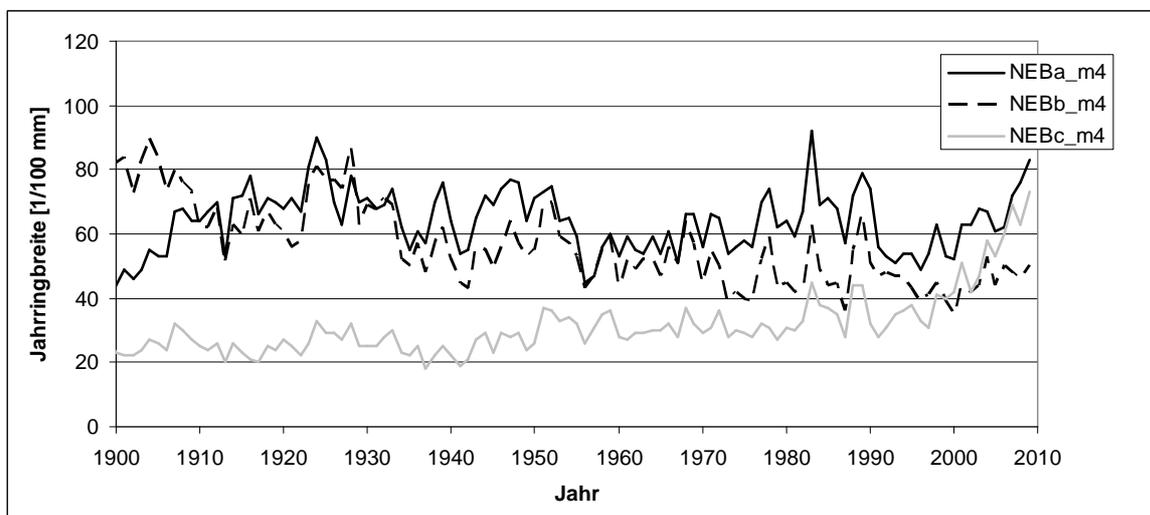
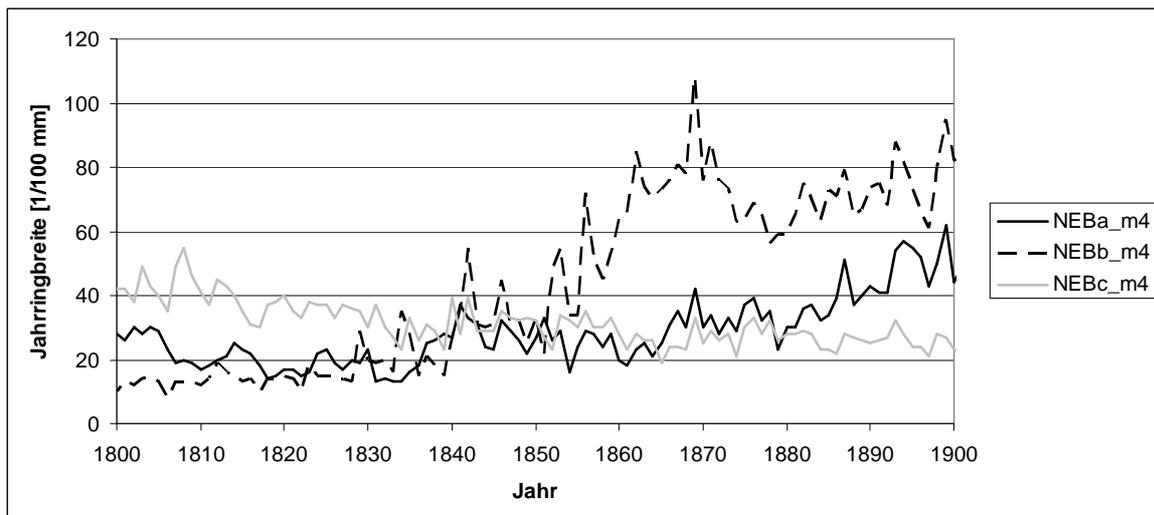
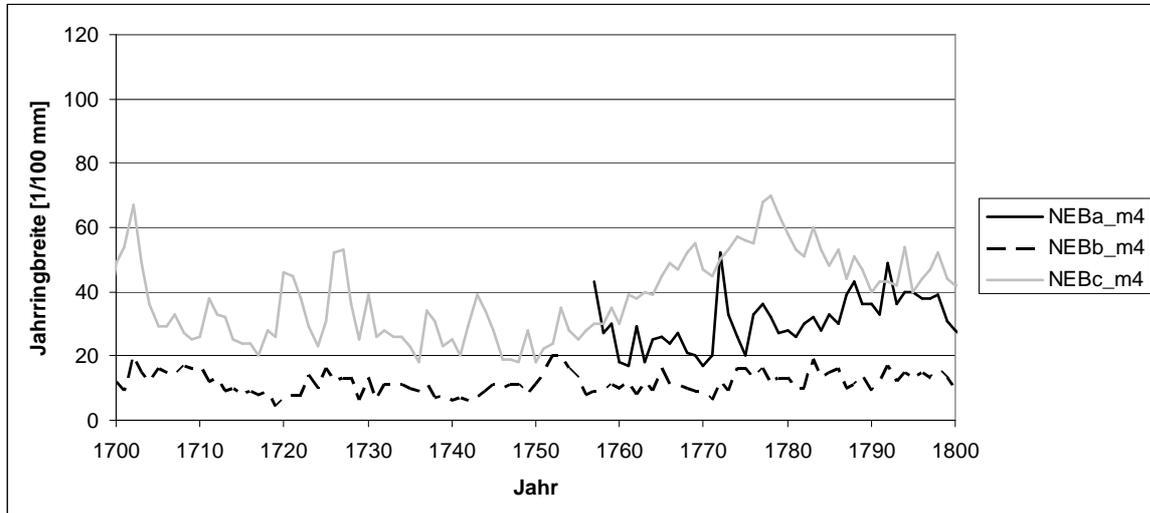


Abbildung 42: Mittelkurven der Sektoren A, B und C, Zeitraum 1700 bis 2009 n. Chr.

Die in Abbildung 42 dargestellten Mittelkurven zeigen unterschiedlichen Phasen des Dickenwachstums der beprobten Bäume. Vor allem die beiden Kurven der Sektoren A und B sind einander sehr ähnlich im 20. Jahrhundert. Der Mittelwert der Jahrringbreite ist ähnlich groß und auch Sprünge und Knicken der Kurven korrelieren meist sehr gut. Die Mittelkurve des Sektor C präsentiert sich relativ stabil und weist wenig deutliche Sprünge auf, lediglich in den letzten zehn Jahren ist ein Ansteigen der Kurve zu beobachten, was einem größeren Dickenwachstum der Bäume in der jüngeren Vergangenheit entspricht. Vor allem in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts liegt die Kurve aus Sektor C deutlich unter den Mittelkurven der anderen beiden Sektoren.

Die Kurve von Sektor B zeigt im Zeitraum 1850 bis etwa 1910 ein höheres Wachstum als in den anderen Sektoren. Dieser Zeitraum erhöhten Wachstums ist durch zahlreiche Proben, die diese Charakteristik zeigen, gut belegt.

Verfolgt man die Kurven weiter in die Vergangenheit, muss beachtet werden, dass die Stichprobenanzahl abnimmt, da nicht alle Bäume dasselbe Alter ausweisen (siehe auch Abbildung 43). Dies muss vor allem beachtet werden, wenn Auffälligkeiten der Kurven im 18. und 19. Jahrhundert beschrieben werden.

## 5.4 Wachstumsstörungen und Ereignisjahre

Insgesamt wurden in den Proben 367 Wachstumsstörungen erkannt.

	Verwendete Bäume	TRD	GD	GI	CW	dead	injury	Summe
Sektor A	63	3	42	80	5	6	13	149
Sektor B	84	2	34	104	8	1	3	152
Sektor C	48		6	59	1			66
Summe	195	5	82	243	14	7	16	367

**Tabelle 5; Auflistung von Wachstumsstörungen in Proben, nach Sektoren getrennt**

Wie in Tabelle 5 zu sehen ist der Großteil der gefundenen Wachstumsstörungen vom Typ Zuwachsschub (GI) und Zuwachseinbruch (GD), insbesondere gilt dies für Sektor C. Wachstumsstörungen wie Druckholz (CW), traumatische Harzkanäle (TRD), Absterben (dead) und Verletzungen (injury) finden sich fast ausschließlich in den Sektoren A und B, wobei die meisten Verletzungen (13) in Sektor A zu finden sind. Die Anzahl an Wachstumsstörungen im Verhältnis zu der Anzahl der beprobten Baum ist am größten für Sektor A, während Sektor C relativ die wenigsten Wachstumsstörungen zeigt.

In Tabelle 6 werden die Wachstumsstörungen Zuwachsschub (GI) und Druckholz (CW) in einer Spalte gemeinsam geführt. Bei Druckholzansatz war meist auch ein Zuwachsschub zu erkennen und so traten diese beiden Wachstumsstörungen oft gleichzeitig auf.

Ereignisjahr	TRD	GD	GI, CW	dead	injury	Summe	It
1839			10			10	17,2
1851			6			6	9,5
1878			4			4	4,5
1906			3			3	2,4
1922			20			20	13,7
1934		5				5	3,1
1948		3	10			13	7,2
1961		2	8			10	4,9
1968		1	5			6	2,9
1981		1	20		1	22	10,7
1987		1	19	1	1	22	10,7
1991	1	6	5		6	18	8,7
1994	1		7			8	3,9
1998		5	5	1		11	5,3
2003		3	4	2		9	4,4
2007			2		2	4	1,9
Summe	2	27	128	4	10	171	

**Tabelle 6: Auflistung von Ereignisjahren und dazugehörigen Wachstumsstörungen, Summe der Störungen für die einzelnen Ereignisjahre, Indexwert It berechnet nach Shroder (1978)**

Wie in Tabelle 6 zu sehen ist, konnten 16 Ereignisjahre zwischen 1839 und 2007 rekonstruiert werden. Zuwachsschub und/oder Druckholzansatz waren die häufigsten Wachstumsstörungen in Zusammenhang mit einem Ereignisjahr. Der Indexwert It variiert zwischen 1,9 und 17,2. Ereignisjahre mit einem niedrigen Indexwert sind 1906, 1934, 1968 und 2007. Von 367 insgesamt identifizierten Wachstumsstörungen konnten 171 Wachstumsstörungen 16 Ereignissen zugeordnet werden. Das entspricht einem prozentuellen Anteil von 47 %. Somit konnten 196 Wachstumsstörungen keinem Ereignisjahr zugeordnet werden.

<b>Ereignisjahre laut Archivdaten</b>	<b>Ergebnisse der dendrogeomorphologischen Analyse</b>
	1839
	1851
	1878
	1906
	1922
	1934
1948	1948
	1961
	1968
1979	
	1981
	1987
1991	1991
	1994
	1998
1999	
	2003
	2007

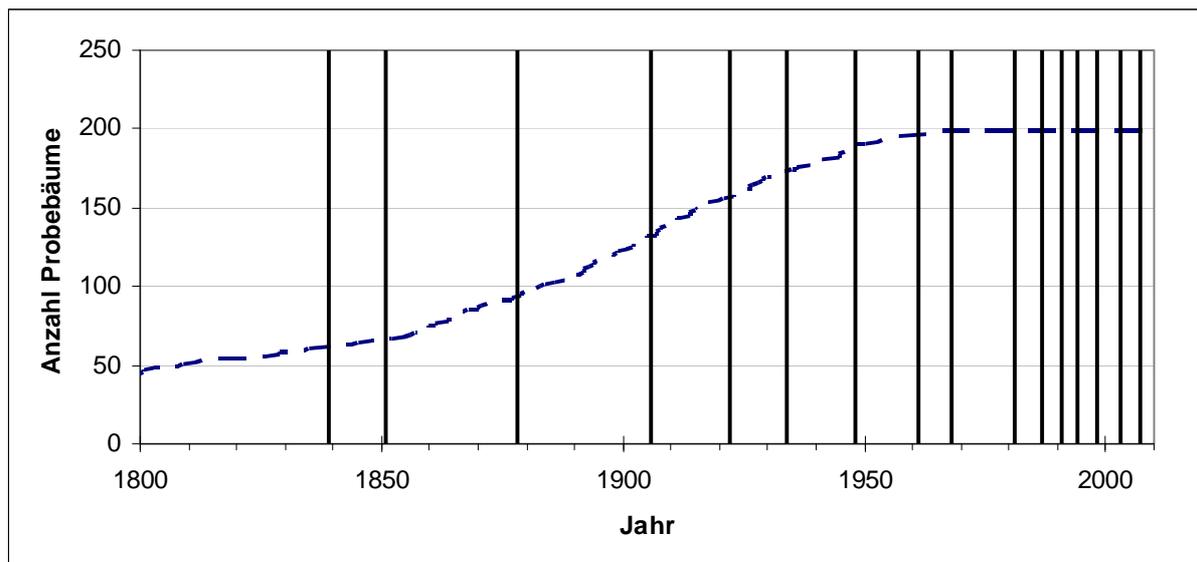
**Tabelle 7: Gegenüberstellung der Archivdaten zur Murgangaktivität der Bärenrufe und der Ergebnisse der dendrogeomorphologischen Analyse**

Archivdaten zu Murgangereignissen in der Bärenrufe gibt es für vier Jahre (siehe Tabelle 7). Zwei davon, 1948 und 1991, finden sich auch in den Ergebnissen dieser Arbeit. Die Ereignisse der Jahre 1979 und 1999 wurden in der dendrogeomorphologischen Untersuchung nicht erkannt. Dafür wurden 14 Ereignisjahre rekonstruiert, die nicht in Archivdaten zu finden sind.

Ereignisjahr	Sektor A	Sektor B	Sektor C
1839		4	6
1851		1	5
1878	1	3	
1906	3		
1922	5	10	5
1934		5	
1948	4	2	7
1961	2	8	
1968	5	1	
1981	12	10	
1987		19	3
1991	18		
1994	8		
1998	8	3	
2003	4	5	
2007	4		

**Tabelle 8: Auflistung Ereignisjahre und dazugehöriger Anzahl von Bäumen mit Wachstumsstörungen, nach Sektoren getrennt**

Wie in Tabelle 8 zu sehen ist, haben einige Ereignisjahre nur Wachstumsstörungen in einem Sektor hervorgerufen, dies sind 1906, 1987, 1991, 1994 und 2007. Andere haben Reaktionen in mehreren Sektoren bewirkt. Für nur zwei Ereignisjahre zeigen Bäume aller drei Sektoren Wachstumsstörungen, 1922 und 1948.



**Abbildung 43: Verfügbare Anzahl an beprobten Bäumen (strichliert) und die Ereignisjahre (vertikale Linien)**

Zwischen 1980 und 2010 ist die zeitliche Dichte der rekonstruierten Ereignisse besonders hoch (Abbildung 43). Vor diesem Zeitraum sind die Intervalle zwischen einzelnen Ereignisjahren größer. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts beträgt der zeitliche Abstand zwischen den rekonstruierten Ereignissen 12-16 Jahre.

### **5.5 Filterung des Lawineneinfluss**

In Sektor C wurden Bäume beprobt, deren Wuchs auf eine Beeinflussung durch Schneelawinen in der Vergangenheit schließen lässt.

Bei der Analyse der Proben von Sektor C wurden hauptsächlich Wachstumsreaktionen des Typs Zuwachsschub oder Zuwachseinbruch gefunden, die meist schwacher oder mittlerer Intensität waren (Tabelle 5 und Abbildungen in Kapitel 5.6). Insgesamt wurden 66 Wachstumsreaktionen erkannt und beschrieben. Von diesen wurden 26 Reaktionen 5 verschiedenen Ereignisjahren zugeordnet. Diese Ereignisjahre sind 1839, 1851, 1922, 1948 und 1987 (siehe Tabelle 8).

Es kann aber nicht belegt werden, dass diese Ereignisse tatsächlich Lawinen gewesen sind. Die Zuwachsreaktionen in diesem Gebiet waren großteils Zuwachsschübe schwacher Intensität, wobei solche Reaktionen untypisch für eine Beeinflussung durch Lawinen sind. Es war keine intra-saisonale Datierung der oben genannten Ereignisjahre mit Hilfe traumatischer Harzkanäle möglich.

### **5.6 Ausgewählte Ereignisjahre im Detail**

In den folgenden Abbildungen stellen Punkte die Lage von beprobten Bäume dar. Weiße Punkte sind Bäume, die in ihren Jahrringen keine Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit dem jeweiligen Ereignis gezeigt haben. Farbige Punkte (gelb, orange, rot) symbolisieren Bäume, die eine Wachstumsreaktion zeigen. Die Farbe der Punkte gibt die Intensität dieser Reaktion wieder (beschrieben in Kapitel 4.6.1). Die Darstellungen zu den übrigen Ereignisjahren sind in Anhang C zu finden.

Reaktionen in den Sektoren A und B

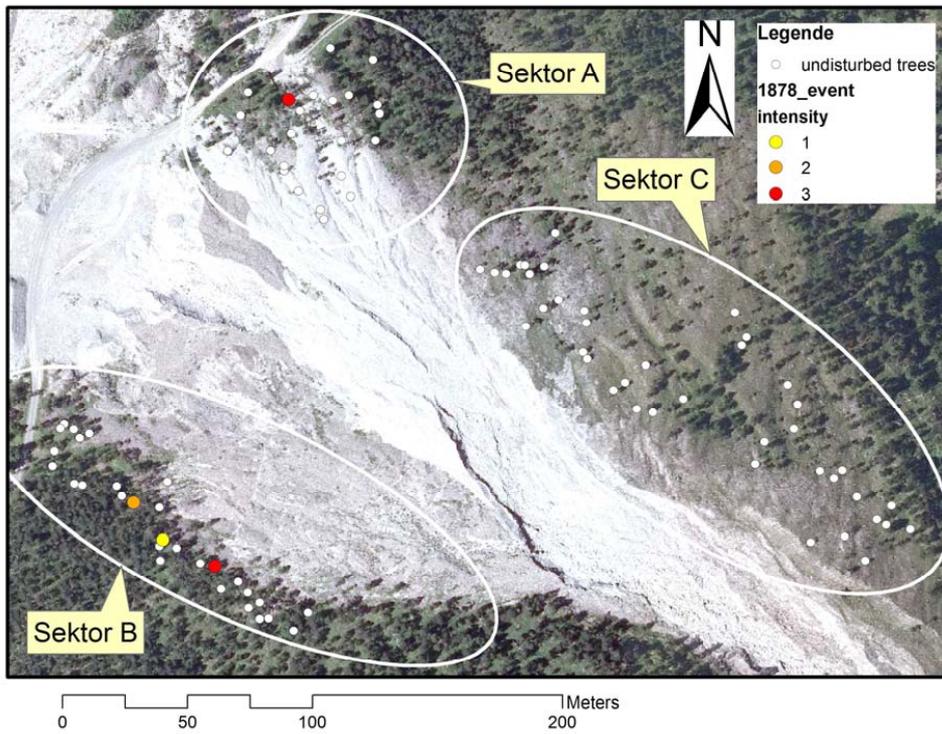


Abbildung 44: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1878

Ausschließlich Reaktionen in Sektor A

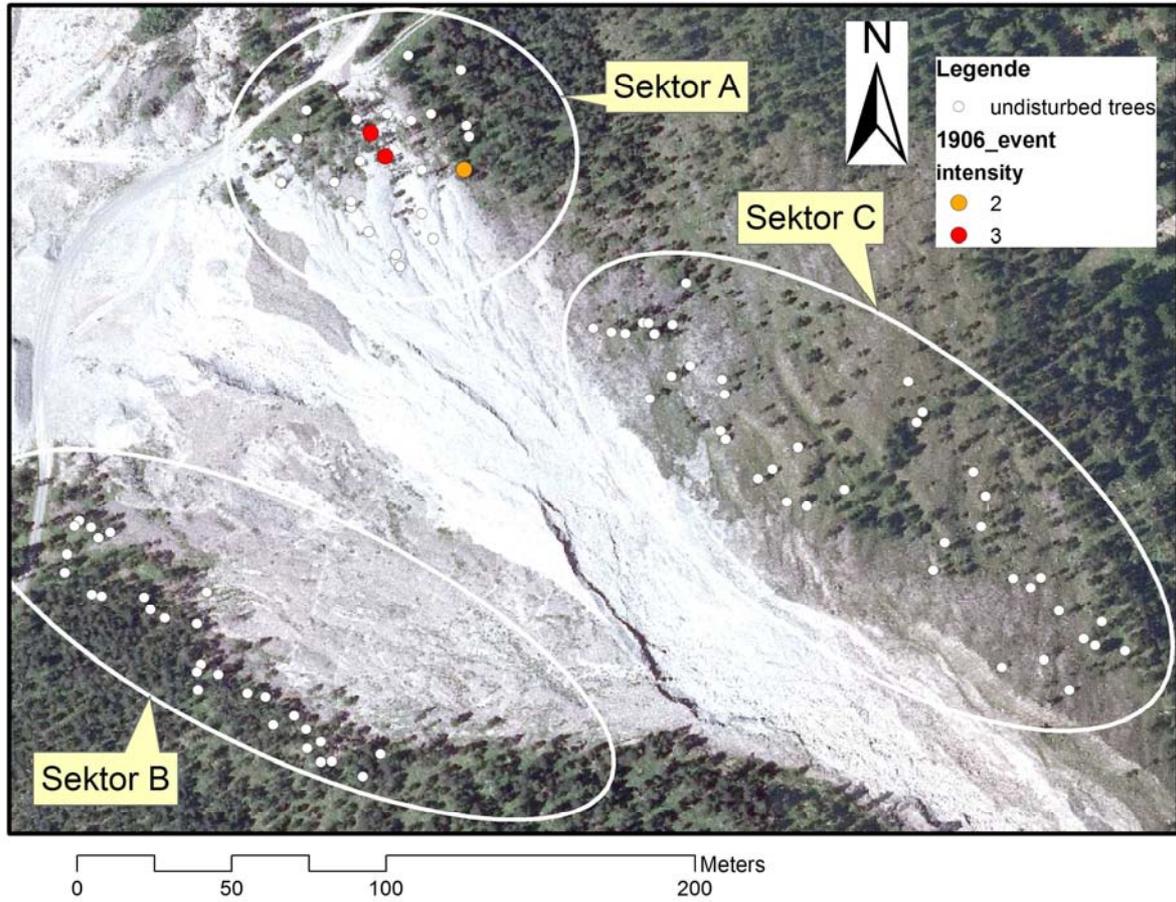


Abbildung 45: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1906

Reaktionen in allen drei Sektoren:

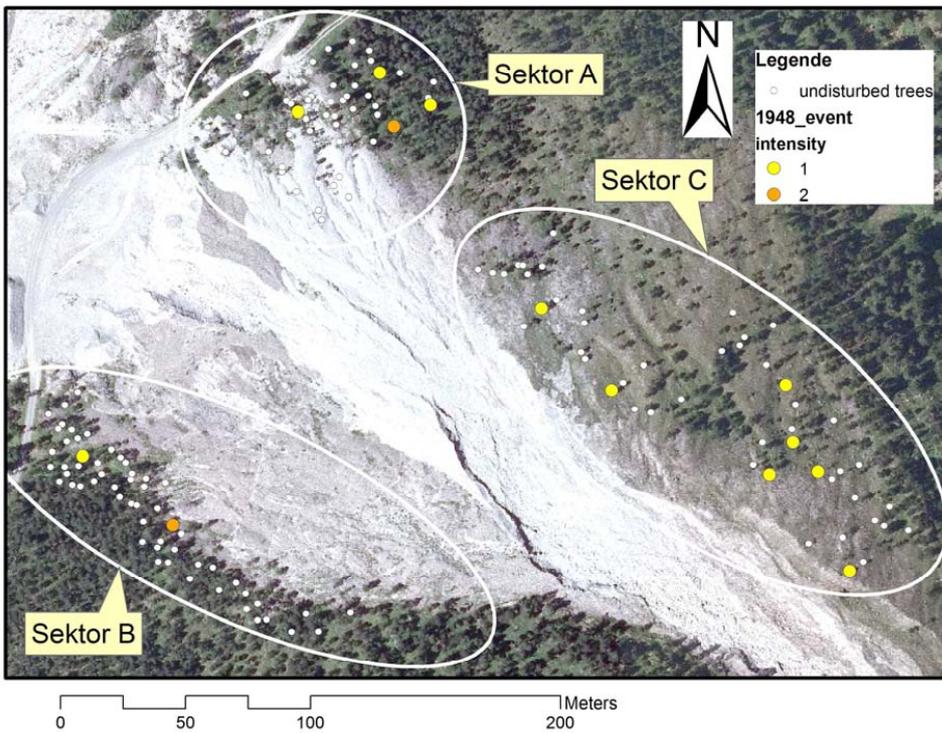


Abbildung 46: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1948

Zahlreiche Reaktionen in Sektor B:

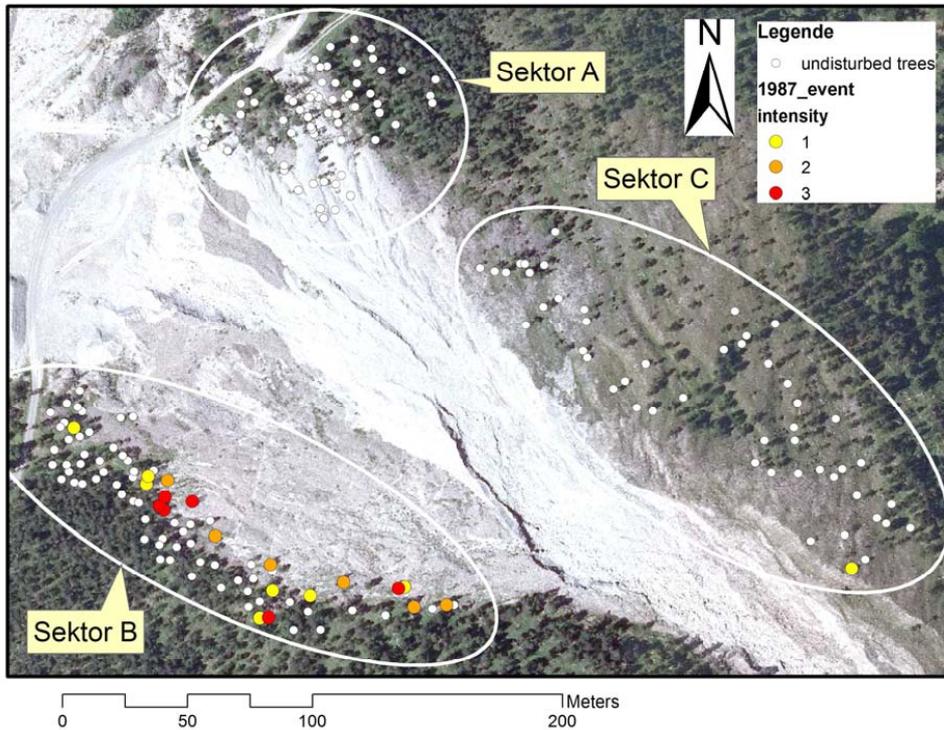


Abbildung 47: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1987

Zahlreiche Reaktionen in Sektor A:

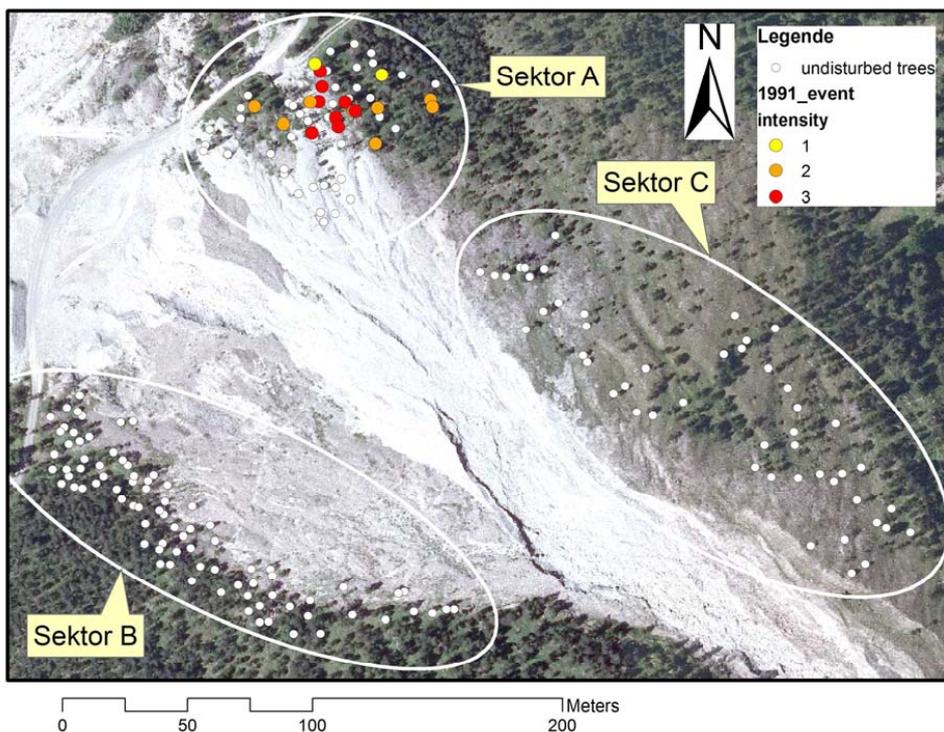


Abbildung 48: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1991

Reaktionen in Sektor A und B:

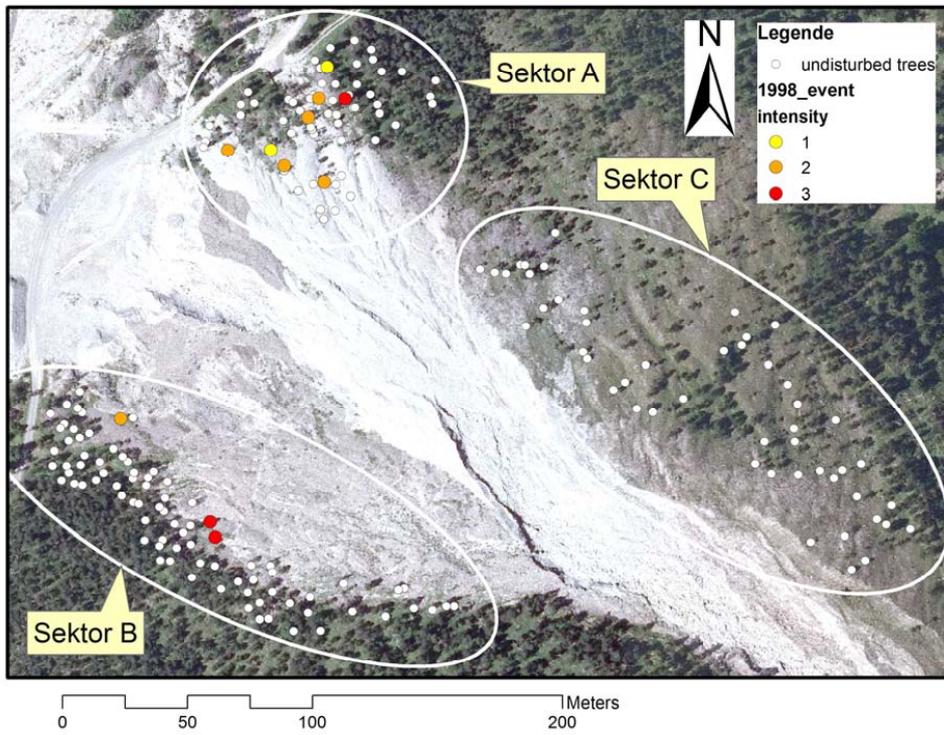
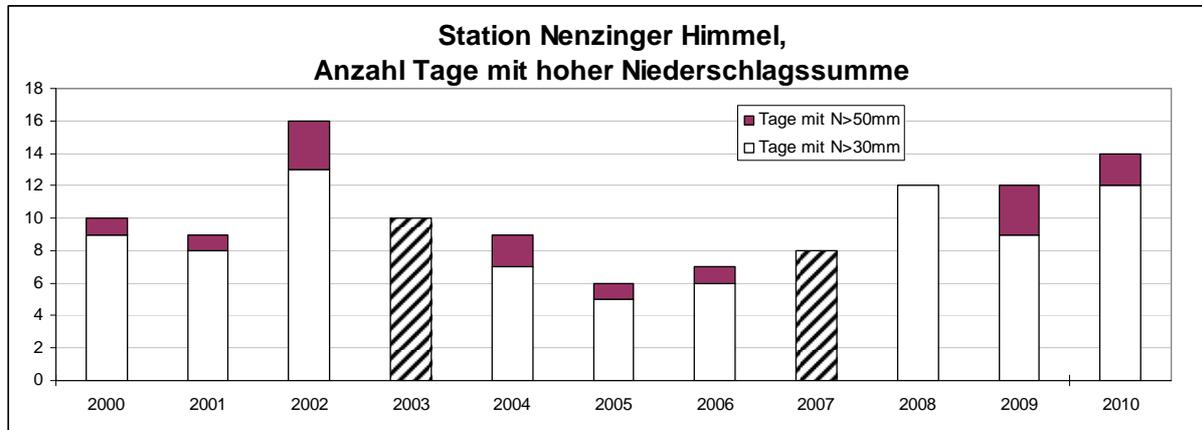


Abbildung 49: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1998

## 5.7 Niederschlagsdaten

### 5.7.1 Ereignisauslösende Niederschläge



**Tabelle 9: Niederschlagsdaten der Station Nenzinger Himmel, Anzahl Tage mit Niederschlagssumme größer 30 mm bzw. größer 50 mm, Ereignisjahre 2003 und 2007 schraffiert**

Wie in Tabelle 9 und den Abbildungen in Anhang D zu sehen ist, sind Tage, an denen eine Niederschlagssumme von 30 bzw. 50 mm erreicht oder überschritten wird, relativ häufig. Die Station Nenzinger Himmel etwa verzeichnete im Zeitraum 2000 bis 2010 jedes Jahr mindestens 5 Tage mit einer Niederschlagssumme von min. 30 mm. Auch in Jahren ohne rekonstruierte Ereignisaktivität wurden solche Niederschlagssummen häufig gemessen. Die Daten für Tabelle 9 und die Abbildungen in Anhang D wurden nicht temperaturbereinigt, es wurde nicht unterschieden, ob der Niederschlag in Form von Schnee oder Regen gefallen ist. Dennoch ist zu sehen, dass die Grenzwerte 30 und 50 mm für diese Arbeit ungeeignet zur Identifizierung einzelner ereignisauslösender Niederschlagsereignissen sind.

Eine Auflistung der 20 größten Niederschlagssummen, die von den Messstationen Brand und Thüringen verzeichnet wurden, ist in Tabelle 10 gegeben. Eingerahmt sind Niederschlagsereignisse in Ereignisjahren. Grau hinterlegt sind Tage, an denen wahrscheinlich Niederschlag im Untersuchungsgebiet in fester Form gefallen ist. Da Temperaturdaten nur bis ins Jahr 1961 zurückreichen, ist für den Zeitraum davor keine Temperaturbereinigung möglich.

Station				Station			
Brand	N_B	T_T	T_O	Thüringen	N_T	T_T	T_O
	[mm]	[°C]	[°C]		[mm]	[°C]	[°C]
17.08.1963	70,2			11.09.1899	108		
07.10.1963	70,9		0,8	14.06.1910	146,5		
10.09.1965	82,1		0,3	09.01.1914	125		
31.05.1967	70,1		-1,6	30.09.1915	136,7		
30.06.1975	72,4		0	13.12.1918	94,4		
01.06.1976	75,4		3,6	15.07.1922	102,5		
07.08.1978	80,1		10,3	23.08.1937	96,4		
21.09.1979	77,9		3,3	30.05.1940	95		
19.07.1981	73,1		-2	31.05.1940	120,3		
05.09.1984	112,2	10,4	2,4	19.06.1948	93,1		
25.08.1985	77,3	12,5	3,6	20.01.1951	97		
06.07.1986	79,3	15,2	7	01.07.1954	107		
20.08.1988	81,8	13	7,4	10.06.1965	95		7,9
21.12.1991	80,9	-0,4	-6,4	05.09.1984	102,3	10,4	2,4
22.12.1991	80,5	4	-0,4	22.12.1991	81,4	4	-0,4
21.05.1999	173,9	7,2		06.07.1994	79,4	18,2	12,5
06.08.2000	83	13,1		21.05.1999	193,7	7,2	
11.08.2002	88,9	12,1		11.08.2002	80	12,1	
22.08.2005	120	14		22.08.2005	126,4	14	
17.07.2009	71,8	13,5		18.07.2009	83,5	12,8	

**Tabelle 10: die 20 höchsten Tagesniederschlagssummen in mm der Stationen Brand (N\_B) und Thüringen (N\_T), Tagesmitteltemperaturen der Stationen Thüringen (T\_T) und Obervermunt (T\_O)**

In den Ereignisjahren 1922, 1948, 1991 und 1994 gibt es Tage, an denen große Tagesniederschlagssummen gemessen wurden. Temperaturdaten lassen vermuten, dass im Dezember 1991 Niederschlag in fester Form gefallen ist. Für die Ereignisjahre 1934, 1961, 1968, 1981, 1987, 2003 und 2007 finden sich keine entsprechenden Tage mit hohen Niederschlagssummen.

Zusätzlich wurden die 5 größten Niederschlagssummen in den einzelnen rekonstruierten Ereignisjahre der Messstationen Thüringen und Brand dargestellt und untersucht (die 10

größten für die Jahre 1991 und 2003). Wiederum war nur für den Zeitraum ab 1961 eine Temperaturbereinigung möglich. Für die Ereignisjahre 1839, 1851 und 1906 waren keine Niederschlagsdaten verfügbar.

Allerdings konnte für die Ereignisjahre (1934, 1961, 1968, 1981, 1987, 2003, 2007), also jene, die in Tabelle 10 keinen Tag mit hoher Niederschlagssumme aufweisen, keine einzelnen potentiell ereignisauslösende Niederschlagsereignisse gefunden werden. Wie in Tabelle 11 (grau hinterlegt Tage mit festem Niederschlag) zu sehen ist, gibt es für die Ereignisjahre 1961, 1968 und 1981 keine einzelnen Tage mit auffällig hohen Niederschlagssummen.

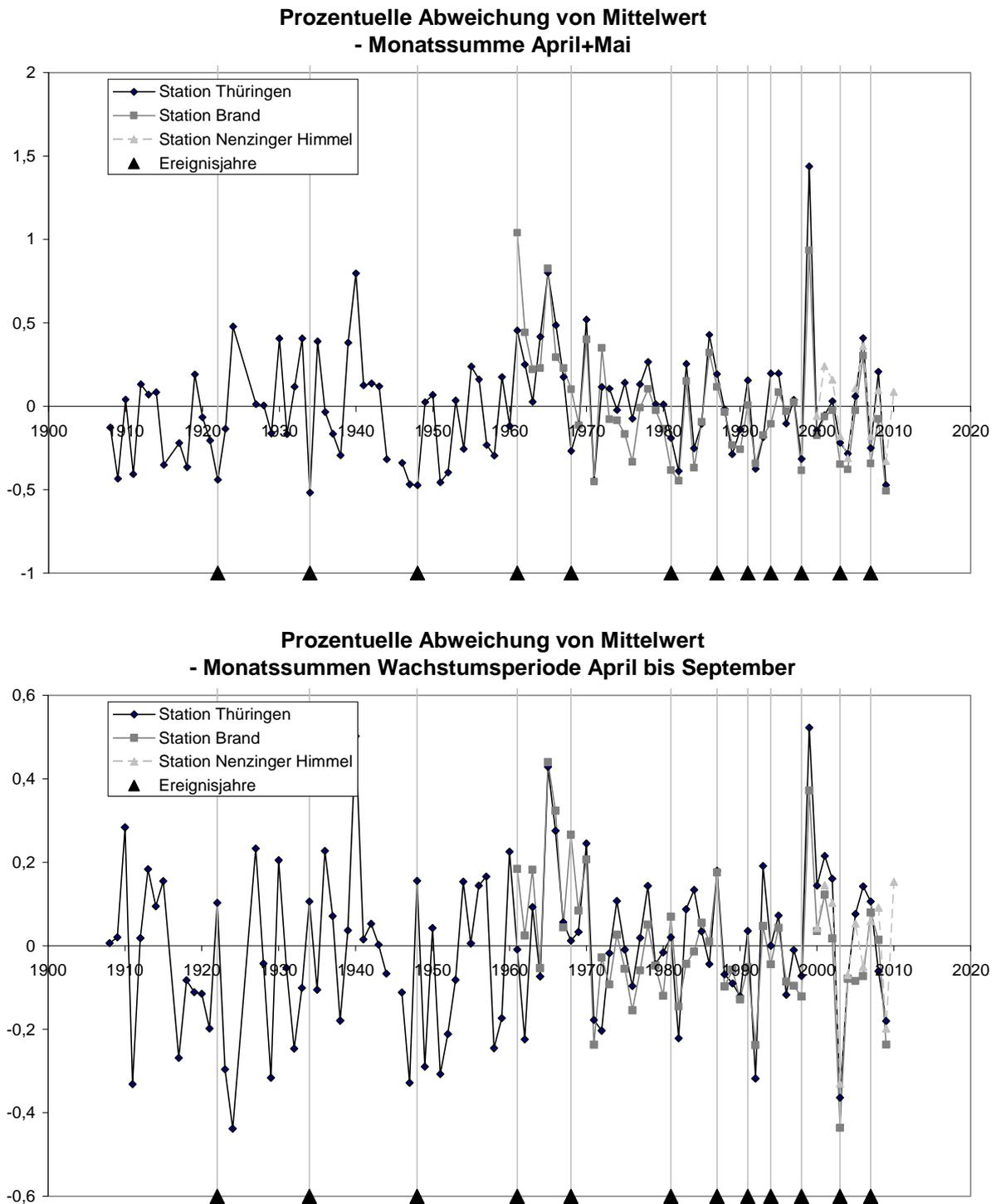
Vielmehr sind die 5 größten gemessenen Tagesniederschlagssummen dieser Jahre auf meist hohem Niveau, ähnlich groß und unterschreiten nur selten 30 mm. Für die anderen Jahre zeigt sich ein ähnliches Bild.

Die anderen Tabellen finden sich in Anhang D.

<b>Thüringen</b>	<b>N_T</b>	<b>T_T</b>	<b>T_O</b>		<b>Brand</b>	<b>N_B</b>	<b>T_T</b>	<b>T_O</b>	
	[mm]	[°C]	[°C]			[mm]	[°C]	[°C]	
12.05.1961	39,4				12.05.1961	40,1			
27.06.1961	27				14.05.1961	45,1			
12.07.1961	32				11.08.1961	38,9			
11.08.1961	37				12.08.1961	35,1			
19.08.1961	26,4				11.12.1961	47,8			
26.01.1968	27		-9,3		20.06.1968	38,1		6,8	
17.07.1968	46,5		0,4		11.07.1968	58,1		10,4	
02.08.1968	35		9,2		18.07.1968	35,9		0,4	
04.09.1968	27,6		1,1		09.08.1968	39,9		5,3	
01.10.1968	50		0,8		14.09.1968	48,9		7,3	
26.05.1981	41,2		3,4		18.07.1981	55,8		1,1	
18.07.1981	43		1,1		19.07.1981	73,1		-2	
19.07.1981	46		-2		24.07.1981	42,8		1,7	
16.08.1981	44,2		12,7		22.09.1981	49,5		11,3	
28.09.1981	42,1		-0,2		28.09.1981	43,1		-0,2	

**Tabelle 11: Die 5 größten Niederschlagssummen in mm der Stationen Brand (N\_B) und Thüringen (N\_T) in den Ereignisjahren 1961, 1968 und 1981, dazu Tagesmitteltemperaturen der Stationen Thüringen (T\_T) und Obervermunt (T\_O)**

## 5.7.2 Monatssummen des Niederschlages im Vergleich mit Ereignisjahren

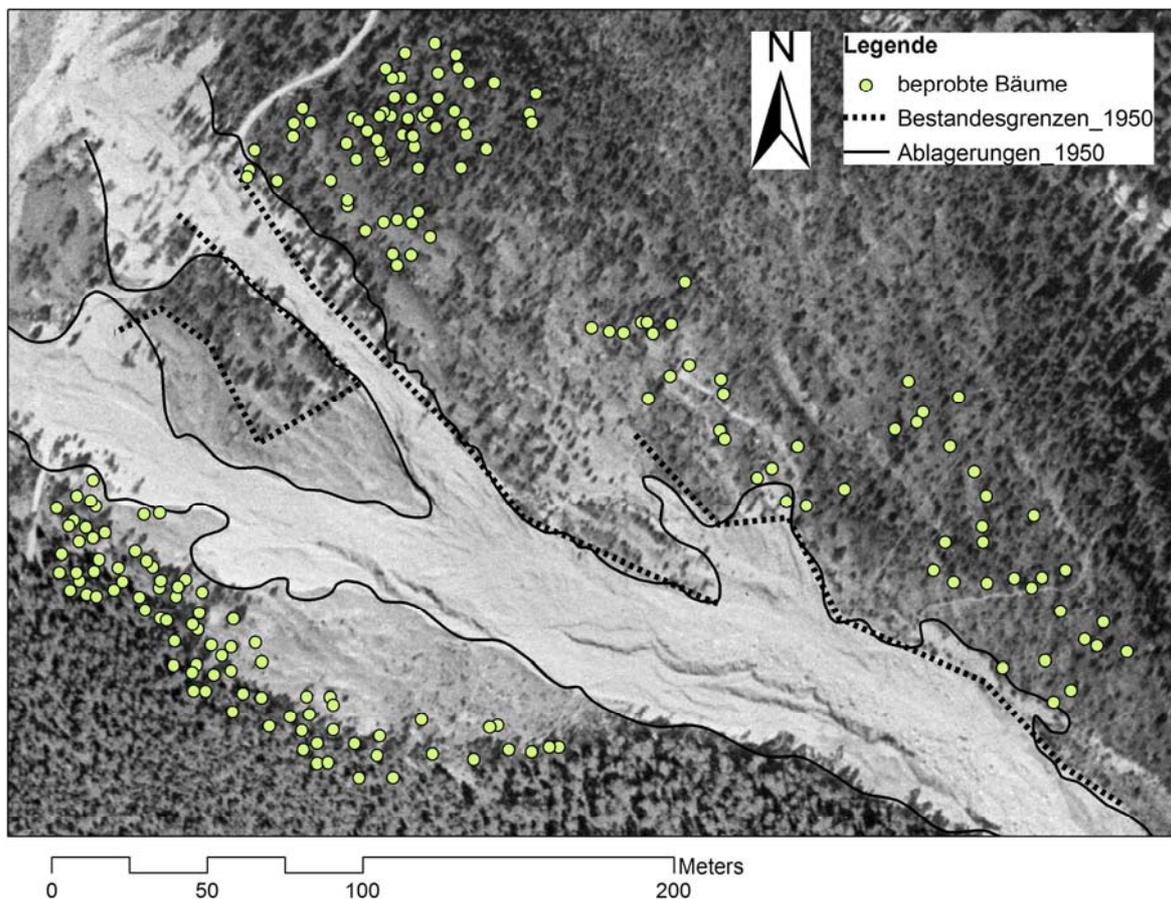


**Abbildung 50: Variabilität des Niederschlages (Monatssumme April+Mai und Wachstumsperiode April bis September) im Vergleich mit Ereignisjahren (vertikalen grauen Linien)**

In Abbildung 50 sind die Diagramme zur Variabilität der Niederschlagssumme der Monate April plus Mai sowie der gesamten Wachstumsperiode (April bis September) dargestellt. Die übrigen Diagramme finden sich in Anhang D.

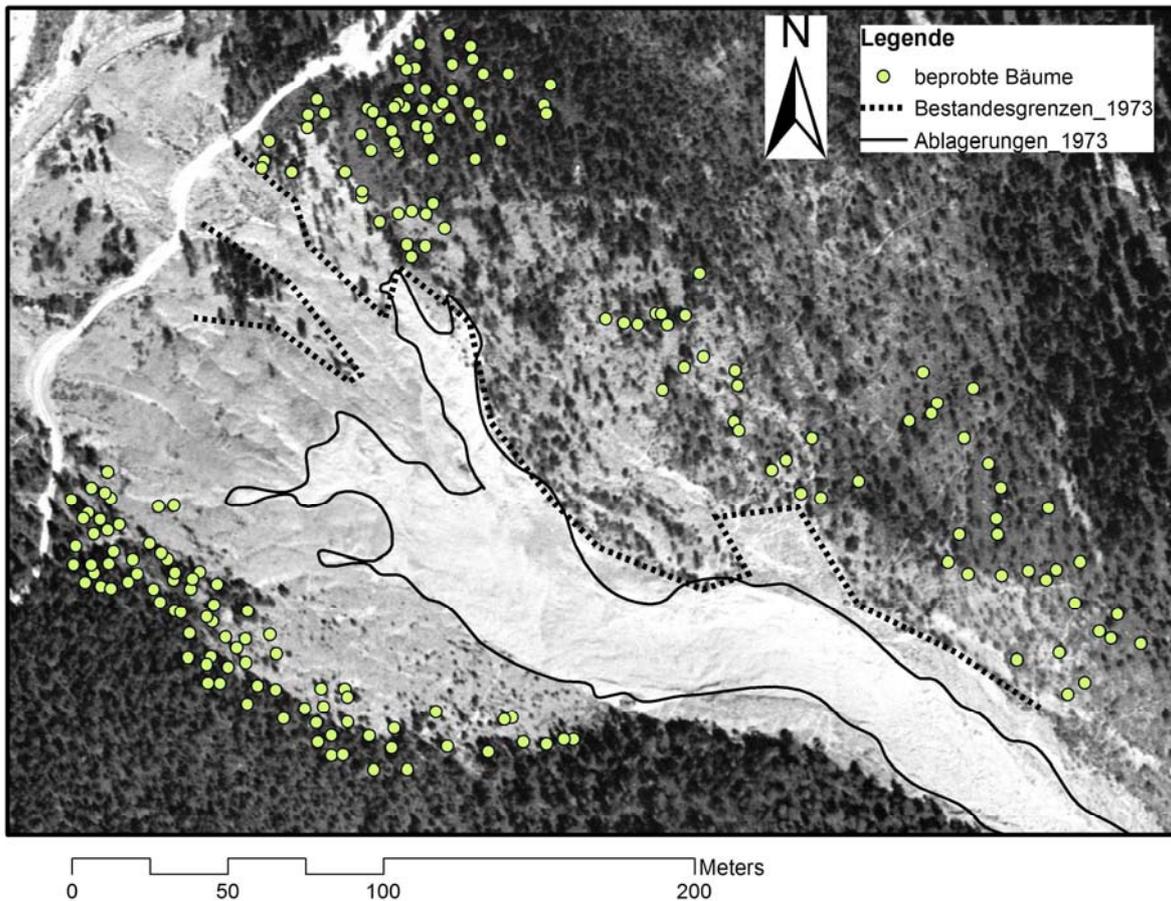
Es ist kein genereller Zusammenhang von Ereignisjahren und besonders hohen oder niedrigen Niederschlagssummen zu erkennen. Allerdings ist in Ereignisjahren recht häufig nur wenig Frühjahrsniederschlag gefallen, vor allem in den Jahren 1922, 1934, 1948, 1981, 1998 und 2003. Dieses Defizit im Frühjahrsniederschlag relativiert sich meist im Laufe der Wachstumsperiode. Nur im Jahr 2003 liegt auch die Niederschlagssumme der gesamten Wachstumsperiode unter dem langjährigen Mittelwert.

## 5.8 Vergleich historischer Luftbilder



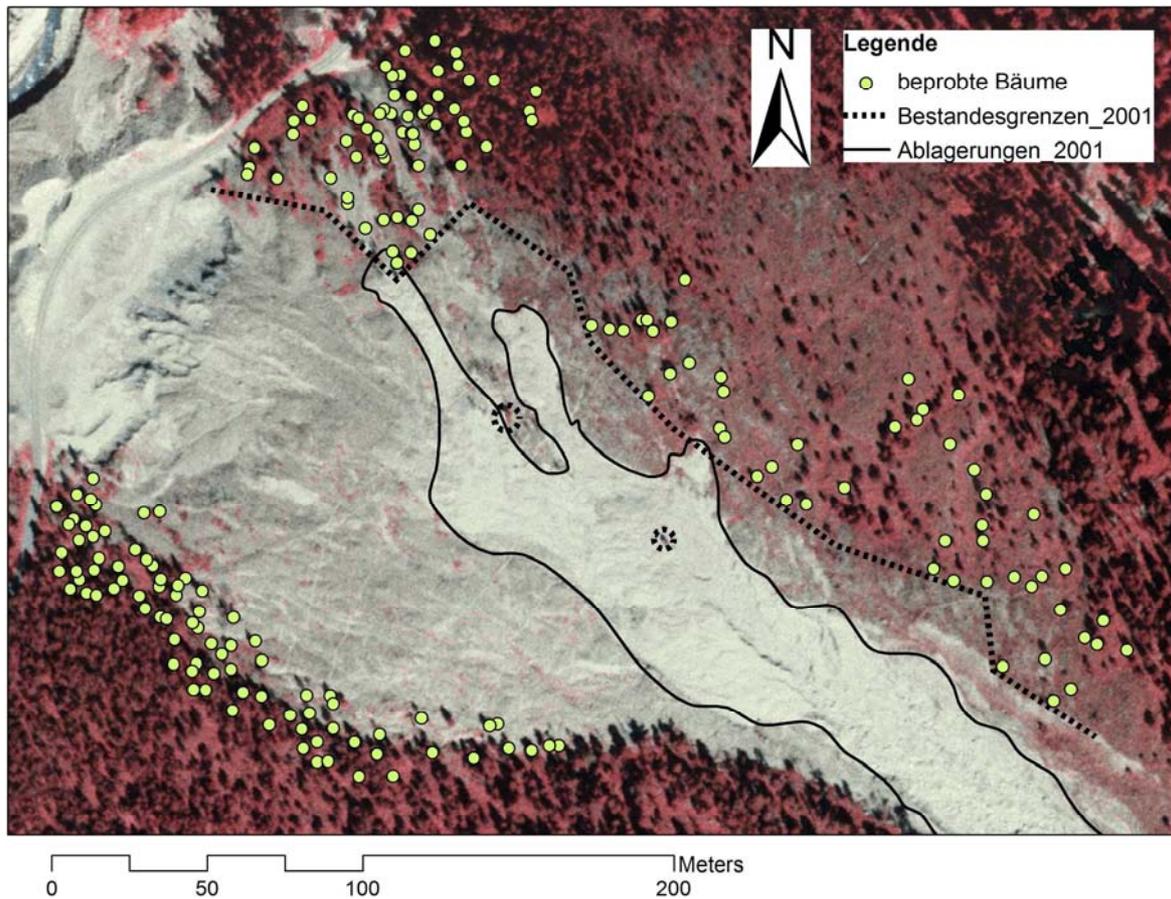
**Abbildung 51: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 1950**

In Abbildung 51 ist die deutliche Aufgabelung der hellen Ablagerungen nahe der Straße auffällig, die eine bewaldete Fläche umschließt. Deutliche Ablagerungslappen sind an seinem westlichen Rand zu sehen. Auch am östlichen, höher gelegenen Rand nahe Sektor C sind seitliche Ablagerungen sichtbar. Im Bereich östlich der Ablagerungen sind zahlreiche Bäume zu erkennen.



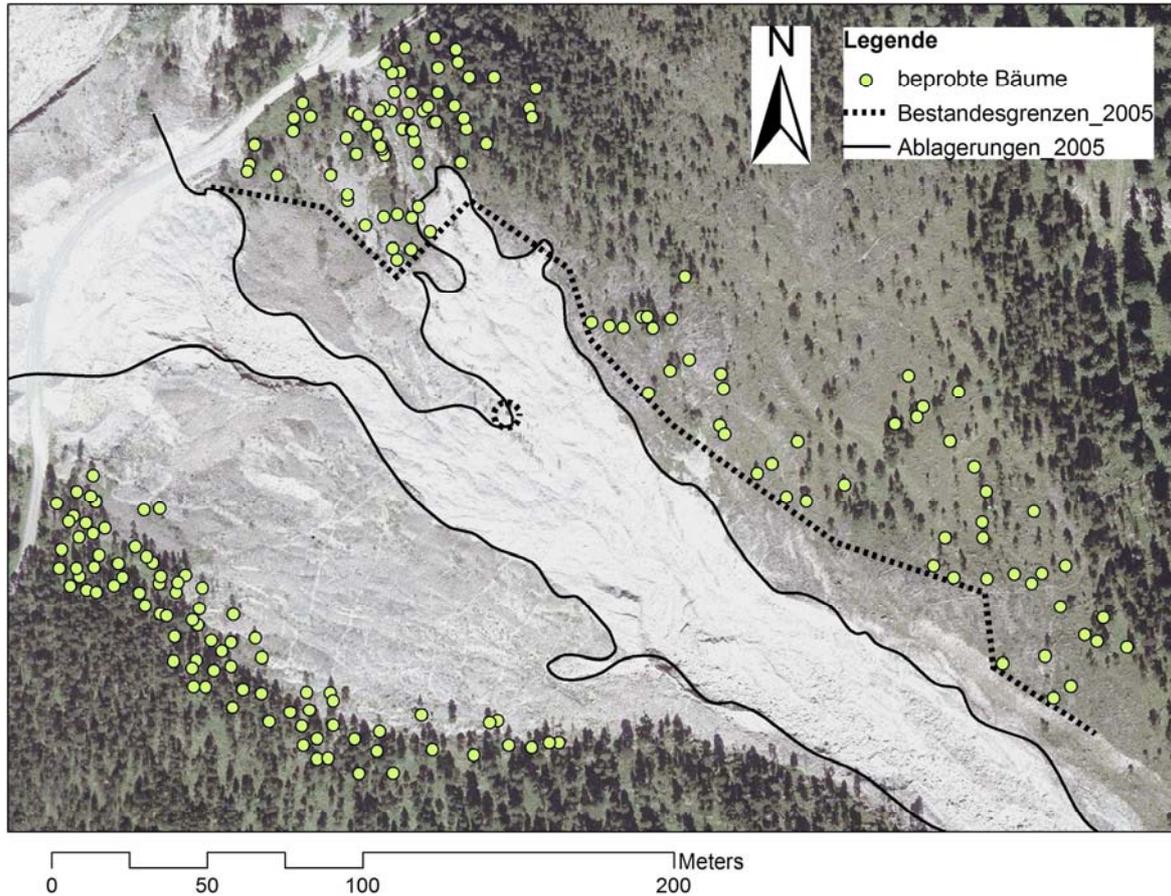
**Abbildung 52: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 1973**

Auf dem Luftbild aus dem Jahr 1973 (Abbildung 52) sind weniger helle Ablagerungen zu sehen, die nicht mehr bis zur Straße reichen. Die Ablagerungen erscheinen wiederum aufgegabelt. Der Verlauf des aktiven Grabens im höher gelegenen Teil des Ablagerungsgebietes erscheint nun stärker gebogen. Die seitlichen Ablagerungen am östlichen Rand wie auch die Ablagerungen nahe der Straße wirken dunkler gefärbt als in Abbildung 51. Die inselförmige Baumgruppe im unteren Abschnitt ist kleiner geworden, es sind nun weniger Bäume als in Abbildung 51 zu sehen. Die Lage der Bestandesgrenze in der Mitte des Ablagerungsgebietes ist mehr oder weniger unverändert geblieben.



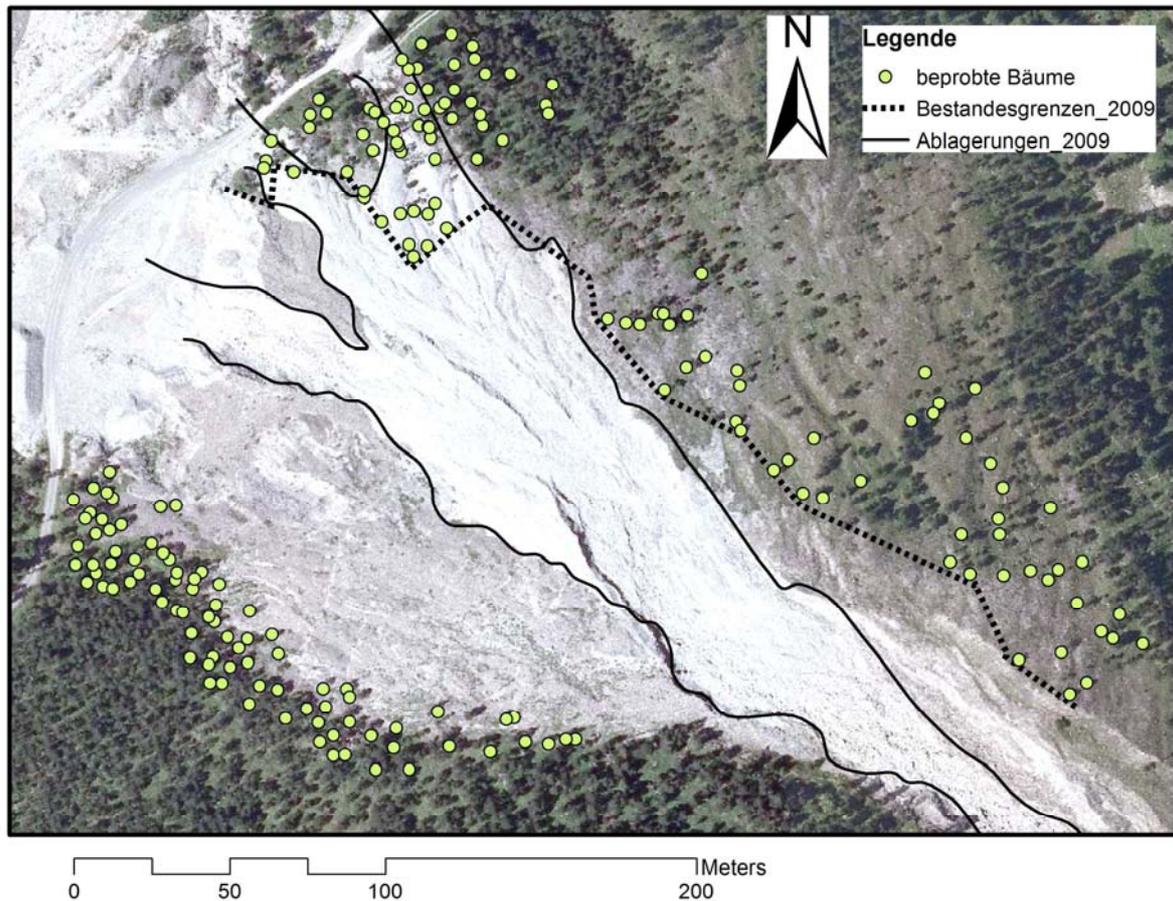
**Abbildung 53: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 2001**

Auf dem Luftbild aus dem Jahr 2001 (Abbildung 53) zeigen die hellen Ablagerungen deutliche seitliche Lappen. Der Bestandesrand hat sich zum östlichen Rand des Ablagerungsgebiets zurückgezogen. Zwei einzelne Bäume sind in der Mitte der Ablagerungen sichtbar. Die Ablagerungen im unteren Bereich erscheinen dunkler gefärbt. Am westlichen Rand des Ablagerungsgebietes sind keine hellen Ablagerungen zu erkennen.



**Abbildung 54: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 2005**

In Abbildung 54 reichen helle Ablagerungen wieder bis zur Straße. Direkt oberhalb der Straße hat sich ein Graben gebildet, sichtbar an den Schatten am orographisch linken Rand. Die Ablagerungen erscheinen aufgegabelt, der rechte Arm der Ablagerungen reicht bis zu Sektor A. Der Bestandesrand ist relativ unverändert geblieben. Einzig der höher gelegene der zwei Einzelbäume aus Abbildung 53 ist nicht mehr zu sehen.



**Abbildung 55: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 2009**

Abbildung 55 zeigt das aktuelle Bild der Bärenrufe. Die Lage der hellen Ablagerungen ist im Vergleich zu Abbildung 54 in etwa gleich geblieben. Der rechte Arm reicht nun weiter in Sektor A hinein. Die Bestandesgrenze ist gleich geblieben, der einzelne Baum in der Mitte des Ablagerungsgebietes ist nicht mehr sichtbar.

Der Vergleich historischer Luftbilder zeigt Veränderungen des Prozessgeschehens und auch der Vegetation im Untersuchungsgebiet. Während auf den älteren Luftbildern (vor allem Abbildung 51) noch helle Ablagerungen am westlichen Bestandesrand zu sehen waren, haben sich die Prozessaktivität im Laufe der Zeit mehr nach Osten verlagert. Auf dem aktuellen Luftbild (Abbildung 55) sind im westlichen Teil des Ablagerungsgebietes keine frischen Ablagerungen zu sehen.

Auf den Luftbildern ist auch eine deutliche Veränderung der Vegetationsstruktur zu erkennen. Die Bestandesgrenze verschiebt sich im Laufe der Zeit mehr nach Osten, die inselförmige Baumgruppe in Abbildung 55 und 56 noch deutlich zu sehen verschwindet gänzlich.

Auch merkt man Veränderungen der Vegetation in Bereichen die nicht von den Ablagerungen beeinflusst erscheinen. So nimmt in Sektor C bzw. nördlich davon Anzahl und auch Dichte der Bäume zusehends ab. Vor allem zwischen den Luftbildern 1973 und 2001 (Abbildung 51 und 52) ist eine deutliche Veränderung zu bemerken. Von 2001 bis 2009 hat sich die Vegetationsstruktur hier aber kaum verändert. Im Gegensatz zu den auffälligen Veränderungen im Nordosten sind am südwestlichen Rand des Ablagerungsgebietes kaum Veränderungen zu bemerken. Hier blieb die Vegetationsstruktur und Dichte in den letzten 60 Jahren im Allgemeinen gleich.

## 6. Diskussion

### 6.1 *Interpretation von Alter und Alterstruktur der beprobten Bäume*

Das Alter von Bäumen wurde von anderen Autoren für die Rekonstruktion von Murgangaktivität verwendet (Strunk 1995, Bollschweiler et al. 2008a, Mayer et al. 2010). Diese Arbeit verwendet vor allem Wachstumsreaktionen für die Rekonstruktion der Murgangaktivität, weswegen der Altersbestimmung weniger Aufwand gewidmet wurde und keine Korrekturen für Beprobungshöhe (McCarthy et al. 1991) oder für fehlende Jahrringe beim Mark (Bosch & Gutiérrez 1999) vorgenommen wurde. Somit ist das ermittelte Alter nur als Minimalalter zu verstehen.

Generell überrascht das hohe Alter der für diese Arbeit beprobten Spirken. So hat die älteste Spirke 450 gemessene Jahrringe. Weiters gibt es mehrere Bäume die zumindest 300 Jahre alt sind. In der Literatur finden sich zum Maximalalter von Spirken wenige Angaben. Die Angaben gehen meist nicht über 300 Jahre hinaus (Mayer 1984, Schlegel 1985). In Schweingruber (1993) wird allerdings ein Maximalalter von bis zu 500 Jahren angegeben.

Eine Interpretation der räumlichen Altersverteilung ist nur mit Einschränkungen möglich. In Abbildung 40 zeigen sich allerdings Unterschiede zwischen den drei Sektoren des Untersuchungsgebiets hinsichtlich der Alterverteilung der beprobten Bäume. In Sektor A haben Bäume am Bestandesrand überwiegend ein Alter von 50-100 Jahren, einige wenige ein Alter von 0-50 Jahre. In Sektor A und C präsentiert sich ein anderes Bild, das Alter der Bäume am Bestandesrand streut stärker, vor allem in Sektor A.

Die Wirkung von Murgängen kann zum Tod und Ausfall beeinflusster Bäume führen, etwa durch starke Verschüttung oder Entwurzelung durch den Anpralldruck eines Murganges. Gering mächtige Murgangablagerungen bewirken eher nur schwächere Wachstumsreaktionen und bewirken nicht den Tod eines Baumes (Strunk 1995, Stoffel & Bollschweiler 2008). Murgangablagerungen, die in einem Gebiet zum Tod und Ausfall der dort wachsenden Bäume bewirkt haben, können in Folge wieder von Vegetation besiedelt werden. Diese Wiederbesiedlung von Murgangablagerungen geschieht in der Regel mit mehreren Jahren Verzögerung (Strunk 1995).

Somit kann die Altersverteilung in Sektor A als Indiz für eine starke Beeinflussung durch Murgänge in der Vergangenheit interpretiert werden, die zum Ausfall einzelner älterer Bäume

und einer Wiederbesiedlung der freigewordenen Flächen durch Jungwuchs geführt hat. Die Tatsache, dass in diesem Sektor zum Zeitpunkt der Beprobung zahlreiche tote stehende Bäume zu sehen waren, die meist in mächtigen Ablagerungen standen, unterstützt diese Vermutung. In Sektor B hingegen werden die Bäume vermutlich nur von geringmächtigen Ablagerungen beeinflusst. Das Alter der Bäume nimmt zur Mitte des Ablagerungsgebiets generell ab. Auch erscheinen die Ablagerungen auf dem aktuellen Luftbild dunkler und daher wahrscheinlich älter als in Sektor A (siehe Abbildung 55). Dies und auch der in diesem Gebiet beobachtete Jungwuchs (siehe Abbildung 25) lässt vermuten, dass es in der jüngeren Vergangenheit zu einer abnehmenden Murgangaktivität und einem Ausbreiten des Bestandes kommt.

## **6.2 Referenzkurven, geomorphische und klimatische Schwankungen der Vergangenheit**

Eine Auffälligkeit beim Vergleich der drei Kurven in Abbildung 42 ist, dass die Kurve des Sektor B im Zeitraum von etwa 1850 bis 1910 deutlich höher als die anderen Kurven liegt. Da die Einzelwerte der Kurven die Mittelwerte der Jahrringbreite repräsentieren, war in diesem Zeitraum das Wachstum von Bäumen in Sektor B größer als in den anderen Sektoren A und C.

Ein Erklärungsversuch für diese Auffälligkeit ist eine mögliche Beeinflussung durch die „kleine Eiszeit“, Little ice age (LIA) von 1570 bis 1900 (Grove 2004). In einer Studie zum Einfluss der kleinen Eiszeit auf die Murgangaktivität eines Einzugsgebiets in den Schweizer Alpen, wurde eine erhöhte Ereignisaktivität nach 1855 festgestellt, die etwa bis 1935 andauerte. Die Autoren geben als mögliche Gründe für diese Anomalie eine erhöhte Ereignisaktivität als Folge auf reichlich Niederschlag in den Sommer- und Herbstmonaten der Jahre zwischen 1864 und 1895 an sowie die feucht-warmen Bedingungen der Periode von 1916 bis 1935 in den Schweizer Alpen (Stoffel & Beniston 2006).

Abgesehen von dem erhöhten Wachstum von Bäumen in Sektor B konnte bei dieser Arbeit keine erhöhte Ereignisaktivität in Zusammenhang mit der kleinen Eiszeit festgestellt werden. Eine Erklärung ist eine höhere Ereignisaktivität in Sektor B zu dieser Zeit. Da Murgangablagerungen vor allem auf nährstoffarmen Dolomit-Standorten die Wachstumsbedingungen von betroffenen Bäumen verbessern können (Strunk 1995, Stoffel & Bollschweiler 2008), wäre es denkbar, dass eine intensivere Ereignisaktivität am westlichen Rand des Ablagerungsgebiets dort das Wachstum der Bäume stimuliert hat, während Bäume anderer Sektoren da von unbeeinflusst blieben. Unterstützt wird diese Vermutung von dem

Luftbild aus dem Jahr 1950 (Abbildung 51). Hier sind frische helle Ablagerungen vor allem im westlichen Teil des Ablagerungsgebietes zu sehen. Es ist denkbar, dass auch vor dem Zeitpunkt der Aufnahme des Bildes das Prozessgeschehen am westlichen Rand intensiver war.

Eine andere Auffälligkeit der Referenzkurven ist das erhöhte Wachstum seit etwa dem Jahr 2000. Betrachtet man die Kurve von Sektor C, so erscheint diese über einen langen Zeitraum relativ stabil und liegt vor allem im 19. und 20. Jahrhundert meist unter einem Wert von 0,4 mm. In den letzten Jahren ist ein Ansteigen auf Werte von über 0,6 mm zu beobachten. Die anderen Kurven zeigen ähnliche Charakteristik wenn auch weniger ausgeprägt. Die Wachstumsbedingungen im Untersuchungsgebiet vor allem in Sektor C haben sich scheinbar im letzten Jahrzehnt verbessert. Allerdings wurden diese Beobachtungen nicht auf statistische Signifikanz überprüft.

### **6.3 Filterung des Lawineneinfluss**

Bei anderen Arbeiten war eine Filterung von Lawinenereignisse aus der erstellten Ereignischronik mit Hilfe dendrogeomorphologischer Methoden möglich, etwa durch selektive Beprobung (u.a. Mayer et al. 2010) oder mit Hilfe traumatischer Harzkanäle zur Identifizierung von Lawinenereignissen (Stoffel et al. 2006, Szymczak et al. 2010).

Bei dieser Arbeit wurde der Versuch unternommen durch die Analyse von Proben von scheinbar von Lawinen beeinflussten Bäumen einzelne Ereignisse als Lawinen zu identifizieren. Wie in Kapitel 5.5 erläutert hat sich diese Methodik allerdings als nicht zielführend erwiesen. Es war nicht möglich einzelne Ereignisse als Lawinen zu identifizieren, da die in den betreffenden Bäumen gefundenen Wachstumsreaktionen untypisch für eine Beeinflussung durch Lawinen sind (siehe Kapitel 5.5 und Tabelle 6).

So sind es vor allem Wachstumsreaktionen, wie abrupte Zuwachseinbrüche, Kallusgewebe, Druckholzbildung oder exzentrischer Wuchs, die auf eine Beeinflussung durch Lawinen schließen lassen (Butler 1979, Larocque et al. 2001, Stoffel et al. 2006, Stoffel & Bollschweiler 2008).

Derartige deutliche Reaktionen konnte in den Jahrringen der Proben aus Sektor C nicht gefunden werden. Zuwachschübe und schwacher Druckholzansatz waren hier die häufigsten Wachstumsreaktionen.

### **6.3.1 Überlegungen zum Wuchsbild der Bäume in Sektor C**

Die beprobten Bäumen in Sektor C wiesen Anzeichen auf Lawinenaktivität auf. So wurden Wipfelbruch oder geneigter Wuchs bei Bäumen als Indiz für Beeinflussung durch Schneelawinen in der Vergangenheit erkannt (Bartelt & Stöckli 2001, Stoffel & Bollschweiler 2008). Allerdings derartige Wuchsbilder können auch von anderen Prozessen als Lawinen verursacht werden (Schönenberger et al. 1994), weswegen eine Hypothese über das Prozessgeschehens, welche allein das Wuchsbild von scheinbar beeinflussten Bäumen in Betracht zieht, generell unsicher ist.

Es stellt sich die Frage, was den speziellen Wuchs dieser Bäume bewirkt hat, der zu der Annahme verleitet, dass diese Bäume von Lawinen beeinflusst wurden.

Mögliche Erklärungen sind:

a) Beeinflussung durch Lawinen aber keine deutlichen Reaktionen

Es wäre möglich, dass die Bäume sehr wohl von Lawinen beeinflusst wurden, aber keine Reaktionen in den Jahrringen zu finden sind. In Anbetracht des generell geringen Wachstums in diesem Sektor erscheint es möglich, dass die Reaktionen auf Ereignisse nur sehr schwach ausgefallen sind und bei den Analysen gar nicht wahrgenommen wurden. Trotz des hohen Alters haben die Bäume in diesen Sektor nur bescheidene Dimensionen erreicht. Die Höhe etwa liegt meist nur zwischen 3 und 5 m, während in den anderen Sektoren jüngere Exemplare deutlich größere Wuchshöhen erreicht haben. Auch die Jahrringbreite der Bäume in Sektor C ist generell geringer als in den anderen Sektoren (Abbildung 42). Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass die Bäume keine auffälligen Reaktionen auf die schädigende Auswirkung einer Lawine wie Schiefstellung oder Wipfelbruch gezeigt haben.

b) Aufgelockerte Bestandesstruktur aufgrund natürlicher Zerfallsdynamik

Denkbar ist auch eine natürlicher Zerfall eines überalterten Bestandes mit fehlender Verjüngung oder eine Änderung von Wachstumsbedingungen in diesem Gebiet, die das Absterben von Bäumen bewirkt. Betrachtet man historische Luftbilder und vergleicht mit dem derzeitigen Zustand so ist eine Dynamik in der Bestandesentwicklung und ein Rückgang in der Bestandesdichte in Sektor C zu erkennen (siehe Kapitel 5.8). Auf dem alten Luftbild aus dem Jahr 1950 (Abbildung 51) erscheint die Bestandesdichte noch vergleichsweise hoch.

Natürliche Zerfallsdynamiken von Spirkenwälder wurden etwa von Brang (1989) untersucht. Faktoren die das Absterben von einzelnen Bäumen bewirken sind einerseits Wind- und Schneebruch, die meist ein abruptes Absterben nach sich ziehen. Andererseits kann Pilz- oder Insektenbefall und auch Überalterung kann ebenfalls zum Absterben von Bäumen führen. In diesem Fall zeichnet sich der Tod meist schon Jahrzehnte vorher durch reduziertes Wachstum ab. Diese Bäume verbleiben meist als stehende Baumleichen. Einige dieser Bäume stehen noch 70 Jahre nach ihrem Absterben (Brang 1989).

Die zahlreichen stehenden toten Bäume in Sektor C, das generell eher geringe Höhen-Durchmesser-Verhältnis und häufige Kernfäule in beprobten Bäumen lassen einen natürlichen Zerfall durch biotische Schadfaktoren oder Überalterung vermuten.

Die Ergebnisse von Brang (1989) können nicht vorbehaltlos auf das Untersuchungsgebiet der Bärenrüfe übertragen werden. Bei den untersuchten Beständen handelt es sich um aus Kahlschlägen im 18. und 19. Jahrhundert hervorgegangene Spirkenwälder. Die Versuchsflächen liegen im Kanton Graubünden, Schweiz, in der subalpinen Stufe auf etwa 1920 m und weisen im Gegensatz zum Gamperdonatal ein kontinentales Klima.

### c) Geringe Bestandeshöhe aufgrund extremer Standortbedingungen

Der Wuchs der Bäume kann auch weder durch Lawinen noch Bestandeszerfall bewirkt werden sondern allein durch Standortbedingungen. In Mayer (1974) wird der Bestandestyp Bergkiefernwald (*Mugetum-arboreae*) in mehreren Ausprägungen beschrieben. Die zwei Hauptausprägungen des *Mugetum-arboreae*, der Schneeheide-Bergspirkenwald (*Erico-mugetum*) und der Alpenrosen-Bergspirkenwald (*Rhododendro hirsuti-mugetum*), weisen weitere Untergesellschaften auf. So wird auch eine flechtenreiche Variante des *Erico-mugetum* beschrieben, das *Erico-mugetum cladonietosum*. Dieser Typ des Bergkiefernwaldes ist auf klimatisch ungünstige Standorte mit langer Schneelage, Flachgründigkeit und starker Austrocknungsneigung beschränkt. Die Spirke ist auf diesen Standorten mit einer Höhe von 6-8 m nur sehr gering wüchsig und erreicht in 100-200 Jahren 10-20 cm Durchmesser in 1,3 m Höhe (Mayer 1974).

Der Sektor C ähnelt in Ansätzen diesem Typ. Der stark aufgelockerte Bestand, das hohe Alter und die geringen Dimensionen der Bäume sprechen dafür. Die höchsten Bäume in Sektor C erreichen nur 9-10 m. Allerdings wurden auch Individuen beprobt und analysiert, welche selbst in über 350 Jahren nur einen BHD von max. 14 cm und eine Höhe von 3 m erreichen. Bei derart geringem Wachstum gerät auch dieser Erklärungsversuch in Notstand. Solche

schwach wüchsigen Exemplare stehen aber sehr exponiert, was die Austrocknung des Bodens weiter fördern kann und so das schwache Wachstum erklären könnte.

Eine weitere Variante des Bergkiefernwaldes ähnelt in seiner Beschreibung dem Bestand in Sektor C. Auf Standorten mit besonders langer Schneelage bildet sich eine Variante des *Mugetum-arboreae* mit beigemischten Zwergweiden (*Rhododendro hirsuti-mugetum salicetosum*). Die Zeigerpflanze für diesen Typ ist *Salix reticulata*. Hier sollen Spirken gar nur mehr 2-3 m hoch werden und teilweise nur als Kriechform bestehen können (Mayer 1974).

Allerdings konnten bei den Geländearbeiten in diesem Sektor keine Weiden gefunden werden. Auch lässt die Seehöhe von 1300-1350 m, die westliche Exposition und die Hangneigung von etwa 20 ° keine außergewöhnlich großen Schneemengen vermuten.

## **6.4 Murgangaktivität der Bärenrüfe**

### **6.4.1 Ereignischronik**

Archivdaten der Bärenrüfe enthalten Informationen über 4 Jahre, in denen es zu intensiven Massenverlagerungsprozessen gekommen ist. Durch die dendrogeomorphologischen Untersuchungen konnten 16 Ereignisjahre im Zeitraum 1839 bis 2007 identifiziert werden. Nur zwei durch Archivdaten belegte Ereignisjahre finden sich auch in den Ergebnissen dieser Arbeit, 1948 und 1991, während die Ereignisjahre 1979 und 1999 nicht bzw. nicht ausreichend durch Wachstumsreaktionen in Bäumen belegt werden konnten.

### **6.4.2 Indexwert $I_t$ der rekonstruierten Ereignisjahre**

Der Indexwert  $I_t$ , erstmalig für Massenbewegungen angewendet von Shroder (1978), soll eine Überschätzung jüngerer Ereignisse gegenüber älteren aufgrund einer höheren verfügbaren Probenanzahl vermeiden. Bei einer neueren dendrogeomorphologischen Studie der Murgangaktivität, bei der dieser Indexwert Anwendung fand, wurde ein Grenzwert von min. 4 % für die verlässliche Identifizierung eines Ereignisjahres verwendet. Dieser Wert konnte durch den Vergleich von Archivdaten und den Ergebnissen der dendrogeomorphologischen Untersuchung unterstützt werden (Mayer et al. 2010).

Für diese Arbeit wurde ebenfalls ein  $I_t$  von 4 % als Kriterium verwendet. In Einzelfällen wurden auch Jahre mit  $I_t < 4$  % als Ereignisjahre angesprochen, wenn etwa deutliche Verletzungen oder eine auffällig konzentrierte räumliche Anordnung der beeinflussten Bäume auf ein Murgangereignis hinwiesen.

Da die Rahmenbedingungen (Größe und Art des Einzugsgebiets, verwendete Baumart, etc.) dieser Arbeit anders sind, ist eine vorbehaltlose Übertragung dieses Grenzwertes nicht möglich. Allerdings zeigt sich bei einem Vergleich mit Archivdaten folgendes. Die durch Archivdaten bekannten Ereignisjahre 1948 und 1991 weisen ein It von 7,2 bzw. 8,7 auf (Tabelle 12). Diese Ereignisse waren sehr groß und haben weite Teile der Straße verschüttet (mündlich Hr. Gamon). Gleichzeitig haben nur etwa 8 % der Bäume des gesamten Untersuchungsgebiets mit Wachstumsreaktionen reagiert. So erscheint die Anwendung eines Grenzwertes von 4 % durchaus gerechtfertigt, da wohl nicht alle Ereignisse dasselbe Ausmaß hatten wie jene der Jahre 1948 und 1991.

Ereignis-jahre	Anzahl Bäume mit Reaktionen				Indexwert Gesamt	It für Sektoren einzeln		
	Gesamt	Sektor A	Sektor B	Sektor C		Sektor A	Sektor B	Sektor C
1839	10		4	6	17,2		40,0	19,4
1851	6		1	5	9,5		8,3	15,6
1878	4	1	3		4,5	4,5	11,1	
1906	3	3			2,4	7,9		
1922	20	5	10	5	13,7	10,9	18,5	10,9
1934	5		5		3,1		8,1	
1948	13	4	2	7	7,2	6,9	2,7	14,6
1961	10	2	8		4,9	3,3	9,8	
1968	6	5	1		2,9	7,9	1,2	
1981	22	12	10		10,7	19,0	11,9	
1987	22		19	3	10,7		22,6	6,3
1991	18	18			8,7	28,6		
1994	8	8			3,9	12,7		
1998	11	8	3		5,3	12,7	3,6	
2003	9	4	5		4,4	6,3	6,0	
2007	4	4			1,9	6,3		

**Tabelle 12: Vergleich Indexwert It berechnet für gesamtes Gebiet und für einzelne Sektoren**

Nicht alle Ereignisjahre haben in allen drei Sektoren bei Bäumen Reaktionen ausgelöst (siehe Kapitel 5.4). Manche Ereignisse haben nur in einem Sektor Wachstumsreaktionen bewirkt (siehe Tabelle 8 bzw. 12). Verwendet man nun für die Berechnung von It die Gesamtanzahl aller beprobten und für die Analyse verwendeten Bäume im Untersuchungsgebiet, so ist der errechnete Prozentwert oft recht klein und liegt gar unter dem gewählten Grenzwert. Betrachtet man allerdings nur den beeinflussten Sektor und verwendet die Anzahl der Bäume in diesem Sektor für die Berechnung von It, so ist der berechnete prozentuelle Anteil zwangsläufig größer. So haben für das Ereignisjahr 1906 2,4 % der Bäume des gesamten Untersuchungsgebiets Wachstumsreaktionen gezeigt, das sind insgesamt 3 Bäume. Berechnet man den Indexwert nur für den betroffenen Sektor B, so haben fast 8 % der dortigen Bäume

reagiert und diese Zahl liegt deutlich über den Grenzwert von 4 %. Dasselbe Bild zeigt sich auch bei anderen Ereignisjahren (siehe Tabelle 12).

Es erscheint sinnvoll, den Indexwert eher auf homogene Teilbereiche zu beziehen, als auf das gesamte Untersuchungsgebiet, vor allem wenn man die unter Umständen großen Entfernungen bedenkt. So kann das Prozessgeschehen oder auch die Wachstumsbedingungen in einem anderen Abschnitt des Gebietes anders und es daher nicht zielführend sein, diese Gebiete bei der Berechnung von It zusammenzufassen.

### **6.4.3 Räumliche Verlagerung der Prozessaktivität**

Es war möglich auf die räumliche Verteilung der rekonstruierten Ereignisse Rückschlüsse zu ziehen. Es zeigte sich, dass die Ereignisse in der Vergangenheit unterschiedliche Teile des Schuttkegels bestrichen. So haben etwa die Ereignisse 1906, 1968, 1991 und 1994 beinahe ausschließlich Reaktionen in Sektor A ausgelöst, während die Ereignisse 1934 und 1987 nur Reaktionen in Bäumen des Sektors B bewirkt haben.

Diese Erkenntnisse lassen vermuten, dass nicht alle Ereignisse das gesamte Ablagerungsgebiet beeinflusst haben und sich der Ort des Prozessgeschehens in der Vergangenheit verlagert. Ein Vergleich historischer Luftbilder bestärkt diese Vermutung. Das Luftbild aufgenommen im Jahr 1950 zeigt, dass sich die Hauptaktivität der Bärenrufe weiter südwestlich befunden hat, als es auf den neueren Bildern 1970 und 2009 der Fall ist. In den letzten Jahrzehnten hat sich scheinbar das Prozessgeschehen mehr in den nordöstlichen Teil des Ablagerungsgebietes verschoben. Auch sind auf dem Luftbild 1950 frische Murgangablagerungen in Sektor C zu erkennen von. Diese Aktivität dürfte aber in den letzten Jahrzehnten rückgängig sein. Das unterstützt die anfängliche Vermutung, dass der Einfluss von Murgängen in diesem Sektor geringer ist.

Dass Murkegel zu seitlicher Verlagerung der Prozessaktivität neigen können und unterschiedliche Bereich des Murkegels vom Prozess bestrichen werden, ist durch Literatur gut belegt (Lehmann 1993, Hübl 1995). Der Umstand, dass zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedliche Bereiche eines Ablagerungsgebietes durch Murgänge beeinflusst werden, wird auch durch dendrogeomorphologische Studien bewiesen (Bollschweiler et al., 2008, Stoffel et al, 2008, Mayer et al., 2010).

Wie der Vergleich der Luftbilder zeigt, kann diese Änderung des Prozessgeschehens eine deutliche Beeinflussung und gar die Auflösung des lokalen Baumbestandes (wie in Sektor A) bewirken.

#### **6.4.4 Einschränkungen der räumlichen Rekonstruktion**

Bei anderen dendrogeomorphologischen Untersuchungen konnte anhand der Lage von beeinflussten Bäumen das Ausbreitverhalten und die räumliche Verteilung des Murgangmaterials recht genau rekonstruiert werden. Hierfür wurde eine Aufnahme und Kartierung von geomorphischen Merkmalen des Untersuchungsgebiets unternommen. Die verwendeten Wachstumsreaktionen waren meist Ansatz von Druckholz, traumatische Harzkanäle (TRD) oder eine andere Wachstumsreaktion mit gleichzeitiger Bildung von TRD, was auf eine direkte Beeinflussung der Bäume durch das Murgangmaterial schließen lässt (Bollschweiler et al. 2008, Stoffel et al. 2008).

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit kann jedoch weder das Alter von Ablagerungen noch ein Zusammenhang zwischen der räumlichen Verteilung von Bäumen mit Reaktionen und Murgangablagerungen abgeleitet werden. Einerseits wurde keine Kartierung geomorphischer Merkmale vorgenommen und andererseits war auf Basis der verwendeten Wachstumsreaktionen keine direkte Datierung von Murgangablagerungen möglich. Der Großteil der Wachstumsreaktionen, die für die Ereignisrekonstruktion in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, waren abrupte Zuwachsschübe. Diese können einerseits durch die Eliminierung eines Baumes und die darauf folgende Verbesserung der Wachstumsbedingungen eines nahe stehenden Baumes erklärt werden (u.a. in Stoffel & Bollschweiler 2008) oder auch durch einen positiven Düngungseffekt von Murgangablagerungen (Strunk 1995). Murgänge haben oft eine vorlaufende Welle aus feinerem Material, auch kann es zu einer nachträglichen Ausspülung der feinen Matrix aus Murgangablagerungen kommen (Takahashi 1981). So ist es denkbar, dass ein Baum eine Reaktion in Zusammenhang mit einem Ereignis zeigt, aber nicht direkt durch das Material des Murganges getroffen wurde.

Eine weitere Einschränkung der Möglichkeiten der räumlichen Rekonstruktion von Murgängen ist die Lage und Anzahl von geeigneten Probestämmen. So sind in der Bärenröfve vor allem die Ränder des Ablagerungsgebietes mit Bäumen bewachsen. Damit können Murgänge, die nur die Mitte des Ablagerungsgebietes beeinflusst haben, durch die Beprobung von Bäumen am Rand nicht erfasst werden. Wie auch auf den Luftbildern zu sehen ist, wird der Großteil des Materials in der Mitte des Ablagerungsgebietes transportiert und abgelagert (Abbildung 51 bis 55).

## **6.5 Ereignisauslösende Niederschläge**

Trotzdem die verwendete Methodik für die Fragestellung nicht passend war, ist dennoch eine Diskussion der Ergebnisse möglich.

Der Versuch die Ergebnisse dendrogeomorphologischer Analysen mit Niederschlagsdaten zu vergleichen und so Informationen über ereignisauslösende Bedingungen zu gewinnen, wurde bereits in anderen Forschungsarbeiten versucht (Stoffel et al. 2005, Szymczak et al. 2010). Für eine Forschungsarbeit im Einzugsgebiet des Meretschibaches im Wallis (Schweiz) waren die Grenzbedingungen, ob ein Niederschlagsereignis potentiell ereignisauslösend ist, entweder eine Niederschlagsintensität von über 5 mm/h oder eine Tagessumme des Niederschlages von min. 20 mm (Szymczak et al. 2010).

Die für diese Arbeit verwendeten höheren Grenzwerte des Tagesniederschlags von 30 mm (Fliri 1962) bzw. 50 mm (Wehry 1967) haben sich als nicht geeignet für die Identifizierung von ereignisauslösenden Niederschlagsbedingungen erwiesen. Meteorologische Messstationen nahe dem Untersuchungsgebiet haben in der Vergangenheit sehr oft Werte von 30 und 50 mm verzeichnet, oft sogar mehrmals in einem Jahr. Diese Niederschlagssummen sind somit keine Seltenheit in diesem Gebiet.

Vergleicht man die 20 größten Niederschlagssummen der Messperioden der Stationen Brand bzw. Thüringen mit den rekonstruierten Ereignisjahren, so finden sich in den Jahren 1922, 1948, 1994 und 1999 Tage mit sehr hohen Niederschlagssummen (siehe Tabelle 10). Wobei für die Jahre 1922 und 1948 nicht belegt werden kann, dass diese Niederschlagsereignisse in flüssiger Form waren, da keine Temperaturdaten zur Verfügung stehen.

Nicht alle rekonstruierten Ereignisse können mit hohen Tagesniederschlägen in Verbindung gesetzt werden. So finden sich für die Ereignisjahre 1934, 1961, 1968, 1987, 1998, 2003 und 2007 in den jeweiligen Jahren keine Tage mit außergewöhnlich hoher Niederschlagssumme. Betrachtet man für diese Ereignisjahre die 5 größten Niederschlagssummen des jeweiligen Jahres, so kann ebenfalls kein einzelner Tag erkannt werden, an dem überdurchschnittlich viel Niederschlag gemessen wurde.

Für Ereignisjahre vor 1920 ist keine Aussage möglich, da die kontinuierlichen Messdaten der Station Thüringen in diesem Jahr enden.

Durch Archiveinträge ist bekannt, dass es zwischen 29. und 30. Juli 1948 zu Massenbewegungen in der Bärenrufe gekommen ist (siehe Kapitel 3.5). Das Datum der hohen Niederschlagssummen (93,1 mm) ist allerdings der 19. Juni 1948. Am 29. bzw. am 30. Juni hat die Station Thüringen 13,3 bzw. 40,1 mm Tagesniederschlag gemessen. Somit kann die

hohe Niederschlagssumme vom 19. Juni nicht mit dem überlieferten Ereignis 1948 in Zusammenhang gesetzt werden. Im Gegenteil, als es zur Auslösung des Murganges in der Bärenrufe kam, wurde von der Messstation nur Niederschlagssummen verzeichnet, die nicht außergewöhnlich groß waren und in der Regel häufig pro Jahr gemessen werden.

Niederschläge, die Murgangereignisse auslösen, sind meist konvektive Gewitter mit hoher Intensität aber nur kurzer zeitlicher Dauer. Solche Ereignisse können durch Messungen der täglichen Niederschlagssumme kaum erfasst werden. So kann über den ganzen Tag gleichmäßig verteilter Regen dieselbe Niederschlagssumme bewirken wie ein halbstündiges Gewitter. Liegen die Niederschlagsdaten nur als Tagessummen vor, so sind solche Ereignisse nicht voneinander zu unterscheiden. Diese Problematik wurde von Strunk (1995) thematisiert. In seiner Arbeit konnte ebenfalls nur ein Teil der rekonstruierten Murgangereignissen einem eintägigen Starkregenereignis zugeordnet werden.

Das obere Einzugsgebiet oder Sammelgebiet der Bärenrufe hat eine Fläche von 0,55 km<sup>2</sup> und einer mittleren Neigung von etwa 100%. Die time of concentration (Konzentrationszeit) ist für dieses Einzugsgebiet etwa eine halbe Stunde (berechnet nach Clark 1945). Somit wird es bei einem Regenereignis relativ schnell entwässert. Dieser Konzentrationszeit ist eine Schätzung der Zeit, die erforderlich ist, dass das ganze Gebiet zum Abfluss beiträgt. Dies ist also jene Zeit, die ein Wassertropfen benötigt um von jenen Punkt des Einzugsgebietes, der dem Auslass des Einzugsgebietes am weitesten entfernt liegt, zum Auslass zu gelangen.

Die Anwendbarkeit von Niederschlagsdaten mit täglicher Auflösung (Tagesniederschlagssummen) für die Identifizierung ereignisauslösender Niederschläge ist in diesem Fall nicht gegeben. Niederschlagsdaten höherer zeitlicher Auflösung wären hier von Vorteil. Allerdings können auch hoch auflösende Niederschlagsdaten nur die Niederschlagsverhältnisse nahe der Messstation abbilden. Gewitterniederschläge zeichnen sich oft durch eine hohe räumliche Variabilität der Niederschlagsintensität aus. So kam es in einem Untersuchungsgebiet in Südtirol zu der Auslösung eines Murganges, während bei einer wenige Kilometer entfernt gelegenen Messstation blauer Himmel und kein Niederschlag verzeichnet wurde (Strunk 1995).

### **6.6 Niederschlagsvariabilität und Ereignisjahre**

Für die Identifizierung der Ereignisjahre der Bärenrufe wurden hauptsächlich Wachstumsreaktionen des Typs Zuwachsschub und Zuwachseinbruch verwendet, zusammengefasst rund 89 %. Von insgesamt 367 Wachstumsreaktionen waren 243 Zuwachsschübe und 82 Zuwachseinbrüche (siehe Tabelle 5).

Derartige Änderungen des Dickenwachstums können aber nicht nur von Murgänge hervorgerufen werden (Strunk 1995, Stoffel & Bollschweiler 2008), sondern auch durch klimatische Bedingungen. Für Waldkiefer auf flach gründigen, grobskelettreichen Standorten soll besonders ein Niederschlagsdefizit im Frühjahr einen negativen Einfluss auf die Jahrringbreite dieses Jahres haben (Oberhuber et al. 1998, Rigling et al. 2002, Eilmann et al. 2009). Insbesondere für die Monate März bis Mai besteht eine positive signifikante Korrelation zwischen mittlerem Monatsniederschlag und Jahrringbreite (Rigling et al. 2002).

So stellt sich die Frage, in wie weit die Zuwachseinbrüche dieser Arbeit auf klimatische Bedingungen zurückzuführen sind.

Vergleicht man die Variabilität der Monatssummen des Niederschlags mit den Ereignisjahren, so erscheint es unwahrscheinlich, dass die rekonstruierten Ereignisjahre eigentlich ihre Ursache in der Niederschlagsvariabilität haben. Manche Ereignisjahre weisen im Frühjahr besonders hohe (1961) bzw. niedrige Niederschlagssummen (1922, 1934, 1948, 1981, 1998 und 2003) auf (siehe Abbildung 50). Die Wachstumsreaktionen in Zusammenhang mit diesen Ereignisjahren waren meist sowohl Zuwachsschübe wie auch Zuwachseinbrüche und/oder andere Wachstumsreaktionen wie Verwundungen (1948, 1961, 1981, 1998, 2003). Es erscheint daher unwahrscheinlich, dass die Ursache dieser Wachstumsreaktionen der Einfluss des Niederschlags ist. Zwei Ereignisjahre sind allerdings nur durch Zuwachsschübe (1922) bzw. Zuwachseinbrüche (1934) belegt (siehe Tabelle 6). Trotzdem einige dieser Wachstumsreaktionen gleichzeitig Druckholzansatz aufweisen, kann hier auf Basis der vorliegenden Informationen nicht ausgeschlossen werden, dass diese Wachstumsreaktionen klimatischen Ursprungs sind. Die Mittelkurven, die das Wachstum der Bäume im Untersuchungsgebiet integrieren sollen, zeigen zudem einen gewissen analogen Verlauf der Änderung der mittleren Jahrringbreite, ein Ansteigen ab 1922 und einen Einbruch im Jahr 1934 (siehe Abbildung 42).

### **6.7 Die Spirke und die Dendrogeomorphologie**

Die Art *Pinus mugo ssp. uncinata* wurde bereits mehrmals für dendroökologische Untersuchungen verwendet (Genova 1986, Rolland & Schueller 1996, Camerero et al. 1998, Neuwirth & Rolland 1996, Bosch & Gutiérrez 1999, Muntan et al. 2004), wobei sich nur Muntan et al. (2004) mit einer dendrogeomorphologische Fragestellung, der Rekonstruktion von Lawinenaktivität, beschäftigt hat.

Ein Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der generellen Eignung der Art *Pinus mugo ssp. uncinata*, der Spirke, für dendrogeomorphologische Arbeiten.

In der Literatur wird die Verwendung dieser Art vor allem für dendroklimatologische Untersuchungen empfohlen, da sie deutliche Jahrringe bildet, ein hohes Alter erreichen kann und auch auf extrem trockenen Standorten wächst (Schweingruber 1993). Allerdings stören geomorphische Ereignisse wie Murgänge die Bildung einer rein klimatologisch beeinflussten Jahrringssequenz. So wird in der Literatur meist empfohlen für dendroklimatologische Studien von derartigen Prozessen unbeeinflusste Standorte zu wählen (Schweingruber 1983).

Strunk (1995) weist auf zwei Einschränkungen der Verwendung von *Pinus mugo ssp. uncinata* für dendrogeomorphologische Arbeiten hin. Einerseits, dass es schwierig sei eine Referenzkurve mit von dem Prozess unbeeinflussten Bäumen der Umstand, da diese Art nur auf geomorphisch aktiven Gebieten konkurrenzfähig ist. Andererseits wird auf die geringere Sensibilität der nahe verwandten Waldkiefer gegenüber Überschüttungen mit Murgangmaterial aufgrund ihres tiefreichenden Wurzelwerks hingewiesen (Strunk 1995).

### **6.7.1 Referenzkurven aus prozess-beeinflussten Proben**

Bei der Analyse von Probenmaterial von Bäumen, die durch geomorphische Prozesse beeinflusst wurden, ist eine Synchronisierung der Messkurven erforderlich um Fehler in den Messkurven wie fehlende oder doppelte Jahrringe zu korrigieren. Hierfür wird die Erstellung einer Referenzkurve der Jahrringbreite mittels eigens beprobter von Störungen unbeeinflusster Bäume empfohlen (Fritts 1976, Schweingruber 1983, Cook & Kairiukstis 1990). Diese Methode wurde häufig bei dendrogeomorphologischen Arbeiten angewandt (u.a. Muntan et al. 2004, Stoffel et al. 2005, Mayer et al. 2010).

Es zeigte sich in dieser Arbeit, dass auch die Verwendung prozessbeeinflusster Proben für die Synchronisierung durchaus zu guten Ergebnissen führen kann.

Die drei Mittelkurven, die in dieser Arbeit für die Synchronisierung verwendet wurden, waren trotz dem störenden Einfluss der Murgangaktivität in den verwendeten Proben einander ähnlich und zeigten ähnliche Charakteristiken. Der klimatologische Einfluss scheint zu überwiegen, während Störsignale wie die Beeinflussung des Wachstums durch Murgänge unterdrückt wird.

Wie in Abbildung 42 zu sehen ist, sind die drei Kurven vor allem im 20. Jahrhundert einander in ihrem Verlauf sehr ähnlich. Auffällige peaks und Einbrüche der Jahrringbreite korrelieren meist sehr gut, obwohl die dafür verwendeten Bäume oft weit verstreut standen. Im Zeitraum

vor der zweiten Hälfte des 19. Jahrhundert nimmt die Übereinstimmung der Kurven allerdings deutlich ab. Dies ist durch die immer geringer werdende Probenanzahl zu erklären (siehe auch Abbildung 43).

### **6.7.2 Physiologische Einschränkungen**

Die Waldkiefer soll mit ihrem tiefreichenden Wurzelwerk generell weniger sensibel gegenüber Verschüttung sein als Baumarten mit flachstreichendem Wurzelwerk. Umgelegt auf die nah verwandte Spirke soll diese damit weniger gut geeignet für dendrogeomorphologische Untersuchungen als die eher flachwurzelnde Fichte (Strunk 1995). Die gute Eignung der Fichte wird durch ihre häufige Verwendung bei Forschungsarbeiten zu diesem Thema und deren gute Ergebnisse bestätigt (u.a. Stoffel et al. 2005, Mayer et al. 2010).

Im Untersuchungsgebiet wuchsen beigemischt unter Spirken auch einige Fichten, die auch beprobt und analysiert wurden. So können diese zwei Arten zumindest qualitativ verglichen werden. Es zeigte sich kaum Unterschied im Wachstum und der Intensität der Wachstumsreaktionen von Fichten und Spirken. Es ist zu vermuten, dass die Umweltbedingungen wie Boden oder Niederschlag das Wachstum der Bäume stärker beeinflussen als arttypische Faktoren wie das Wurzelwerk.

Die Spirke ist an trockene Schotterstandorte gut angepasst ist, während die Fichte auf solchen Standorten keinen Wachstumsvorteil hat und meist nicht konkurrenzfähig ist (Mayer 1974).

Eine Einschränkung in der Verwendung der Spirke ist das Fehlen von traumatischen Harzkanälen. Diese Wachstumsreaktionen wurden bei anderen Arbeiten erfolgreich verwendet, etwa für die intra-saisonalen Datierung von Ereignissen (Kaczka & Morin 2006, Stoffel 2008) oder die Identifizierung von Lawinenereignissen (Stoffel et al. 2006).

### **6.7.3 Variabilität des Wachstums**

Bei der Analyse der Proben konnte festgestellt werden, dass die Jahrringbreite der Spirken im Untersuchungsgebiet starken Schwankungen unterliegen. So wirken die Messkurven der Jahrringbreite sehr unruhig mit zahlreichen Höhen und Tiefen.

Eine Erklärung hierfür ist der Boden, in dem die beprobten Bäume wurzeln. Murgangmaterial hat in der Regel nur ein geringes Wasserhaltevermögen und neigt zu rascher Austrocknung (Mayer 1974). Bäume auf diesem Substrat stehen somit häufig unter Trockenstress und reagieren in der Regel auf Trockenperioden mit deutlichen Zuwachsrückgang (Oberhuber et al. 2001)

Bei der Einteilung der Intensität der gefundenen Wachstumsreaktionen wurden keine a priori festgelegte Grenzwerte verwendet, wie etwa von Strunk (1995) vorgeschlagen. Vielmehr wurde eine flexible, subjektive Differenzierung der Intensität der Wachstumsreaktionen von Bäumen vorgenommen. Die Herleitung von für Spirken typischen Grenzwerten der Intensität von Wachstumsreaktionen erscheint für den inhomogenen ungleichaltrigen Bestand als nicht sinnvoll vor allem auch in anbetracht der starken klimatisch bedingten Variabilität des Wachstums auf diesem Standort.

Die Variabilität der Jahrringabstände der beprobten Bäume im Untersuchungsgebiet ist generell hoch. Offensichtlich unterliegt das Wachstum der Bäume auch ohne Murgangaktivität starken Schwankungen (siehe Abbildung 42).

## **7. Fachliches Nachwort**

Es folgen einige Gedanken und Anregungen zur Methodik der Dendrogeomorphologie, die bei der Arbeit an dieser Studie entstanden sind.

Die Dendrogeomorphologie bietet eine Vielzahl an Methoden und Möglichkeiten historische Informationen über die räumliche Verbreitung, Häufigkeit und Intensität verschiedenster Prozesse wie Murgänge oder Lawinen zu gewinnen. Geomorphische Prozesse können Bäume in unterschiedlicher Art und Weise beeinflussen und daher auch unterschiedliche Hinweise in deren Jahrringen hinterlassen. So bewirkt Steinschlag teilweise den Bruch von ganzen Ästen oder der gesamten Krone (z.B. Dorren & Berger 2005), während Murgänge reich an Feinmaterial sogar das Wachstum eines Baumes stimulieren können (Strunk 1995). Die Wachstumsreaktionen, die derartigen Einwirkungen folgen, können sehr unterschiedlich sein und können nicht immer verlässlich auf den untersuchten Prozess zurückgeführt werden.

Die Möglichkeit Proben von Bäumen zu nehmen, ist oft Einschränkungen unterworfen. So ist etwa das Fällen von Bäumen und die Entnahme von Stammscheiben oft nicht gestattet ist, wenn die Bäume einen besonderen Wert haben oder es sich um geschützte Arten handelt.

Derartige Einschränkungen erfordern eine speziell auf das jeweilige Untersuchungsgebiet, die lokalen Bedingungen, Baumarten und das dortige Prozessgeschehen angepasste Vorgehensweise der Beprobung.

Eine zeitgemäße Anwendung der Dendrogeomorphologie für die Rekonstruktion geomorphischer Prozesse benötigt in erster Linie eine klare Zielsetzung. Etwa welche Prozesse sollen erfasst und rekonstruiert werden, in welchem Zeitrahmen und mit welcher

Genauigkeit. Ist etwa die zeitliche Rekonstruktion der Prozessaktivität, deren räumlichen Verteilung oder die Prozessintensität Ziel des Projektes?

Einer klaren Festlegung der Ziele folgt eine Auswahl der für das konkrete Projekt geeigneten Verfahren oder Methoden. Bei dieser Auswahl ist zu bedenken, welche Auswirkungen das Prozessgeschehen auf die Bäume im Untersuchungsgebiet hat, mit welchen Reaktionen der Bäume auf diese Einwirkungen zu rechnen ist und wie können diese Reaktionen bestmöglich erfasst und quantifiziert werden.

Hier kann aus dem großen Fundus der Ergebnisse von Forschungsarbeiten und Untersuchungen geschöpft werden, die viele ForscherInnen zu diesem Thema in der Vergangenheit unternommen haben.

Die Ergebnisse dendrogeomorphologischer Rekonstruktionen sind wie auch viele andere Verfahren der Rekonstruktion vergangener Ereignisse mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Diese abzuschätzen und zu minimieren ist eine Herausforderung. Jedoch ist der Umgang mit dieser Unsicherheit und die Kommunikation derselben essentiell in einer seriösen Untersuchung.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufnahme eines Stammquerschnitts, helle rundliche Strukturen im Xylem sind Harzkanäle .....	11
Abbildung 2: Process-event-response concept nach Shroder (1980) angepasst für Murgänge (aus Stoffel & Bollschweiler 2010) .....	14
Abbildung 3: Bilder von Bohrproben mit Zuwachsreaktionen, oben Zuwachseinbruch, unten Zuwachsschub mit gleichzeitiger Druckholzbildung .....	16
Abbildung 4: links durch Murgang beschädigter Baum, dem Überwallungsgewebe wurde ein Keil entnommen, rechts Aufnahme der geschliffenen Probe mit Verletzung und Überwallungsgewebe .....	18
Abbildung 5: Aufnahme einer Bohrprobe mit zwei Reihen traumatischer Harzkanäle .....	19
Abbildung 6: links schief gestellter Baum, rechts Baum mit aufgebogenem Ast, der nun den Wipfel bildet .....	20
Abbildung 7: Übersichtskarte, Gamperdonatal und das Einzugsgebiet der Meng strichliert umrandet, Lage des Untersuchungsgebiet eingekreist mit Pfeil (Kartenausschnitt ÖK500, Quelle: BEV, Wien).....	25
Abbildung 8: Detailkarte, Untersuchungsgebiet Bärenrufe orographisch rechts der Meng, Siedlung Nenzinger Himmel im Süden (Kartenausschnitt ÖK50, Quelle: BEV, Wien) .....	26
Abbildung 9: Ausschnitt Geologische Karte Vorarlbergs, Gamperdonatal umrahmt mit Pfeil, Ausschnitt aus Legende (Quelle: Geologische Bundessanstalt, Wien) .....	27
Abbildung 10: Die Meng nahe der Siedlung Nenzinger Himmel, zu beachten sind u.a. gestreckter Verlauf und Geschiebeablagerungen, Aufnahme in Fließrichtung .....	28
Abbildung 11: Der Mittellauf der Meng, zu beachten sind u.a. der verzweigte Charakter sowie Ablagerungskegel seitlicher Zubringer, Aufnahme vom Gegenhang, Fließrichtung von rechts nach links .....	29
Abbildung 12: Oberes Einzugsgebiet der Bärenrufe, durch zahlreiche Gräben geprägt wird, Fundeltal und Gipfel des Fundelkopfes mit Pfeilen markiert.....	30
Abbildung 13: oben links Einzugsgebiet der Bärenrufe (Bild aufgenommen vom Gegenhang), oben rechts Tabelle mit Kennwerten des Einzugsgebietes, unten Längsprofil des Einzugsgebietes, wichtige Punkte mit Sternen markiert und beschriftet .....	31
Abbildung 14: verschiedene Stadien der Entwicklung eines Ablagerungskegels: A. Kegel in dynamischen Gleichgewicht, B. abwärts-schreitende Erosion aufgrund Änderungen im Einzugsgebiet, C. Ablagerungen an der Kegelspitze aufgrund erhöhtem Sedimentinput, D. aufwärts-schreitende Erosion aufgrund seitlicher Prozessänderungen am unteren Kegelrand, E. aufwärts-schreitende Erosion aufgrund Änderungen der Höhenlage am unteren Kegelrand, F. Typ E mit zusätzlicher Ausbildung eines Sekundärkegels (Quelle: Hübl, 2008) .....	32
Abbildung 15: oben Bildausschnitt Ablagerungsgebiet der Bärenrufe, Lage der Profile mit Linien eingezeichnet, unten Profile des Erosionsgrabens und der Kegeloberfläche orographisch rechts bzw. links des Grabens .....	33
Abbildung 16: Erosionsrinne Bärenrufe von unten gesehen, zu beachten sind Blöcke im Graben, terrassenartige Struktur und scharfe Erosionskante, Größenvergleich mit Person in Bildmitte .....	34
Abbildung 17: links große Blöcke auf den Ablagerungen orographisch rechts des Erosionsgrabens, rechts Ablagerungen der Stein- und Kiesfraktion, jeweils Mobiltelefon (Pfeil) in Bildmitte für Größenvergleich .....	35
Abbildung 18: links frischer Murlappen im unteren Kegelbereich, rechts mehrere ältere bereits mit Vegetation bedeckte Murlappen, rechts oben sind einige große Blöcke sichtbar, im Vordergrund ein Wildwechsel .....	35
Abbildung 19: Monatsniederschlagssummen berechnet auf Basis der Daten der Messtation Nenzinger Himmel	36

Abbildung 20: Bärenrufe bei Regenwetter, Gräben im oberen Einzugsgebiet sind wasserführend, im Ablagerungsgebiet ist kein Oberflächenabfluss sichtbar .....	37
Abbildung 21: links Wasseraustritt unterhalb Ablagerungen, rechts Ablagerung von Feinmaterial im Vorfeld der Bärenrufe.....	37
Abbildung 22: Aufnahme des Ablagerungsgebietes, Grenze des von Spirken-dominierten Bestandes markiert (Unterschied in Farbe und Struktur) .....	39
Abbildung 23: Schematischer Querschnitt durch Vegetation am unteren Kegelbereich (nicht masstabsgetreu, Blickrichtung bergauf) Mitte der Ablagerungen vegetationsfrei, oro links davon expandierender Bestand, Verjüngung und grasige Vegetation zum Teil auf sichtbaren Ablagerungen, oro rechts aufgelockerter Bestand im Zerfall, tote absterbende Bäume in frischen Ablagerungen, wenig Verjüngung, am Kegelrand zu beiden Seiten höhere Bäume mit Gras als Unterwuchs .....	40
Abbildung 24: ungefähre Lage des Vegetationsquerschnitt.....	40
Abbildung 25: links für dieses Gebiet typischer lockerer Spirkenbestand mit Grasbewuchs, rechts zwei exponiert wachsende Spirken am Bestandesrand, mit Fichten- und Spirkenverjüngung darunter.....	42
Abbildung 26: Aufnahme des Ablagerungsgebietes, zu beachten sind in der Mitte und rechts im Bild helle Linien, wahrscheinlich Wildwechsel .....	46
Abbildung 27: links Fichte mit starkem Wildverbiss, im Hintergrund sind die Ablagerungen der Bärenrufe sichtbar, rechts Wildfütterungshaus südlich der Bärenrufe.....	46
Abbildung 28: Textstück zu Unwetterschaden der Bärenrufe, Datum 1.8.1948 (Quelle: Archiv der WLW Vorarlberg).....	48
Abbildung 29: Textstück zu Ausbruch der Bärenrufe, Datum 2.8.1948 (Quelle: Archiv der WLW Vorarlberg) .	49
Abbildung 30: links geneigte und verkrüppelte Spirken, rechts Spirke mit mehrfachen Wipfelbruch nahe der Straße .....	51
Abbildung 31: Luftbild des Untersuchungsgebiets, beprobte Bäume und Sektoreneinteilung eingezeichnet .....	53
Abbildung 32: exponierte von frischen Murgängen beeinflusste Bäume in Sektor A .....	54
Abbildung 33: oberer Bereich von Sektor B, Blick bergauf, links jüngere Ablagerungen sichtbar.....	55
Abbildung 34: Bäume in Sektor C, zu beachten ist der niedrige, verkrüppelte Wuchs und Schiefstellung, Blickrichtung bergab.....	56
Abbildung 35: Stammscheibe mit Verletzung, eine Bohrprobe bei c genommen ist ideal hinsichtlich ihres Informationsgehalts und Vollständigkeit, bei a und b fehlen einige Jahrringe auf dem Bohrkern, bei d ist die Zuwachsänderung nur schwach ausgeprägt (Abbildung aus Stoffel und Bollschweiler, 2008).....	58
Abbildung 36: Beispiel eines Erhebungsformulars.....	59
Abbildung 37: links oben Jahrringmessanlage mit Stereoskop, rechts oben beschriftete Probe auf dem Messtisch, links unten Bild umgeleitet auf Fernseher, rechts unten Programm TSAPWin .....	63
Abbildung 38: Bild eines Jahrringes links mit Abgrenzung von Früh- und Spätholz sowie genauere Einteilung rechts (aus Stoffel et al. 2006).....	70
Abbildung 39: Lage der verwendeten meteorologischen Messstationen, Untersuchungsgebiet eingekreist, Kartenausschnitt ÖK 500 (Quelle: BEV Wien) .....	72
Abbildung 40: Boxplots der Jahrringanzahl der beprobten Bäume, Median - horizontale Linie, Quartile - obere bzw. untere Kanten der Boxen, Min- bzw. Max-wert - Ausdehnung der vertikalen Linien .....	77

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 41: Karte der Altersstruktur der beprobten Bäume, räumliche Interpolation mittels inverser Distanzenmethode (2. Potenz) .....	78
Abbildung 42: Mittelkurven der Sektoren A, B und C, Zeitraum 1700 bis 2009 n. Chr. ....	80
Abbildung 43: Verfügbare Anzahl an beprobten Bäumen (strichliert) und die Ereignisjahre (vertikale Linien) .	84
Abbildung 44: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1878 .....	86
Abbildung 45: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1906 .....	87
Abbildung 46: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1948 .....	88
Abbildung 47: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1987 .....	88
Abbildung 48: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1991 .....	88
Abbildung 49: Lage von Bäumen mit bzw. ohne Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit Ereignis 1998 .....	89
Abbildung 50: Variabilität des Niederschlags (Monatssumme April+Mai und Wachstumsperiode April bis September) im Vergleich mit Ereignisjahren (vertikalen grauen Linien) .....	93
Abbildung 51: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 1950.....	94
Abbildung 52: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 1973 .....	95
Abbildung 53: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 2001 .....	96
Abbildung 54: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 2005.....	97
Abbildung 55: Luftbild Bärenrufe aus dem Jahr 2009.....	98

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Archivdaten der Bärenrufe und der Meng.....	50
Tabelle 2: Informationen zu den verwendeten Messstationen .....	72
Tabelle 3: Anzahl beprobter Bäume und entnommener Proben nach Sektoren unterteilt.....	76
Tabelle 4: Median, Standardabweichung, Maximal- und Minimalwert der Jahrringanzahl der Proben, in Sektoren unterteilt .....	76
Tabelle 5; Auflistung von Wachstumsstörungen in Proben, nach Sektoren getrennt .....	81
Tabelle 6: Auflistung von Ereignisjahren und dazugehörigen Wachstumsstörungen, Summe der Störungen für die einzelnen Ereignisjahre, Indexwert It berechnet nach Shroder (1978).....	82
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Archivdaten zur Murgangaktivität der Bärenrufe und der Ergebnisse der dendrogeomorphologischen Analyse .....	83
Tabelle 8: Auflistung Ereignisjahre und dazugehöriger Anzahl von Bäumen mit Wachstumsstörungen, nach Sektoren getrennt .....	84
Tabelle 9: Niederschlagsdaten der Station Nenzinger Himmel, Anzahl Tage mit Niederschlagssumme größer 30 mm bzw. größer 50 mm, Ereignisjahre 2003 und 2007 schraffiert .....	90
Tabelle 10: die 20 höchsten Tagesniederschlagssummen in mm der Stationen Brand (N_B) und Thüringen (N_T), Tagesmitteltemperaturen der Stationen Thüringen (T_T) und Obervermunt (T_O).....	91
Tabelle 11: Die 5 größten Niederschlagssummen in mm der Stationen Brand (N_B) und Thüringen (N_T) in den Ereignisjahren 1961, 1968 und 1981, dazu Tagesmitteltemperaturen der Stationen Thüringen (T_T) und Obervermunt (T_O) .....	92
Tabelle 12: Vergleich Indexwert It berechnet für gesamtes Gebiet und für einzelne Sektoren .....	106

## Literaturverzeichnis

- Arbellay E, Stoffel M, Bollschweiler M, 2010: Dendrogeomorphic reconstruction of past debris-flow activity using injured broad-leaved trees, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol 35, pp 399-406.
- Aulitzky H, 1992: Die Sprache der „Stummen Zeugen“ (The language of „silent witnesses“), *Proc. Int. Symp. Interpraevent*, Bern, Switzerland, vol 6, pp 139-173.
- Bannan MW, 1936: vertical resin ducts in the secondary wood of the Abietineae. *New Phytology*. vol 35, pp 11-46.
- Bardou E, Ancey C, Bonnard C, Vulliet L, 2003: Classification of debrisflow deposits for hazard assessment in alpine areas, in: C.L. Chen, D. Rickenmann (Eds.), *Debris Flow Mechanics and Mitigation Conference*, Mills Press, Davos, (2003), pp 799–808.
- Bartelt P & Stöckli V, 2001: The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow. *Annals of Glaciology*, vol 32, pp 209–216.
- Blair TC & McPherson JG, 1994: Alluvial fan processes and forms, *Geomorphology of desert environments*, S. pp 354-402, Chapman & Hall, London, Glasgow, New York, Tokyo, Melbourne.
- Bollschweiler M, Stoffel M, Schneuwly DM, 2008a: Dynamics in debris-flow activity on a forested cone — A case study using different dendroecological approaches, *Catena*, vol 72, pp 67–78.
- Bollschweiler M, Stoffel M, Schneuwly DM, Bourqui K, 2008b: Traumatic resin ducts in *larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree physiology*, vol 28, pp 255-263
- Boratyńska K & Boratyński A, 2007: Taxonomic differences among closely related pines *Pinus sylvestris*, *P. mugo*, *P. uncinata*, *P. rotundata* and *P. uliginosa* as revealed in needle sclerenchyma cells, *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, vol 202 (7), pp 555-569.
- Bosch O & Gutiérrez E, 1999: La sucesión en los bosques de pinus uncinata del pirineo. De los anillos de crecimiento a la historia del bosque. *Ecologia*, vol 13, pp 133–171.
- Braam RR, Weiss EEJ, Burrough A, 1987: Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology, *Catena*, vol 14, pp 573–584.
- Brang P, 1989: Untersuchungen zur Zerfallsdynamik in unberührten Bergföhrenwäldern im Schweizerischen Nationalpark, *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol 140, pp 155-163.
- Bräuning A, 1995: Zur Anwendung der Dendrochronologie in den Geowissenschaften, *Die Erde*, vol. 3, pp 189-204.
- Butler DR, 1979: Snow avalanche path terrain and vegetation, *Glacier National Park, Montana. Arctic and Alpine Research*, vol 11, pp 17–32.
- Camarero J, Guerrero-Campo J & Gutierrez E, 1998: Tree-ring Growth and Structure of *Pinus uncinata* and *Pinus sylvestris* in the Central Spanish Pyrenees, *Arctic and Alpine Research*, vol 30 / 1, pp 1-10.
- Cannon SH & Ellen SD, 1988: Rainfall that resulted in abundant debris-flow activity during the storm, *US Geological Survey Professional Paper*, vol 1434, pp 27-33, Washington.
- Cech T & Tomiczek Ch, 1996: Zum Kiefernsterben in Niederösterreich. *FS-aktuell Wien*, vol 17/18, pp 12-13.
- Christensen KI, 1987: Taxonomic revision of the *Pinus mugo* complex and *P. X rhaetica* (*P. mugo X sylvestris*) (*Pinaceae*), *Nord. J. Bot.*, vol 7, pp 383-408.
- Cook ER & Kairiukstis LA 1990: *Methods of Dendrochronology — Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer, London.

- Clark CO, 1945: Storage and the unit hydrograph, Transactions: American Society of Civil Engineers, vol 110, pp 1419-1488.
- De graaf LWS, 1996: The fluvial factor in the evolution of alpine valleys and of ice-marginal topography in Vorarlberg (W-Austria) during the upper Pleistocene and Holocene, Z. Geomorph. N. F., suppl. 104, pp 129-159.
- Donaubauer E, 1994: Zur Wildschadenssituation in Europa, Proc. CIC-Tagung, Salzburg, pp 11.
- Dorren LKA & Berger F, 2005: Energy dissipation and stem breakage of trees at dynamic impacts. Tree Physiology, vol 26, pp 63–71.
- Douglass AE, 1920: Evidence of climatic effects in the annual rings of trees, Ecology, vol 1(1), pp 24-32.
- Eilmann B, Zweifel R, Buchmann N, Fonti P & Rigling A, 2009: Drought-induced adaptation of the xylem in Scots pine and pubescent oak, Tree Physiology, vol 29, pp. 1011–1020.
- Esau K, 1953: Plant anatomy, John Willey & sons, Inc., New York.
- Fliri F, 1962: Wetterlagenkunde von Tirol, Grundzüge der dynamischen Klimatologie eines alpinen Querprofils, Tiroler Wissenschaftsstudien, vol 13, Innsbruck, pp. 436.
- Fritts HC, 1976: Tree rings and climate, Academic Press, London, pp 567.
- García Álvarez S, Morla C, Solana Gutiérrez J, García-Amorena I, 2009: Taxonomic differences between *Pinus sylvestris* and *P. uncinata* revealed in the stomata and cuticle characters for use in the study of fossil material. Review of Palaeobotany and Palynology, vol 155, pp 61–68.
- Gemeinde Nenzing, 2010: 1910-2010 100 Jahre Hochwasserschutz in Nenzing, Eigenverlag.
- Génova R, 1986: Dendroclimatology of Mountain Pine (*Pinus uncinata* Ram.) in the central plain of Spain, Tree-ring bulletin, vol 46, pp 3-12.
- Grabner M, Wimmer R & Weichenberger J, 2004: Reconstructing the history of log-drifting in the Reichraminger Hintergebirge Austria, Dendrochronologie, vol 21/3, pp 131-137.
- Grissino-Mayer HD, 2003: A manual and tutorial for the proper use of an increment borer, Tree-Ring Research, vol 59, pp 63–79.
- Grove JM, 2004: Little Ice Ages: Ancient and Modern, 718 pp., Routledge, Boca Raton, Fla.
- Guttenberg A. Ritter von, 1915: Wachstum und Ertrag der Fichte im Hochgebirge, Verlag Franz Deuticke, Wien, Leipzig.
- Hochwasser 1910-2010, 100 Jahre Hochwasserschutz in Nenzing, Schriftenreihe Nr. 6 Sonderband, 2010, Nenzing
- Höllner P, Fromm R, Leitinger G, 2009: Snow forces on forest plants due to creep and glide. Forest Ecology and Management, vol 257, pp 546–552.
- Hübl J, 1995: Muren: Prozesse und Ablagerungsformen. Dissertation am Institut für Wildbach- und Lawinenschutz, Universität für Bodenkultur.
- Hübl J, Bunza G, Hafner K, 2003: ETAlp-Erosion, Transport in Alpinen Systemen, „Stummer Zeugen Katalog“ [unveröffentlicht]
- Hübl J, 2008: Ereignisdokumentation Prozesse: Wasser. Universitätskurs Ereignisdokumentation. Institut für Alpine Naturgefahren. Universität für Bodenkultur. Wien [unveröffentlicht]
- Hungr O, Evans SG, Bovis M, Hutchinson JN, 2001: Review of the classification of landslides of the flow type. Environmental and Engineering Geoscience, vol 7, pp 221-238.

- In der Gand H & Zupancic M, 1966: Snow gliding and avalanches. Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ., vol 69, pp 230–242.
- Jakob M & Hungr O (eds), 2005: Debris-flow hazards and related phenomena. Springer, Berlin.
- Kaczka RJ & Morin H, 2006: The dendrochronological records of debris flow activity in SE Quebec, TRACE, vol 5, pp 233-239.
- Kilian W, Müller F, Starlinger F, 1994: Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten, FBVA-Bericht Nr. 82 – 1994.
- Klein P, 1985: Dendrochronologische Untersuchungen an Gemäldetafeln und Musikinstrumenten, Dendrochronologica, vol 3, pp 25-44.
- Kozlowski TT & Pallardy SG 1997: Physiology of woody plants. Academic Press, San Diego, London, Boston, New York.
- Kupferschmid AD & Bugmann H, 2005: Effect of microsites, logs and ungulate browsing on *Picea abies* regeneration in a mountain forest, Forest Ecology and Management, vol 205.
- Kutschera L & Lichtenegger E, 2002: Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher, Leopold Stocker Verlag, Graz-Stuttgart.
- Land Tirol 2000: Lawinenhandbuch, Herausgeber Land Tirol, Tyrolia-Verlag, Innsbruck, Wien.
- Landsberg H, 1958: Physical Climatology, second ed. Gray, Printing Company, DuBois, PA, 446 pp.
- Larocque SJ, Héту B & Fillion L, 2001: Geomorphic and dendroecological impacts of slushflows in central Gaspé Peninsula (Québec, Canada) Geography Annals, vol 83, pp 191–201.
- Larson PR, 1994: The vascular cambium: Development and structure, Springer. Berlin, Heidelberg.
- Leal Pereira S 2008: Tree-ring growth trends in the Austrian Alps during the 20th century, Phd-thesis, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Lehmann C, 1993: Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen, Geographica Bernensia G 42, Geographisches Institut der Universität Bern.
- Mayer B et al. 2010: Frequency and spread of debris floods on fans: A dendrogeomorphic case study from a dolomite catchment in the Austrian Alps, Geomorphology.
- Mayer H, 1974: Wälder des Ostalpenraum, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Mayer H, 1977: Waldbau, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Mayer H, 1984: Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage. 3., neu bearbeitet Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- McCarthy DP, Luckmann BH, Kelly PE, 1991: Sampling height–age error correction for spruce seedlings in glacial forefields, Canadian Cordillera. Arctic and Alpine Research, vol 23, pp 451–455.
- McClung D & Schaerer P, 1993: The Avalanche Handbook, The Mountaineers Books, Seattle.
- Melton MA, 1965: The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. J Geol, vol 73, pp 1–38.
- Muntan E, Andreu L, Oller P, Gutierrez E, Martinez P, 2004: Dendrochronological study of the Canal del Roc Roig avalanche path: first results of the Aludex project in the Pyrenees, Annals of Glaciology, vol 38, pp 173-179.
- Nagy NE, Franceschi VR, Solheim H, Krekling T, Christiansen E, 2000: Wound induced traumatic resin duct development in stems of Norway spruce (*Pinaceae*): Anatomy and cytochemical traits, American Journal for Botany, vol. 87, pp 302-313.

- Oberhuber W, Stumböck M & Kofler W, 1998: Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness, *Trees*, vol 13, pp 19–27, Springer.
- Oberhuber W, Hofbauer W & Kofler W, 2001: Absterben und Wuchsanomalien der Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) auf Trockenstandorten des Tschirgant-Bergsturzes (Tirol), *Berichte des nat.-med. Verein Innsbruck*, vol 88, pp 87 – 97, Innsbruck.
- ONR 24800, 2009: Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifikation.
- Peter C, 2009: Natura 2000 - Der Vorarlberger Weg, Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abteilung Umweltschutz.
- Petitcolas V & Rolland C, 1996: Dendroecological study of three subalpine conifers in the region of Briançon (French Alps), *Dendrochronologia*, vol 14, pp 247-253.
- Phillips MA & Croueteau RB 1999: Resin-based defences in conifers, *trends plants science*, vol 4, pp 184-190
- Pollanschütz J, 1980: Jahrringmessung und Referenzprüfung, *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien*, vol 130, pp 263-285.
- Rapp A, 1987: Extreme weather situations causing mountain debris flows. In: Alexanderson H & Holmgren B (eds.): *Climatological extremes in the mountains, Physical background, geomorphological and ecological consequences*. UNGI Rapport, vol 65, pp 171-181, Uppsala.
- Reimoser F & Gossow H, 1996: Impact of ungulates on forest vegetation and its dependence on the silvicultural system, *Forest Ecology and Management*, vol 88, pp 107-119
- Rigling A, Bräker O, Schneiter G & Schweingruber FH, 2002: Intra-annual tree-ring parameters indicating differences in drought stress of *Pinus sylvestris* forests within Erico-Pinion in Valais (Switzerland). *Plant Ecology*, vol 163, pp. 105–121.
- Rinntech, 2010. LINTAB—Präzision—Jahrring für Jahrring. <http://www.rinntech.com/content/view/16/47/lang,german> (abgerufen am 18 Dezember 2010).
- Rolland C & Schueller J, 1996: Dendroclimatologie du Pin à crochets (*Pinus uncinata* Mill. Es Mirb.) dans le Briançonnais et le Queyras en fonction des conditions stationnelles, *Scheizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol 147, pp 351-363.
- Schlegel J, 1985: Allerlei Interessantes und Erstaunliches über die Bergföhre, *Bündner Wald*, vol 38, 4: pp 58-63.
- Schneuwly DM, 2009: Tree rings and rockfall - Anatomic tree reactions and spatio-temporal rockfall analysis, PhD thesis No. 1643, University of Fribourg.
- Schneuwly DM, Stoffel M, Bollschweiler M, 2009: Formation and spread of callus tissue and tangential rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* following rockfall impacts, *Tree Physiology*, vol 29, pp 281–289.
- Schönenberger W, Schweingruber F, Mattheck C, 1994: Baumformen an der oberen Waldgrenze. – *Bündnerwald*, vol 47/ 1, pp 35-42.
- Schütt P & Koch W, 1978: „Allgemeine Forstbotanik für Forstwirte“ Verlag Paul Parey, Hamburg Berlin
- Schweingruber FH, 1983: *Der Jahrring*, Paul Haupt, Bern, Stuttgart.
- Schweingruber FH, 1993: *Trees and Wood in Dendrochronology*, Springer. Berlin, Heidelberg.
- Schweingruber FH, 2001: *Dendroökologische Holz Anatomie*, Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- Schweingruber FH, Eckstein D, Serre-Bachet F & Bräker OU, 1990: Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology, *Dendrochronologia*, vol 8, pp 8-39, Verona.

- Shroder JF & Butler DR, 1986: Tree-ring analysis in the earth sciences. In: Jacoby, GC & Hornbeck JW (eds.), Proc. Int. Symp. "Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis", Lamont Doherty Geological Observatory, pp 186–212.
- Shroder JF, 1980: Dendrogeomorphology: review and new techniques of tree-ring dating, *Progress in Physical Geography*, vol 4, pp 161–188.
- Shroder, JF, 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliff Plateau, Utah. *Quaternary Research*, vol 9, pp 168–185.
- Starlinger F, 1999: Die Spirke – ein anspruchloser Baum an seinem Arealrand, Seltene Bäume Kostbarkeiten des heimischen Waldes, Tagungsband Igls-Vill, März 1999, pp 41-48.
- Stern R & Hopf J, 1988: Hochlagenaufforstung und Lawinenverbauung am Haggener Sonnberg im Sellrain, *Österreichische Forstzeitung*, Österreichische Agrarverlag, vol. 99(5), pp 50-51.
- Stoffel M & Bollschweiler M, 2008: Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview, *Natural Hazards Earth System Science*, vol 8, pp 17–202.
- Stoffel M et al., 2005: 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben VS, Switzerland, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, vol 37, pp 387– 395.
- Stoffel M, Bollschweiler M & Hassler GR, 2006: Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity – a dendrogeomorphological approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol 31, pp 1424–1437.
- Stoffel M & Beniston M, 2006: On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: A case study from the Swiss Alps, *Geophysical Research Letters*, vol 33.
- Stoffel M, 2008: Dating past geomorphic processes with tangential rows of traumatic resin ducts. *Dendrochronologia*, vol 26, pp 53–60.
- Stoffel M, Conus D, Grichting MA, Lièvre I & Maître G, 2008: Unravelling the patterns of late Holocene debris-flow activity on a cone in the Swiss Alps: chronology, environment and implications for the future. *Global and Planetary Change*, vol 60, pp 222–234.
- Stoffel M & Bollschweiler M, 2010: Tree rings and debris flows: Recent developments, future directions, *Progress in Physical Geography*, vol 34(5), pp 625–645.
- Stoffel M, Bollschweiler M, Butler DR, Luckman BH, 2010: Tree Rings and Natural Hazards – a State-of-the-Art, *Advances in Global Change Research*, vol 41, Springer.
- Stoffel M, 2010: Magnitude–frequency relationships of debris flows — A case study based on field surveys and tree-ring records, *Geomorphology*, vol 116, pp 67–76.
- Stokes MA & Smiley TL, 1968: An introduction to tree-ring dating, University of Chicago Press, Chicago, 73 pp.
- Strunk H, 1995: Dendrogeomorphologische Methoden zur Ermittlung der Murgangfrequenz und Beispiele ihrer Anwendung, Roderer, Regensburg.
- Szymczak S et al., 2010: Debris-flow activity and snow avalanches in a steep watershed of the Valais Alps (Switzerland): dendrogeomorphic event reconstruction and identification of triggers, *Geomorphology*, vol 116, pp 107-114.
- Taiz L & Zeiger E 1998: Plant physiology, 2nd edition, Sinauer associates, Inc., Publisher, Sunderland, Massachusetts.
- Takahashi T, 1981: Debris flow, annual review of fluid mechanics, vol 13, pp 57-77, Palo Alto.

- Tranquillini W, 1979: Physiological Ecology of the Alpine Timberline, Springer, Berlin.
- Tsoumis G, 1991: Science and technology of wood, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Wagenführ R, 1989: Anatomie des Holzes. VEB Fachverlag, Leipzig, pp 334.
- Wehry W, 1967: Hochwasser-Wetterlagen in den Alpen, Veröffentlichungen der Schweizerischen meteorologischen Zentralanstalt, vol 4, pp 179-182.
- Welsh A & Davies T, 2010: Identification of alluvial fans susceptible to debris-flow Hazards, Landslides, Springer online.
- Weinmeister W, 1979: Altersbestimmung von Holzproben – Eine Hilfe für die Gefahrenzonenplanung, Wildbach- und Lawinenverbau, Zeitschrift des Vereins der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs, vol 43. Jahrgang, Heft 2.
- Weiss A & Hays CJ, 2005: Calculating daily mean air temperatures by different methods: implications from a non-linear algorithm, Agricultural and Forest Meteorology, vol 128, pp 57–65.
- Wilford DJ, Sakals ME, Innes JL, Sidle RC & Bergerud WA, 2004: Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics, Landslides, vol 1, pp. 61–66, Springer online.
- Wimmer R & Strumia G, 1998. Spring drought indicated by intra-annual density fluctuations in *Pinus nigra*, V. Stravinskiene & R. Juknys (eds.), Dendrochronology and environmental trends, pp 139–147. Proc. Eurodendro – 98, Vytautas Magnus University, Kaunas.
- Zwenger P, 1989: Aufforstungsversuch auf einer Waldbrandflaeche mit Spirke (*Pinus uncinata*), Mitteilungsblatt für den Tiroler Forstdienst, vol 32 (3) pp 9-10.

[http://www.adaptalp.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=64:welcome-home&catid=79:static](http://www.adaptalp.org/index.php?option=com_content&view=article&id=64:welcome-home&catid=79:static)  
abgerufen am 3.12.2010

[http://www.dendrolab.ch/de/proj\\_adapt\\_alp.php](http://www.dendrolab.ch/de/proj_adapt_alp.php) abgerufen am 3.12.2010

## Anhang

### **A) Ausführliche Beschreibung der Mittelkurvenbildung**

Falls der beprobte Baum zum Zeitpunkt der Probenentnahme noch grüne Nadeln aufwies, ist anzunehmen, dass dieser Baum noch lebt und Radialzuwachs aufweist. Bei solchen Proben wurde der zuletzt gemessene Jahrring auf das Jahr 2009 datiert. Andernfalls blieb der letzte Jahrring undatiert (Schritt 1).

Nächster Schritt war ein visueller Vergleich der Datenreihen der Proben für jeden Baum ohne die Verwendung statistischer Hilfsmittel (Schritt 2). Es wurden Plots der gemessenen Jahrringbreite als Zeitreihen generiert, wobei auf der x-Achse die Jahre und auf der y-Achse die Jahrringbreite dargestellt sind. Erschienen die Kurven zueinander verschoben, so ist dies ein Indiz für Messfehler, fehlende oder überzählige Jahrringe. Proben mit gutem visuellen Zusammenhang wurden notiert. Bei diesen sind Fehler in den beiden Datenreihen unwahrscheinlicher.

Mit den Datenreihen dieser Liste ausgewählter Proben wurde nun eine Mittelkurve generiert. Mit der Software wurde für jedes Jahr das arithmetische Mittel der Jahrringabstände der ausgewählten Proben errechnet und als eigene Datenreihe abgespeichert (z.B. NEBa\_m1). Es wurde für die drei Sektoren A, B und C jeweils eine eigene Mittelkurve erstellt (Schritt 3).

Die für die Erstellung der jeweiligen Mittelkurve verwendeten Datenreihen wurden nun mit der Mittelkurve „cross dated“ (ausführlich erläutert in Schweingruber 1983). Dieses statistische Verfahren versucht die Datierung der einzelnen Datenreihen mit einer Referenzkurve (hier die erstellte Mittelkurve) (Schritt 4).

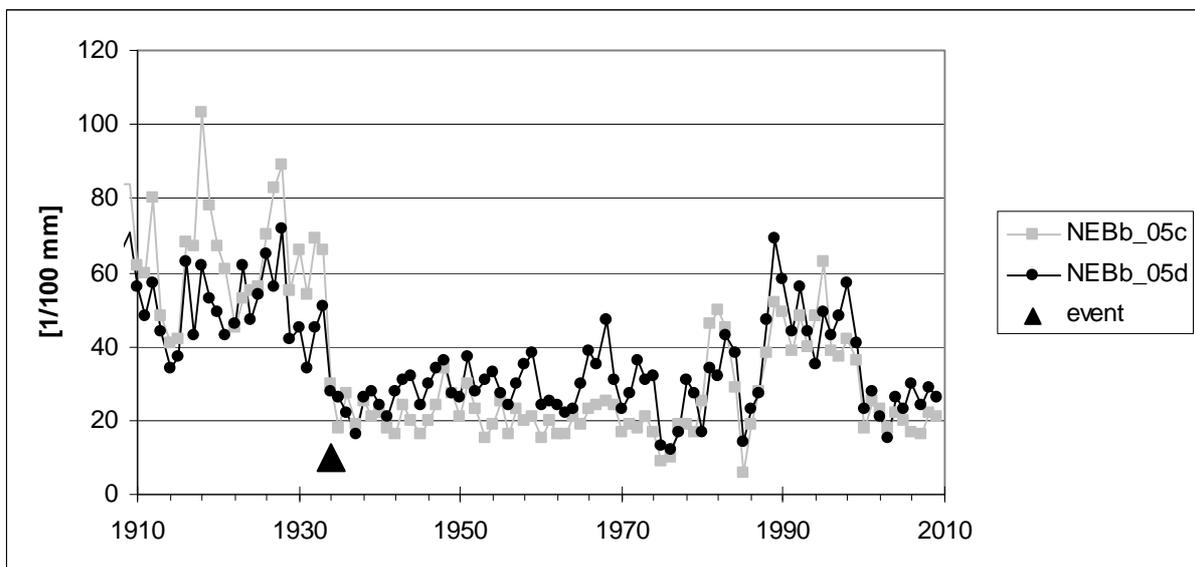
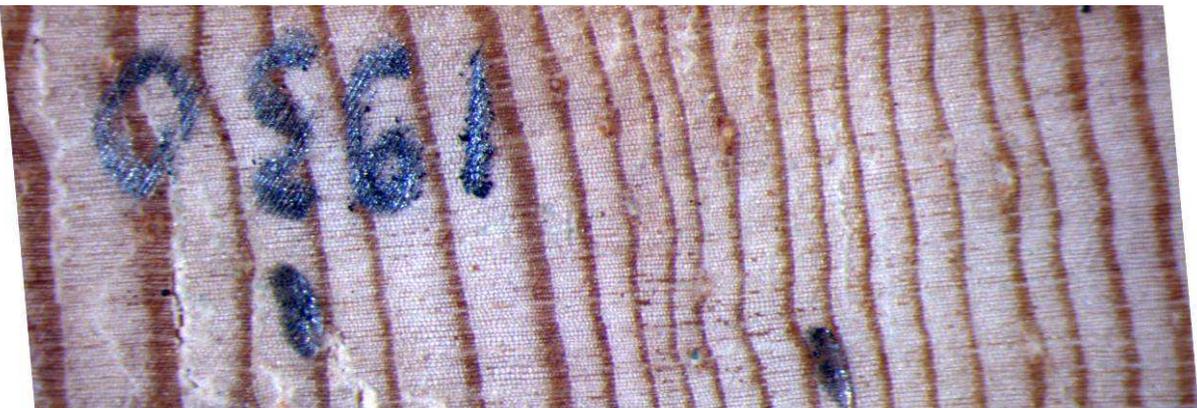
Datenreihen, die gewisse statistische Kriterien nicht erfüllten, wurden aus der Auswahl ausgeschlossen. Dies waren Datenreihen, deren zuletzt gemessener Jahrring von der statistischen Auswertung nicht auf das Jahr 2009 datiert wurde, die keine signifikante Gleichläufigkeit mit der Referenzkurve bzw. t-Werte kleiner 4 aufwiesen, wurden aus der Liste ausgewählter Datenreihen ausgeschlossen. Mit dieser neuen Auswahl an Datenreihen wurde eine neue Mittelkurve (NEBa\_m2) generiert (Schritt 5).

Mit dieser neuen Mittelkurve wurde im nächsten Schritt versucht alle Datenreihen dieses Sektors zu cross daten. Datenreihen, die den oben genannten statistischen Anforderungen entsprachen, wurden zu der Auswahl hinzugefügt und eine weitere Mittelkurve (NEBa\_m3) wurde erstellt (Schritt 6).

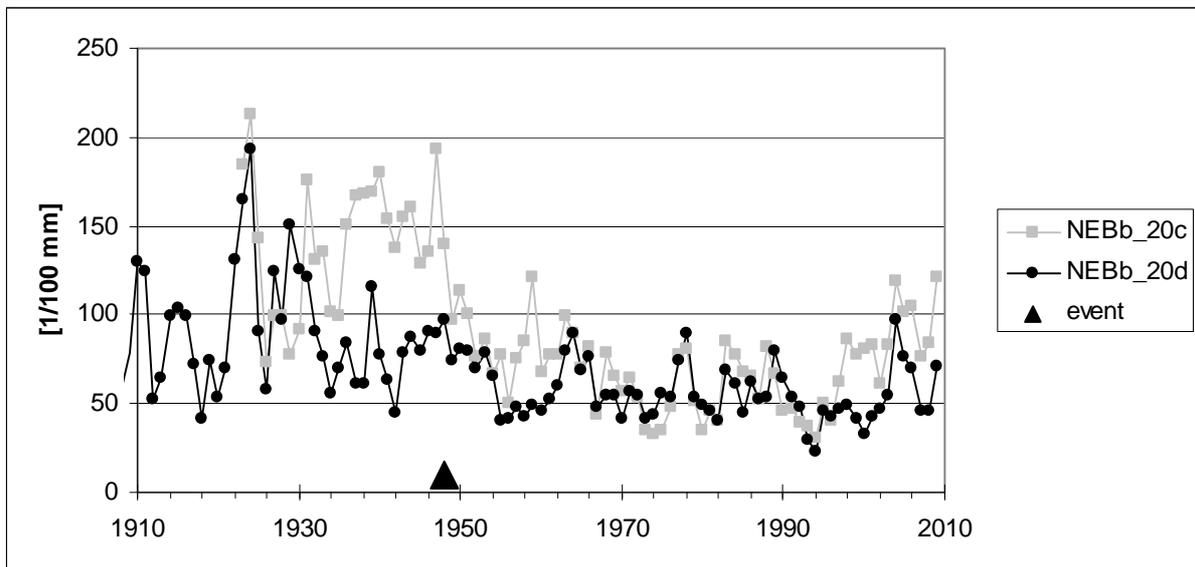
(Schritt 8) die neu erstellte Mittelkurve (NEBa\_m3) wurde nun noch einmal intern mit den bei der Erstellung verwendeten Datenreihen verglichen, der Vorgehensweise von Schritt 4 folgend. Datenreihen, die nicht den statistischen Anforderungen entsprachen, wurden entfernt und in mit der bereinigten Liste eine vorerst endgültige Mittelkurve erstellt (NEBa\_m4) (Schritt 9).

### **B) Beispiele für Wachstumsreaktionen**

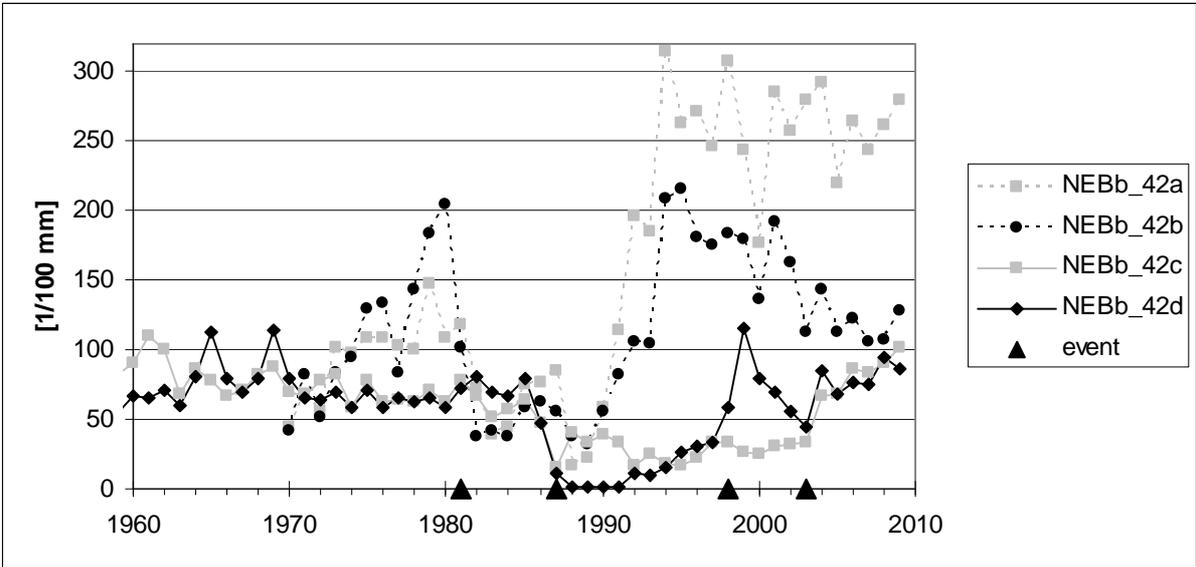
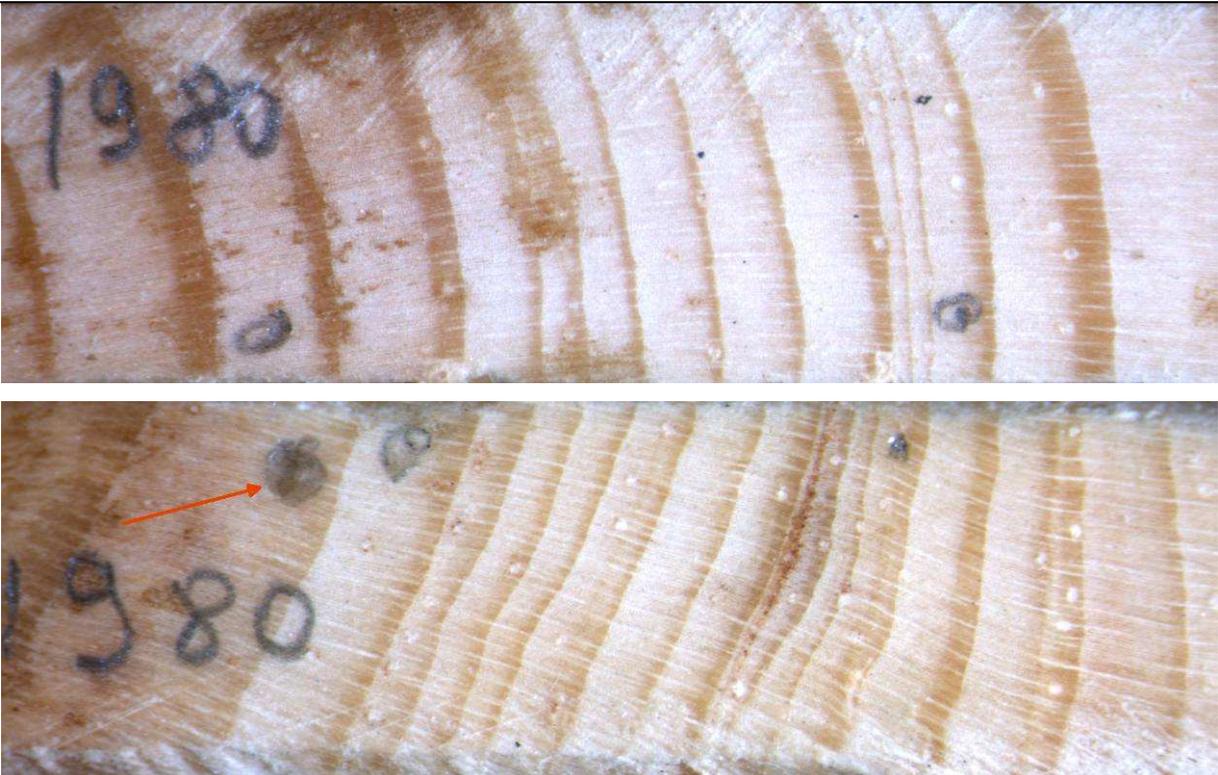
Zuwachseinbruch in 1934, Intensität 3: Aufnahmen der Proben, c-Probe oben, d-Probe unten



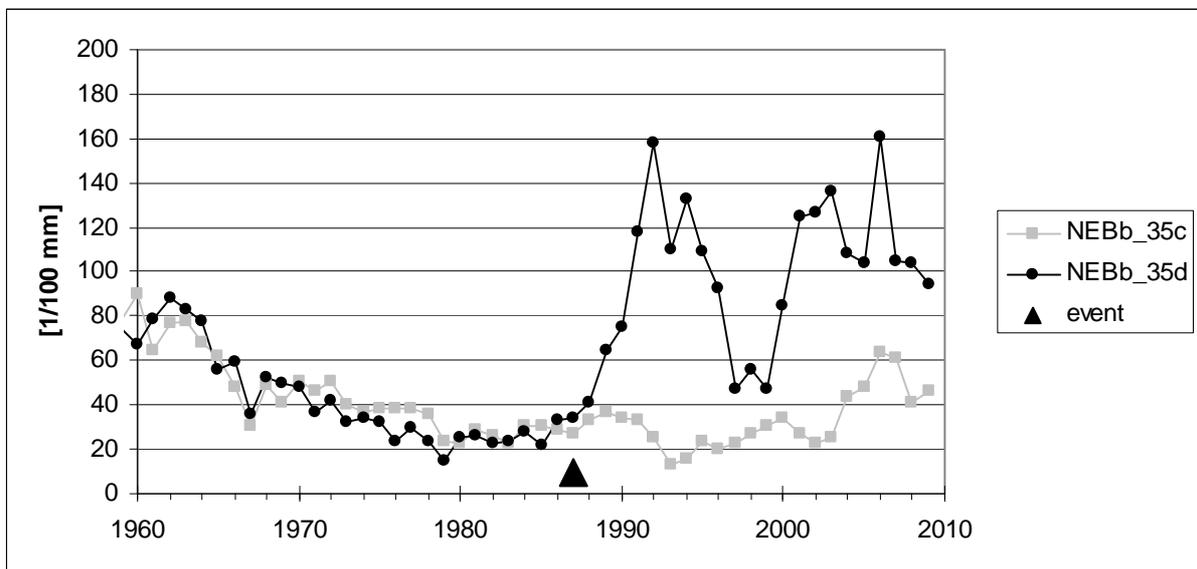
Zuwachseinbruch in 1949, Intensität 1: Aufnahmen der Proben, c-Probe oben, d-Probe unten



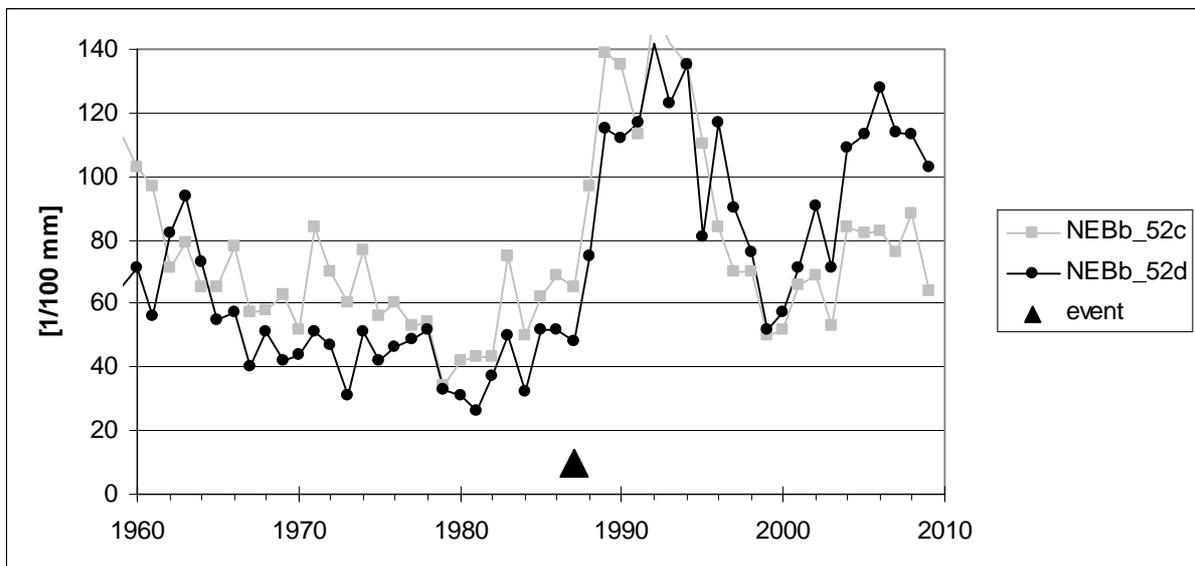
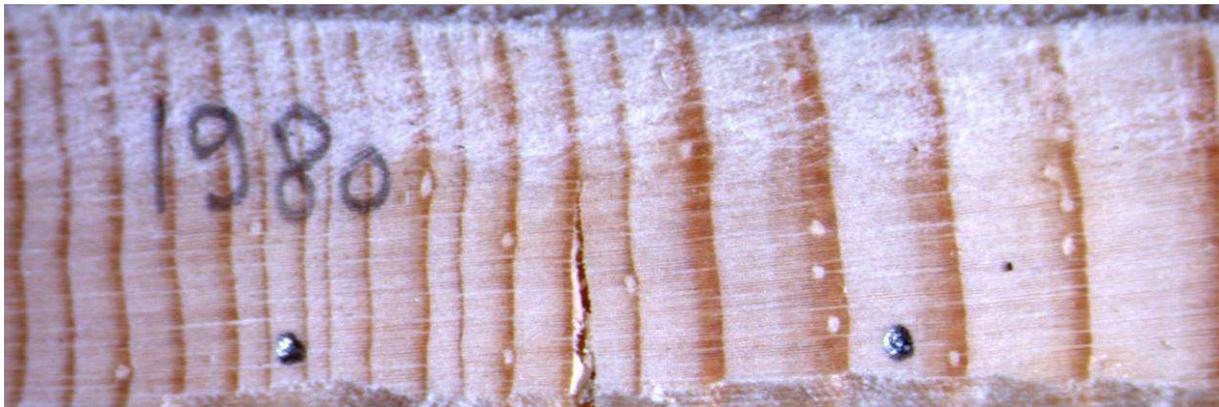
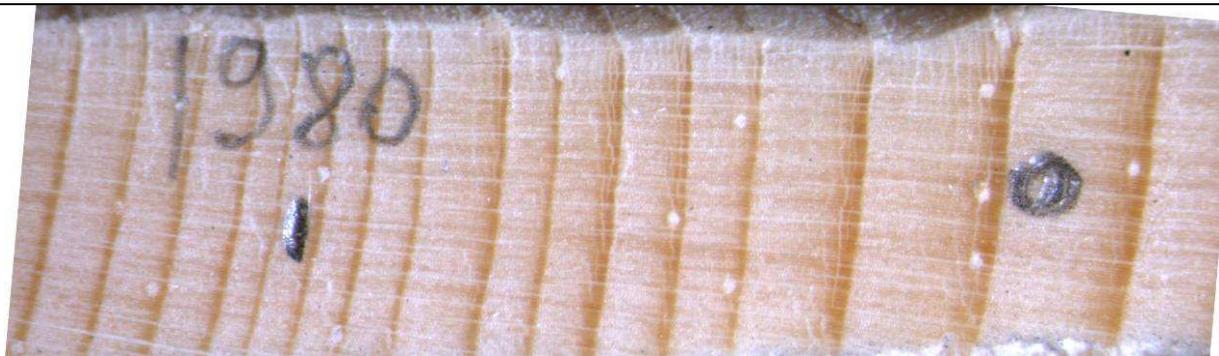
Zuwachseinbruch in 1982, Intensität 2: Aufnahmen der Proben, a-Probe oben, b-Probe unten



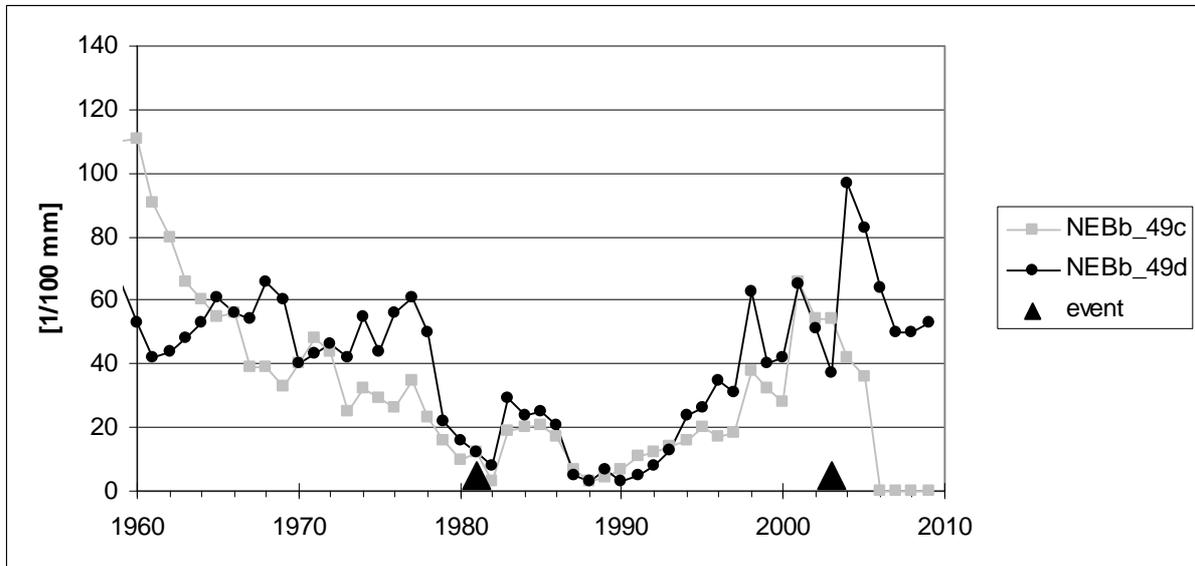
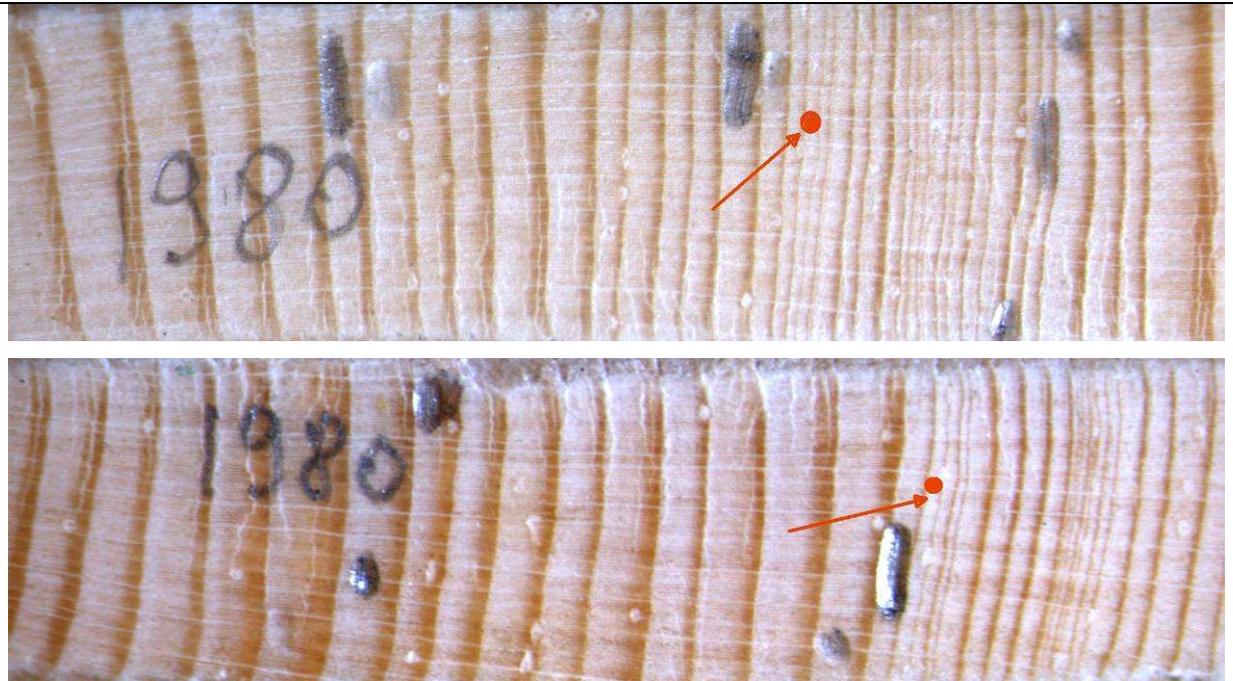
Einseitiger Zuwachsschub (mit Druckholzansatz) in 1988, Intensität 3: Aufnahmen der Proben, c-Probe oben, d-Probe unten



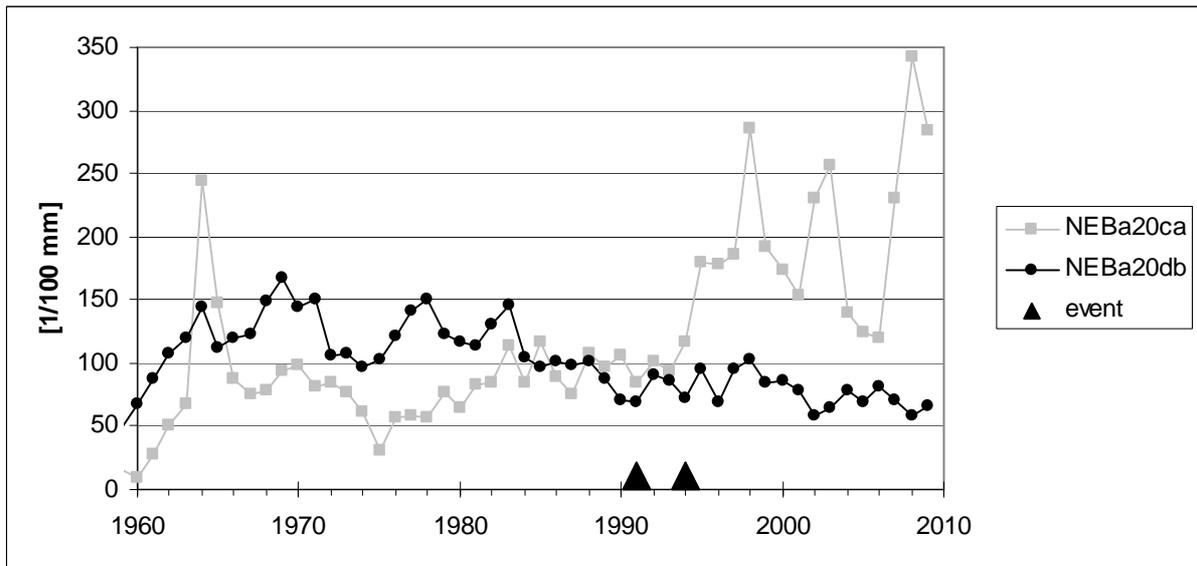
Zuwachsschub in 1988, Intensität 2: Aufnahmen der Proben, c-Probe oben, d-Probe unten



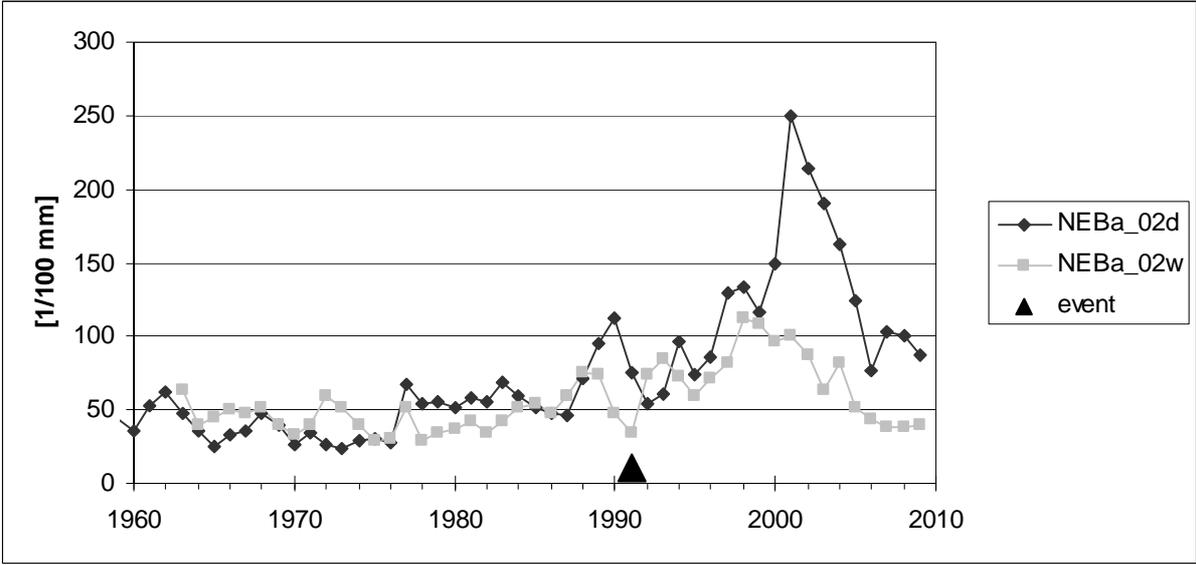
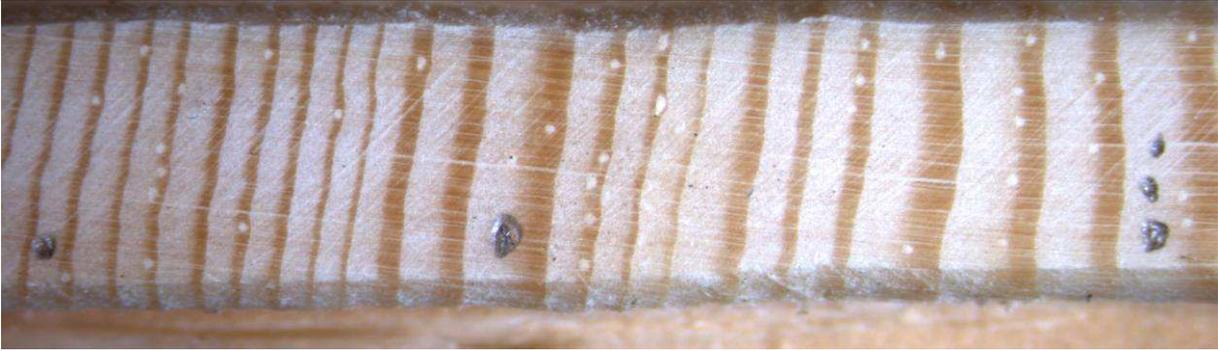
Zuwachsschub in 1983, Intensität 1: Aufnahmen der Proben, c-Probe oben, d-Probe unten  
Beschriftung der Probe fehlerhaft, Punkt markiert Jahr 1980



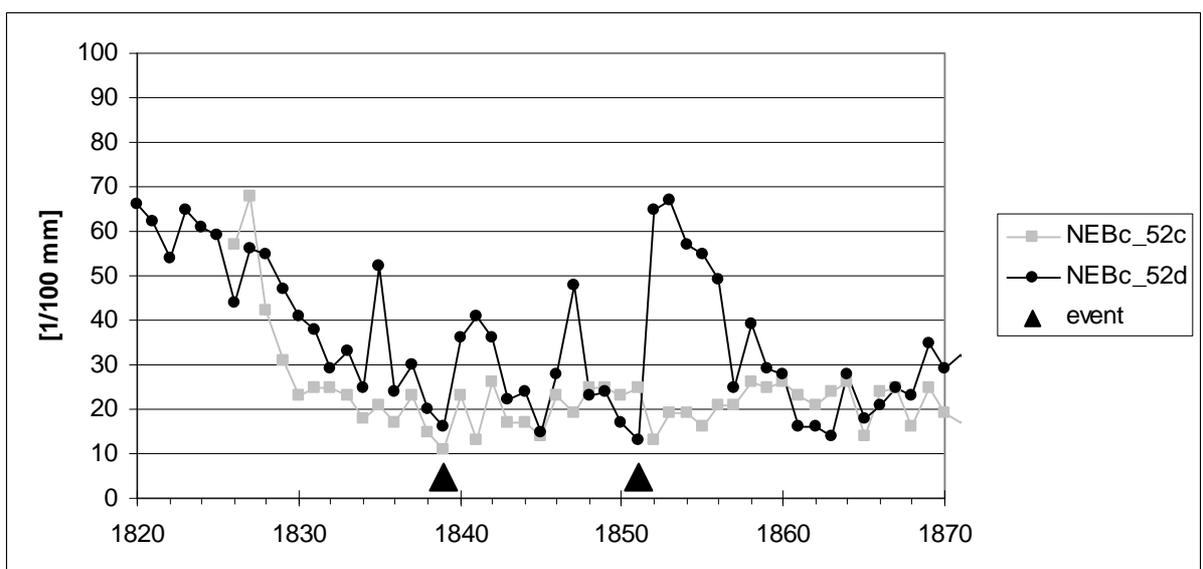
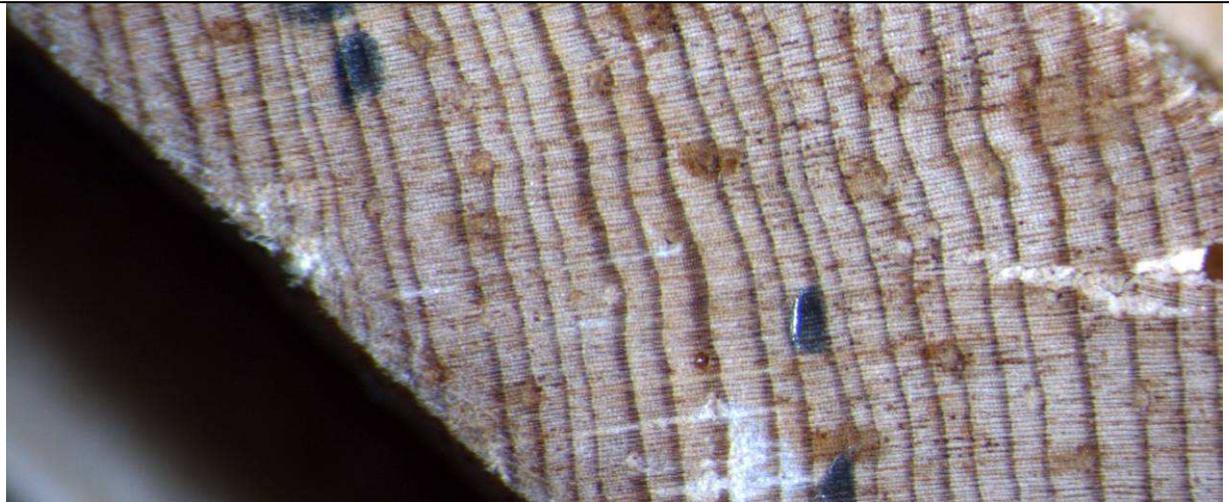
Traumatische Harzkanalreihen in 1991 und 1994: Aufnahmen der Proben, ca-Probe oben, db-Probe unten



Verwundung in 1991, Intensität 3: Aufnahmen der Proben, d-Probe oben, w-Probe unten



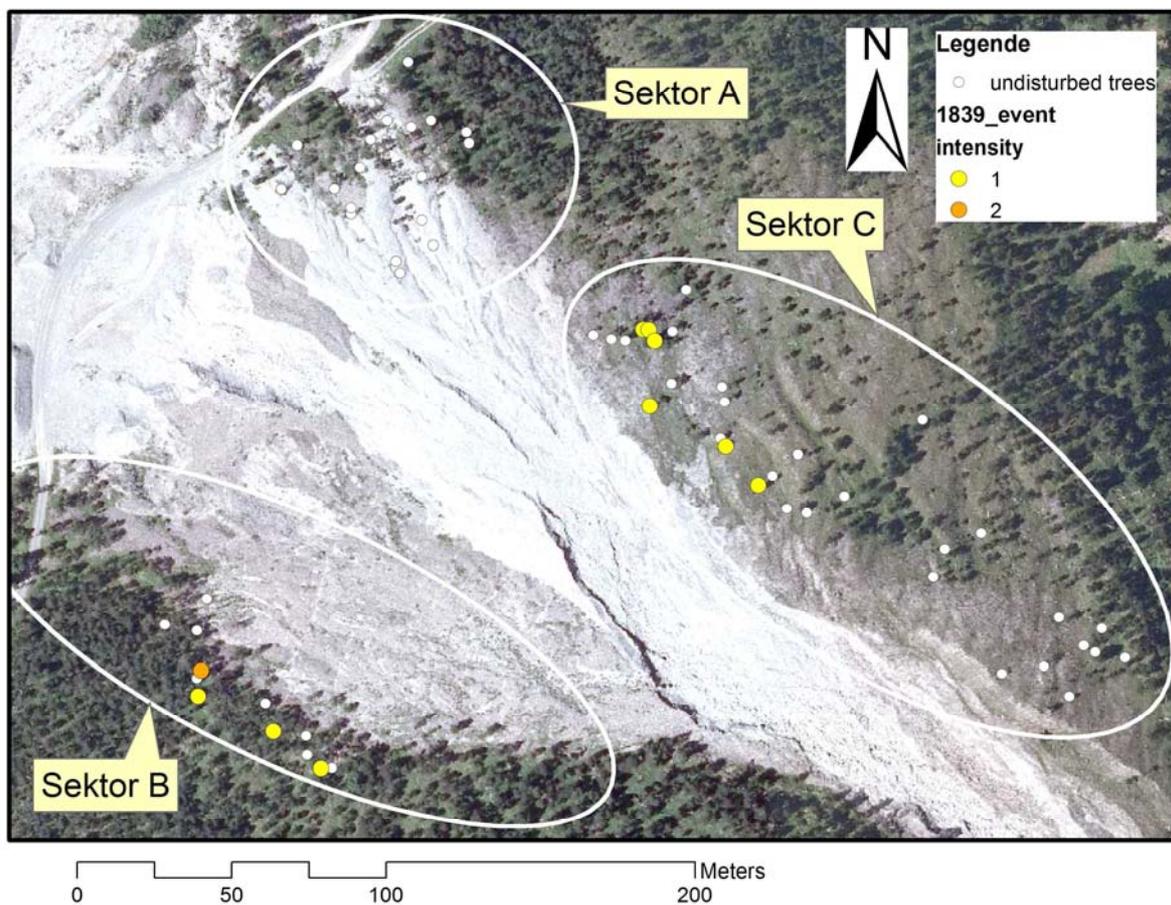
Druckholzansatz in 1852, Intensität 2: Aufnahmen der Proben, c-Probe oben, d-Probe unten



### **C) Ergebnisse der dendrogeomorphologischen Analyse im Detail**

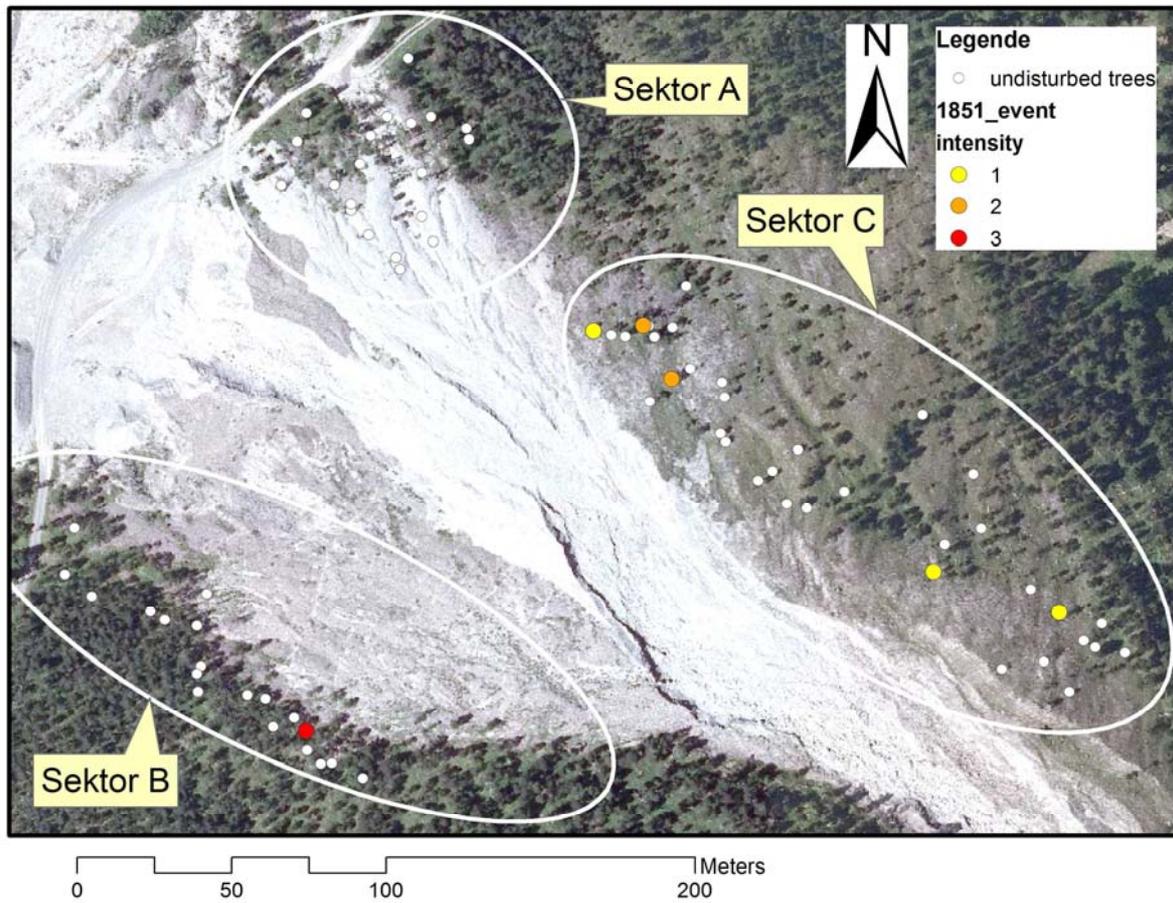
In den folgenden Abbildungen stellen Punkte die Lage von beprobten Bäume dar. Weiße Punkte sind Bäume, die in ihren Jahrringen keine Wachstumsreaktion in Zusammenhang mit dem jeweiligen Ereignis gezeigt haben. Farbige Punkte (gelb, orange, rot) symbolisieren Bäume, die eine Wachstumsreaktion zeigen. Die Farbe der Punkte gibt die Intensität dieser Reaktion wieder (beschrieben in Kapitel 4.5.1)

Ereignis 1839



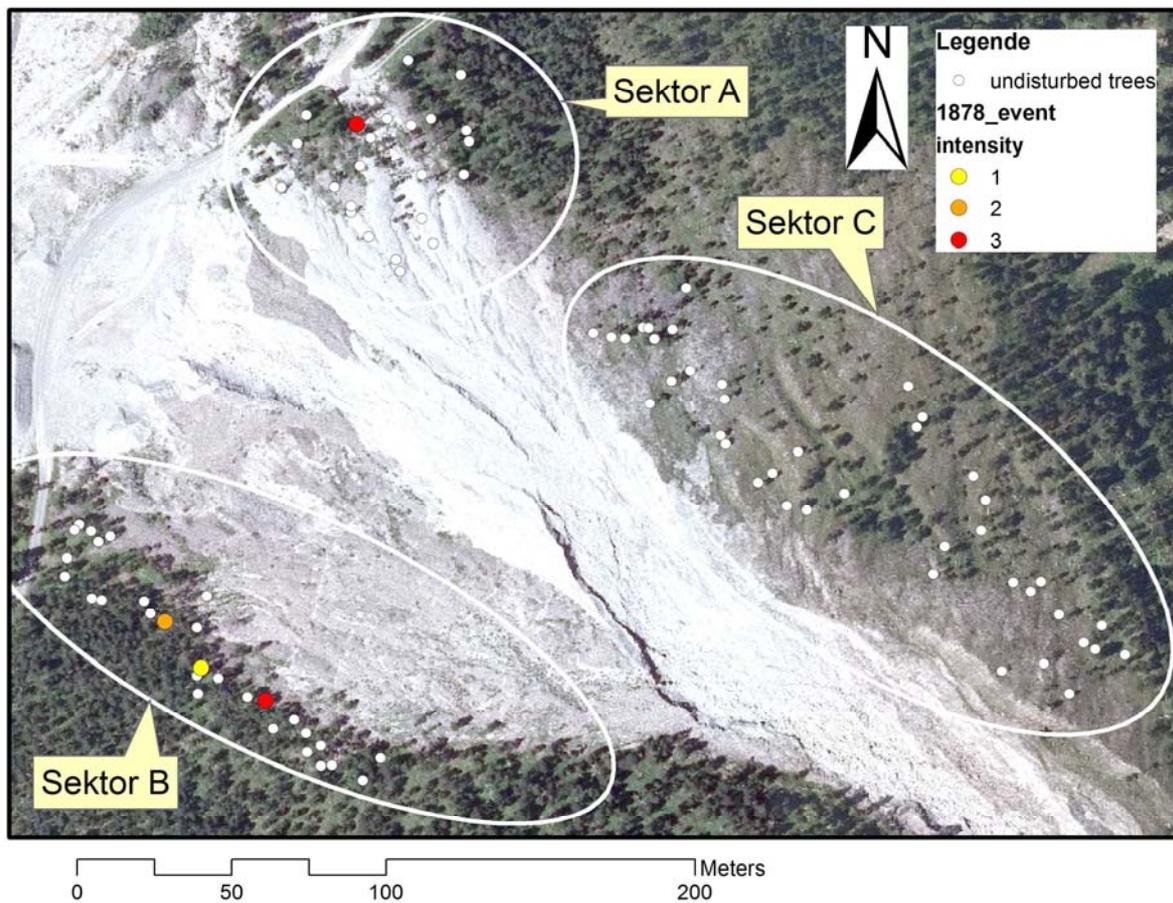
Bäume der Sektoren B und C reagierten im Zeitraum von 1839-41 mit meist nur schwachen Zuwachsschüben. Allerdings wiesen andere Bäume in diesem Zeitraum keine ähnlichen Reaktionen auf, weswegen vermutet wird, dass es sich um ein Ereignis handelt.

Ereignis 1851



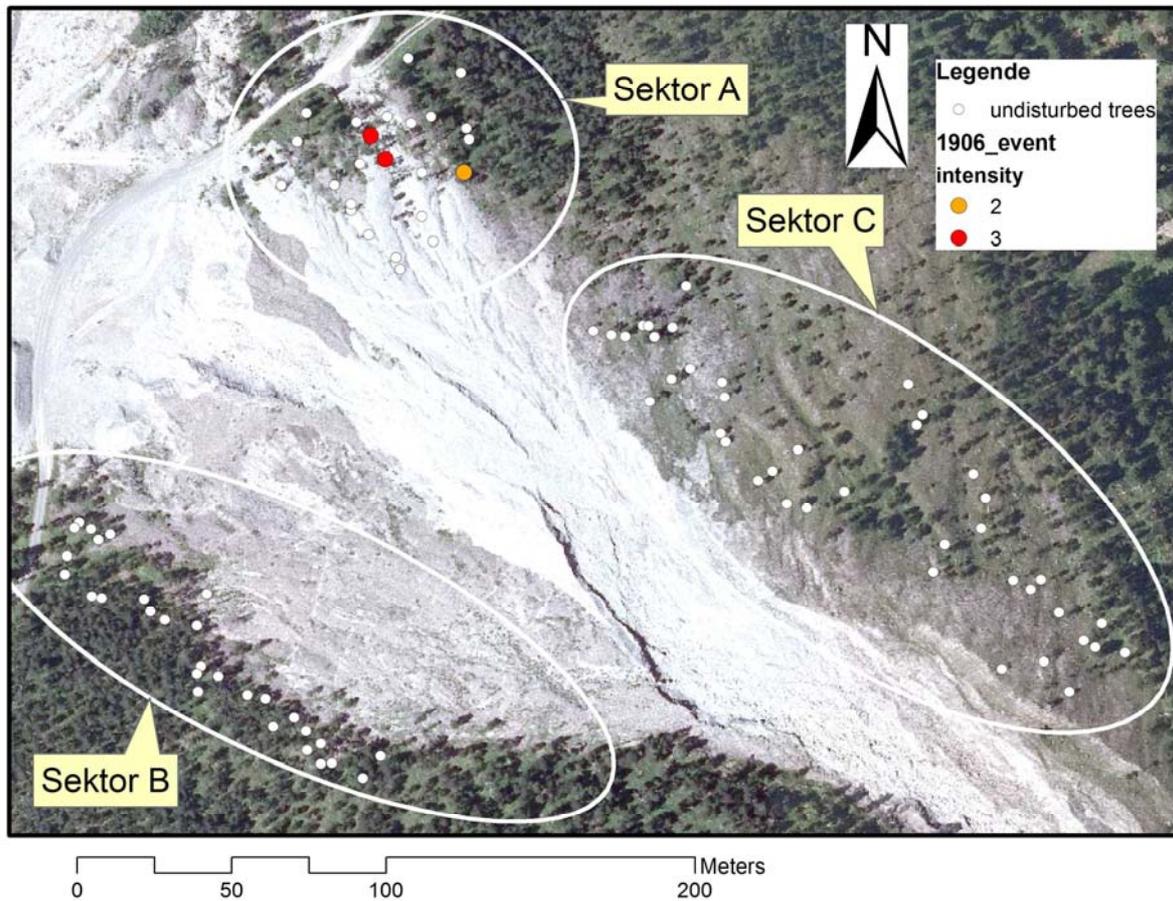
Zwischen 1852-55 zeigten hauptsächlich Bäume in Sektor C aber auch ein Baum in Sektor B schwache bis starke Zuwachsschübe und teilweise auch Druckholzansatz.

## Ereignis 1878



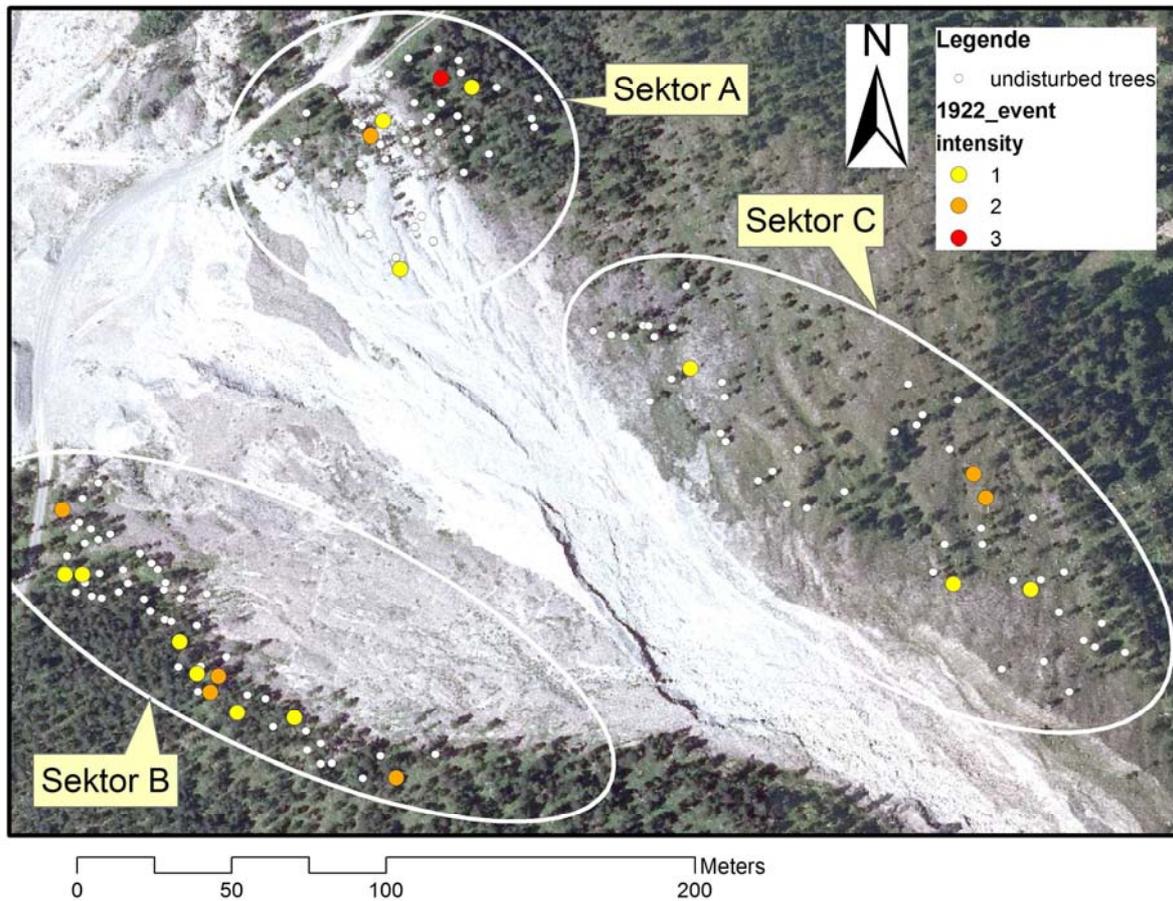
In den Jahren 1880-82 zeigten einzelne Bäume in den Sektoren A und B Wachstumsschübe. In diesem Zeitraum zeigen allerdings auch die Mittelkurven einen graduellen Anstieg, was vermuten lässt, dass die Wachstumsschübe in den Jahren 1880-82 klimatisch bedingt sein können. Allerdings sind die betreffenden Wachstumsschübe der Bäume eher abrupt ausgefallen und nicht annähernd so langsam und verzögert wie der Anstieg in den Mittelkurven. So besteht die Annahme, dass in diesem Zeitraum zumindest ein Ereignisjahr mit Murgangaktivität stattgefunden hat, das die dargestellten Zuwachsschübe bewirkt hat.

## Ereignis 1906



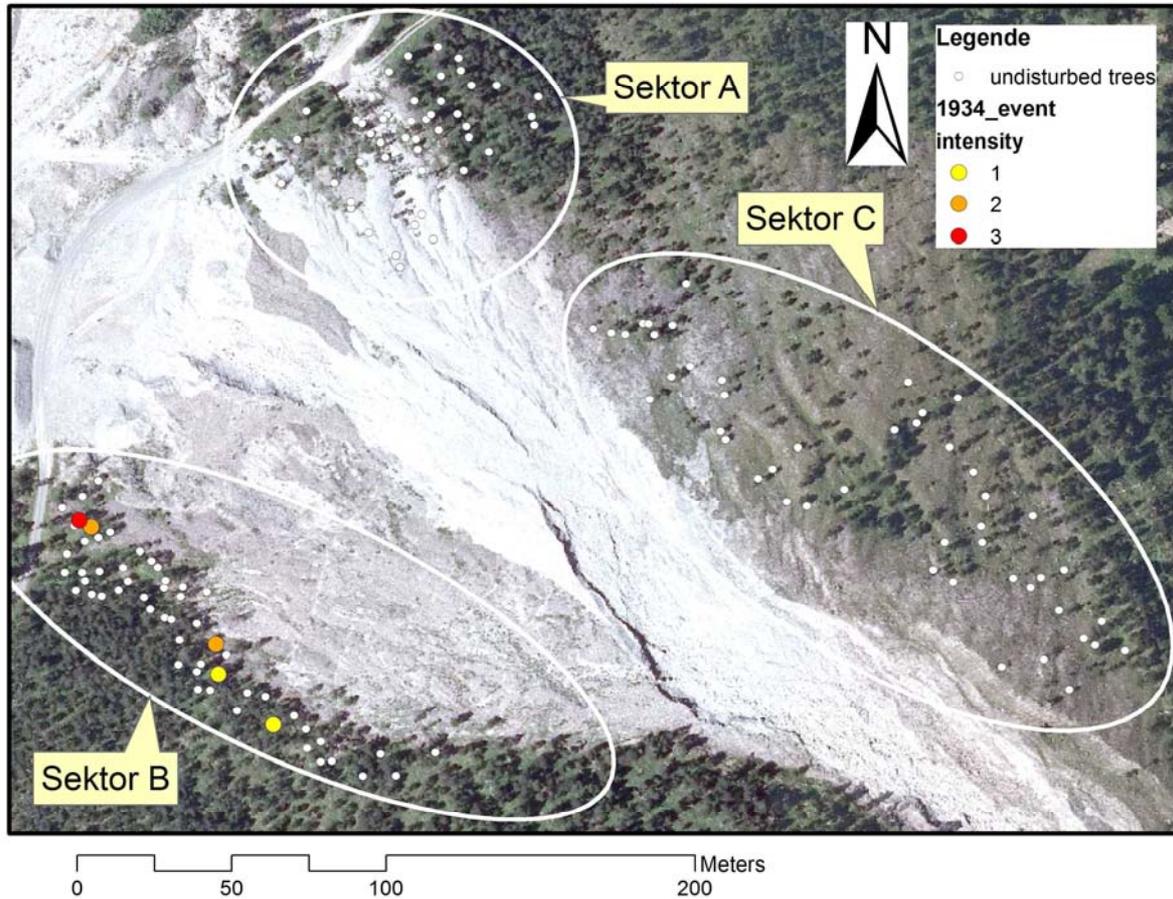
Im Jahr 1907 zeigten 3 Bäume, welche in Sektor A nahe beieinander liegen, meist deutliche Wachstumsänderungen mit Druckholz. Die Anzahl der Reaktionen und auch der errechnete Indexwert sind aber gering. Aufgrund der räumlichen Konzentration und der deutlichen Reaktionen wurde ein Ereignis im Jahr 1906 angenommen.

Ereignis 1922



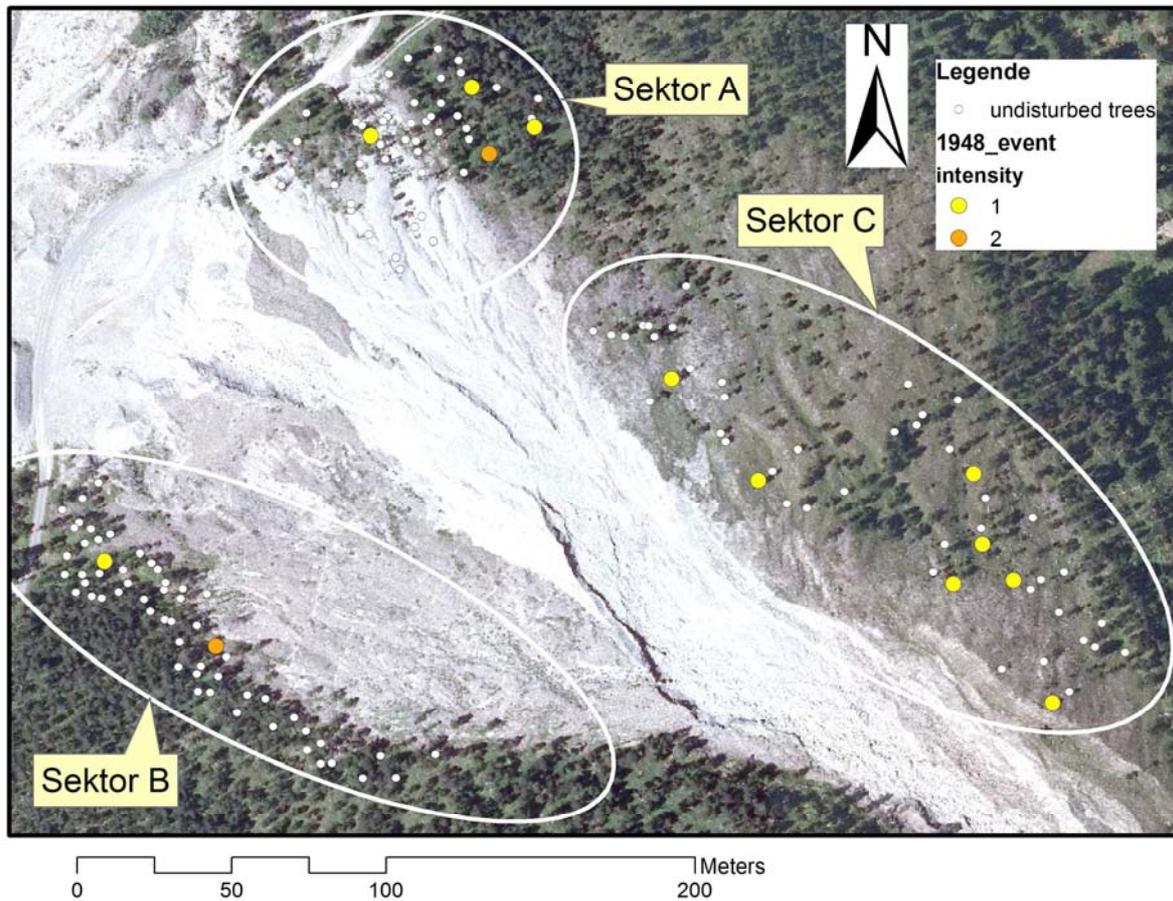
In den Jahren 1922-24 zeigten verstreut in allen Sektoren Bäume meist nur schwache bis mäßige Wachstumsänderungen, teilweise mit Druckholz. Der Druckholzansatz spät im Jahr 1922 lässt vermuten, dass ein Ereignis in diesem Jahr stattgefunden hat.

## Ereignis 1934



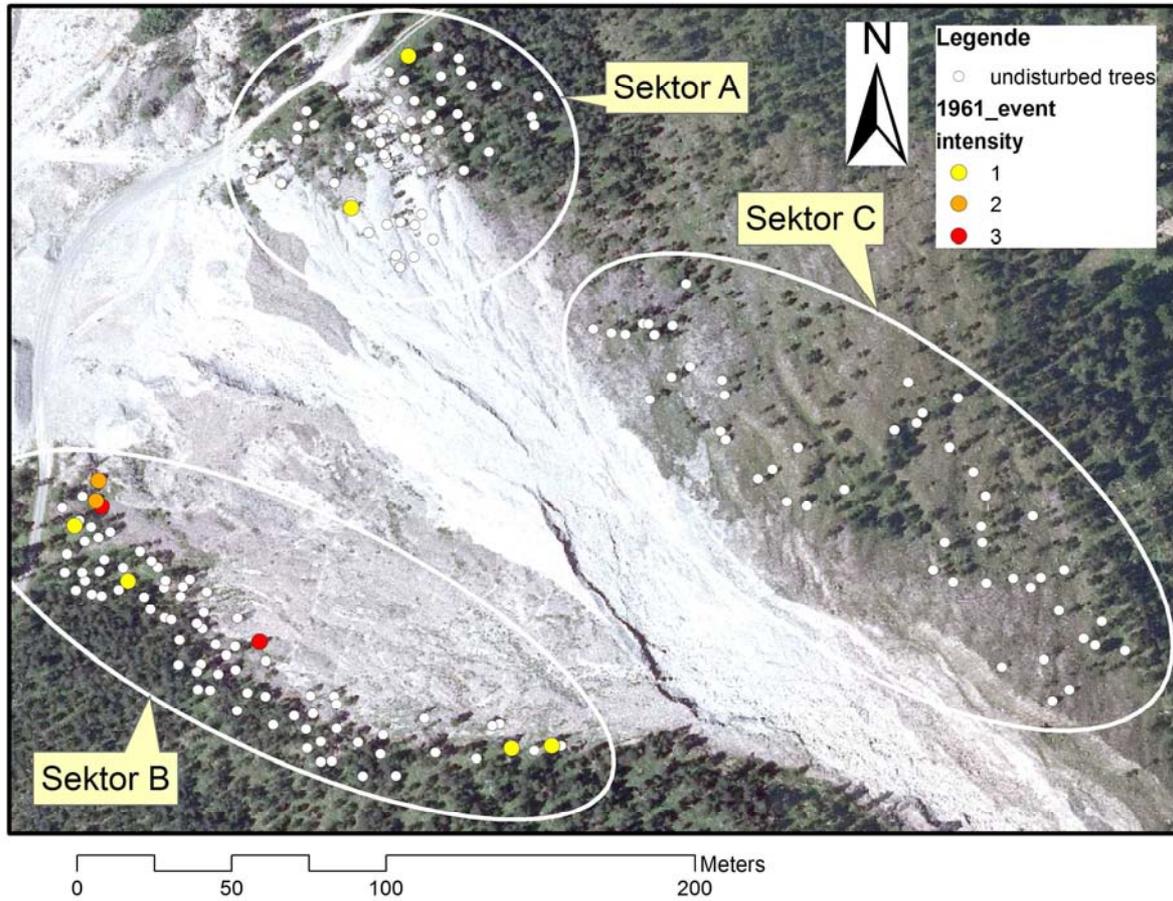
Im Jahr 1934 zeigten ausschließlich in Sektor B mehrere Bäume Zuwachseinbrüche und Druckholzansatz. In den anderen Sektoren sind keine Reaktionen in diesem Zeitraum zu erkennen. Der errechnete Indexwert ist mit 3,1 allerdings recht niedrig. Dennoch lässt die räumliche Nähe und Konzentration der beeinflussten Bäume ein Ereignis vermuten.

Ereignis 1948



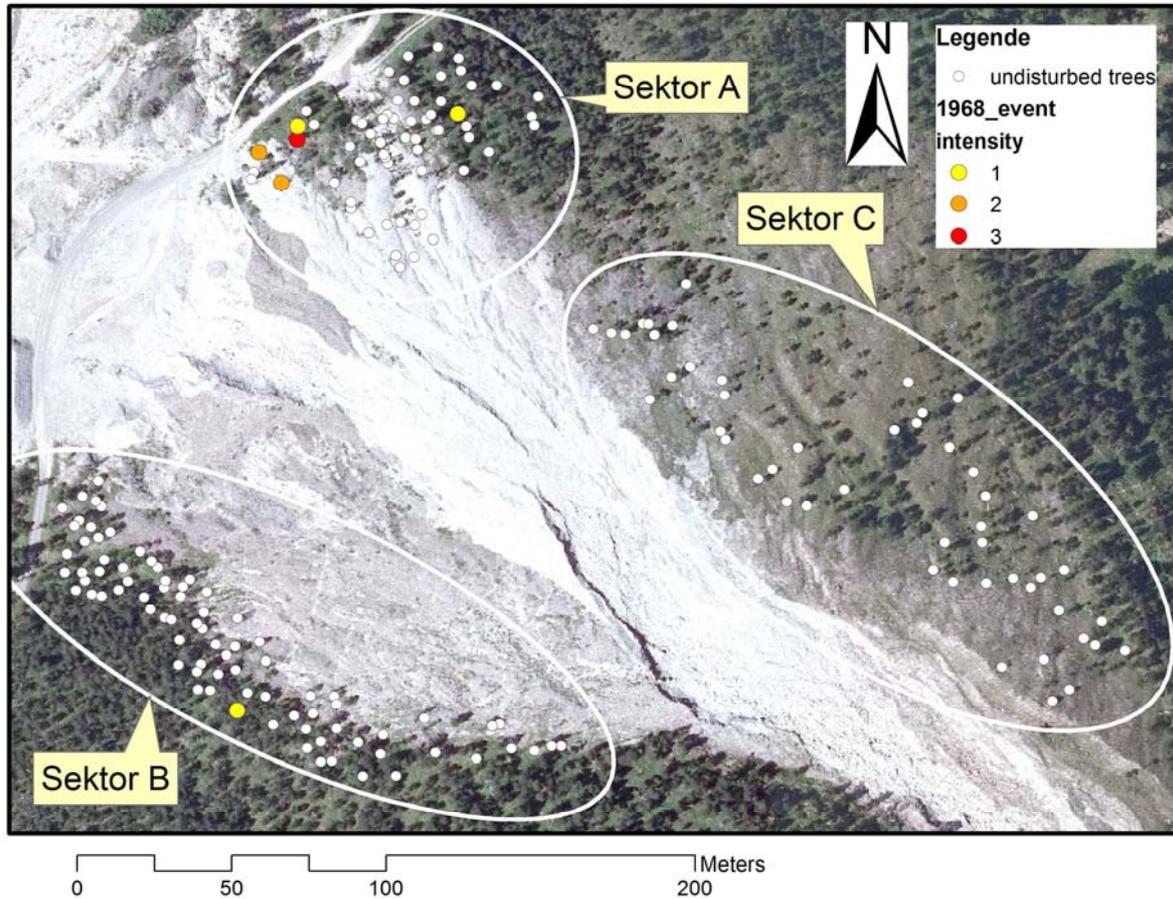
1949 bis 1951 zeigten Bäume aller Sektoren meist schwache Wachstumsänderungen. Da keine verlässlichen deutlichen Reaktionen vorhanden sind, ist die Datierung schwierig. Die große Anzahl an Bäumen, welche reagiert haben, spricht aber für ein Ereignis.

Ereignis 1961



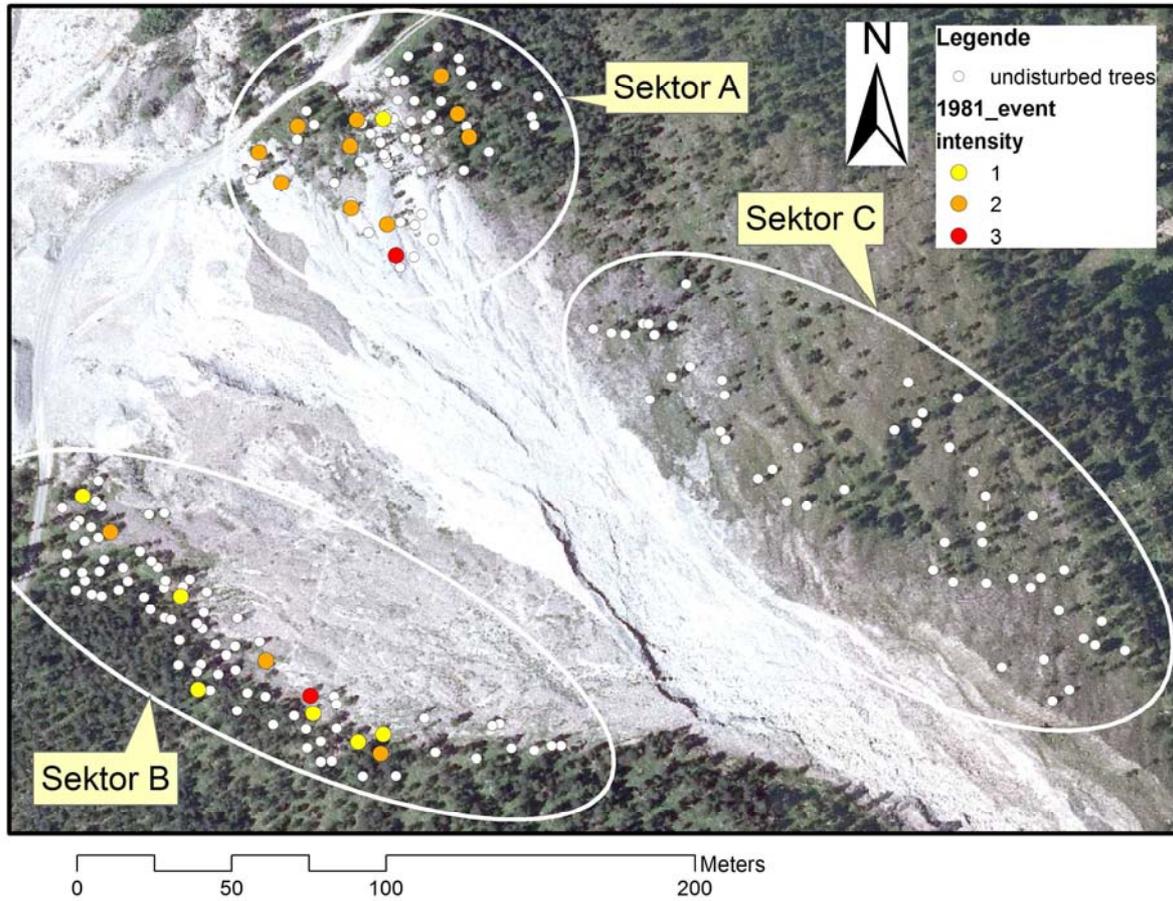
1961 bis 1965 zeigten hauptsächlich Bäume in Sektor B schwache bis starke Wachstumsänderungen und Druckholzansatz. Ein Baum hat deutlich im Jahr 1961 mit Druckholzansatz reagiert.

## Ereignis 1968



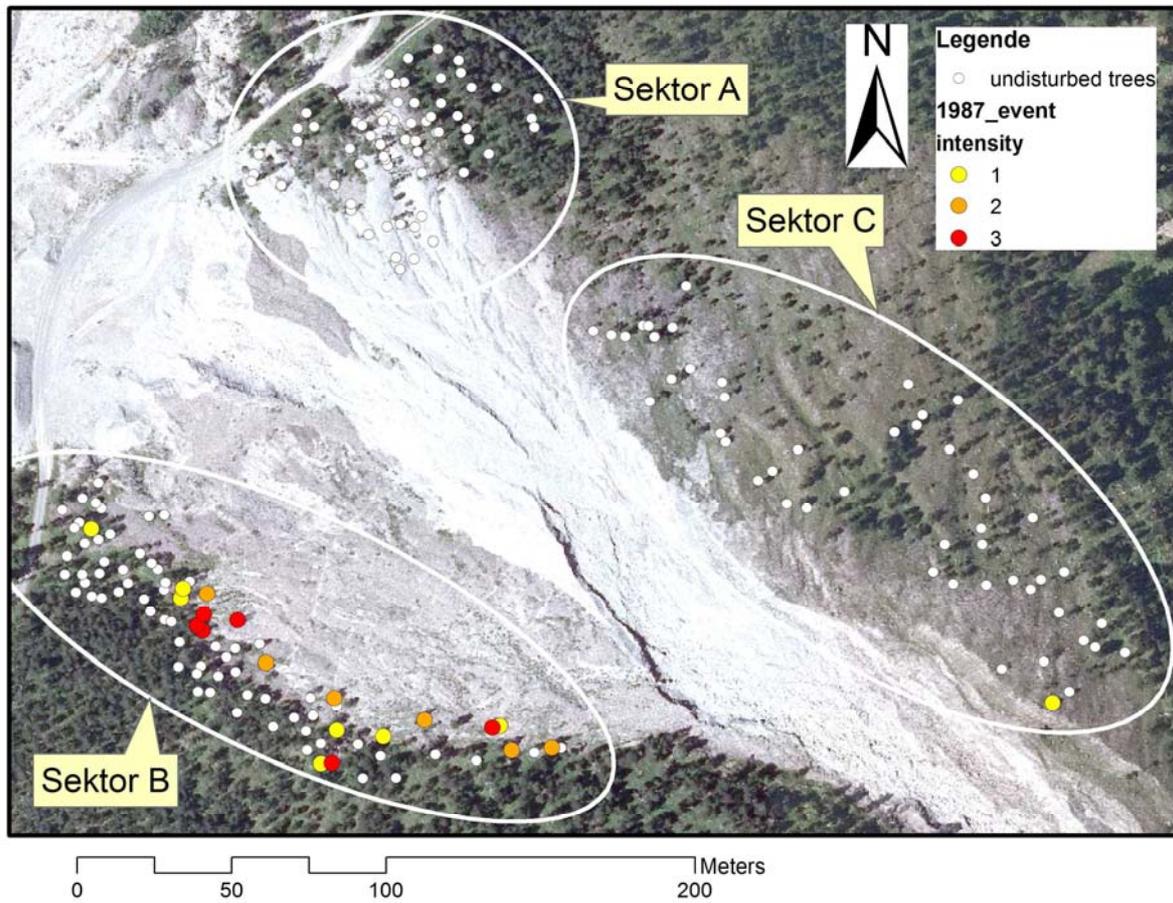
1968 und 1969 zeigten hauptsächlich Bäume im Sektor A Wachstumsreaktionen. Ein Baum mit einer Reaktion schwacher Intensität findet sich auch in Sektor B. Der Indexwert ist mit 2,9 nur gering. Die räumliche Konzentration stärkerer Reaktionen im Sektor A hat aber zu der Annahme eines Ereignisjahres geführt.

Ereignis 1981



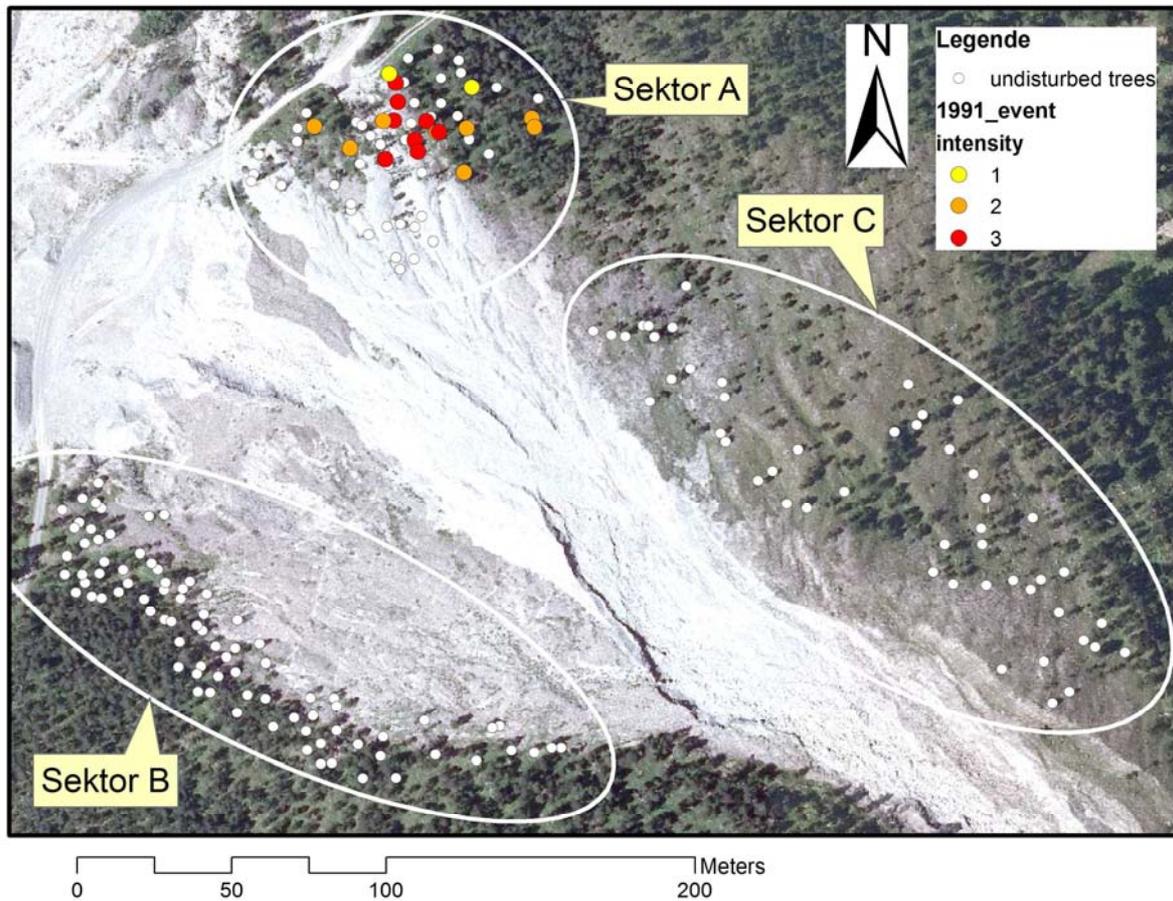
1981 bis 1984 zeigten zahlreiche Bäume der Sektoren A und B Wachstumsreaktionen, großteils Wachstumsschübe. Ein Baum wies eine Verletzung wahrscheinlich im Jahr 1981 auf, ein anderer Baum starb 1982.

Ereignis 1987



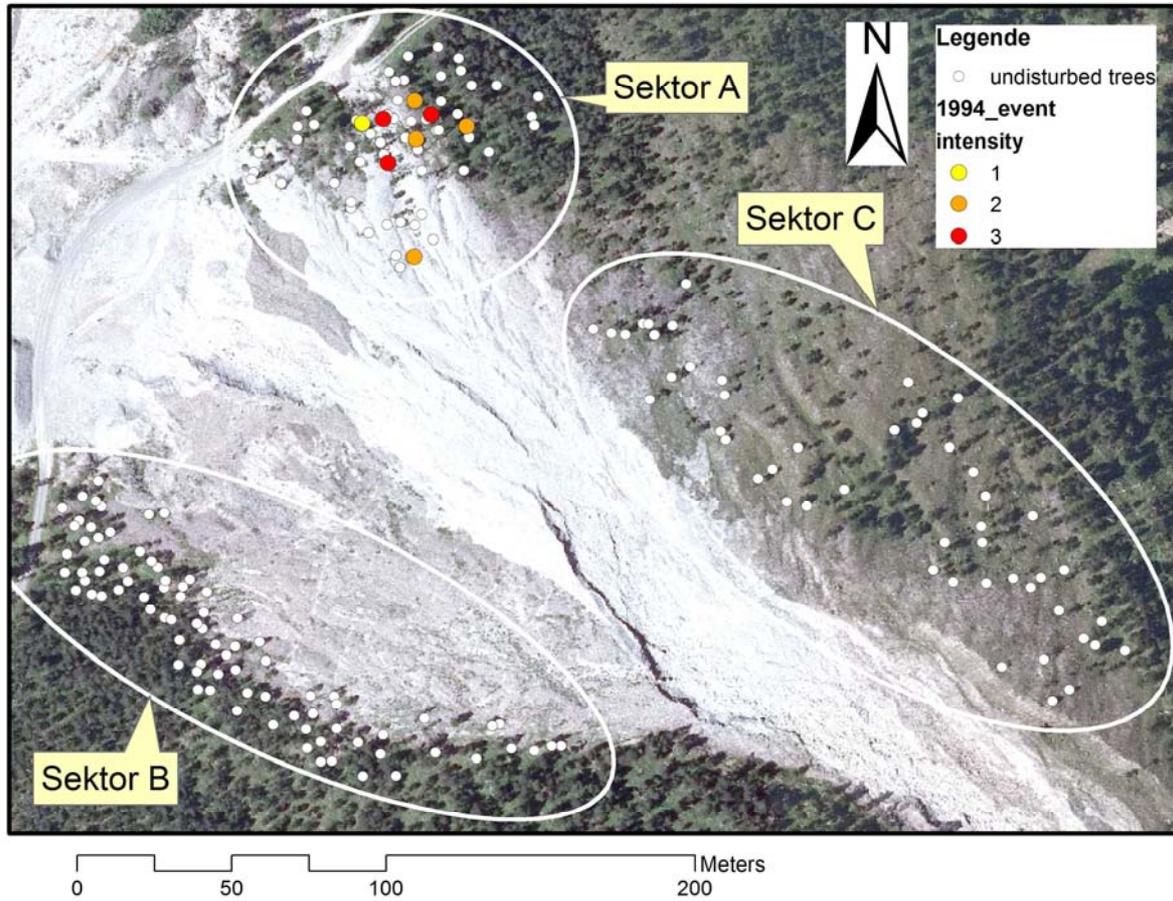
1987-1989 zeigten zahlreiche Bäume vor allem im Sektor B meist deutliche Wachstumsreaktionen und Druckholzansatz. Ein Baum hatte 1987 Kallusgewebe.

Ereignis 1991



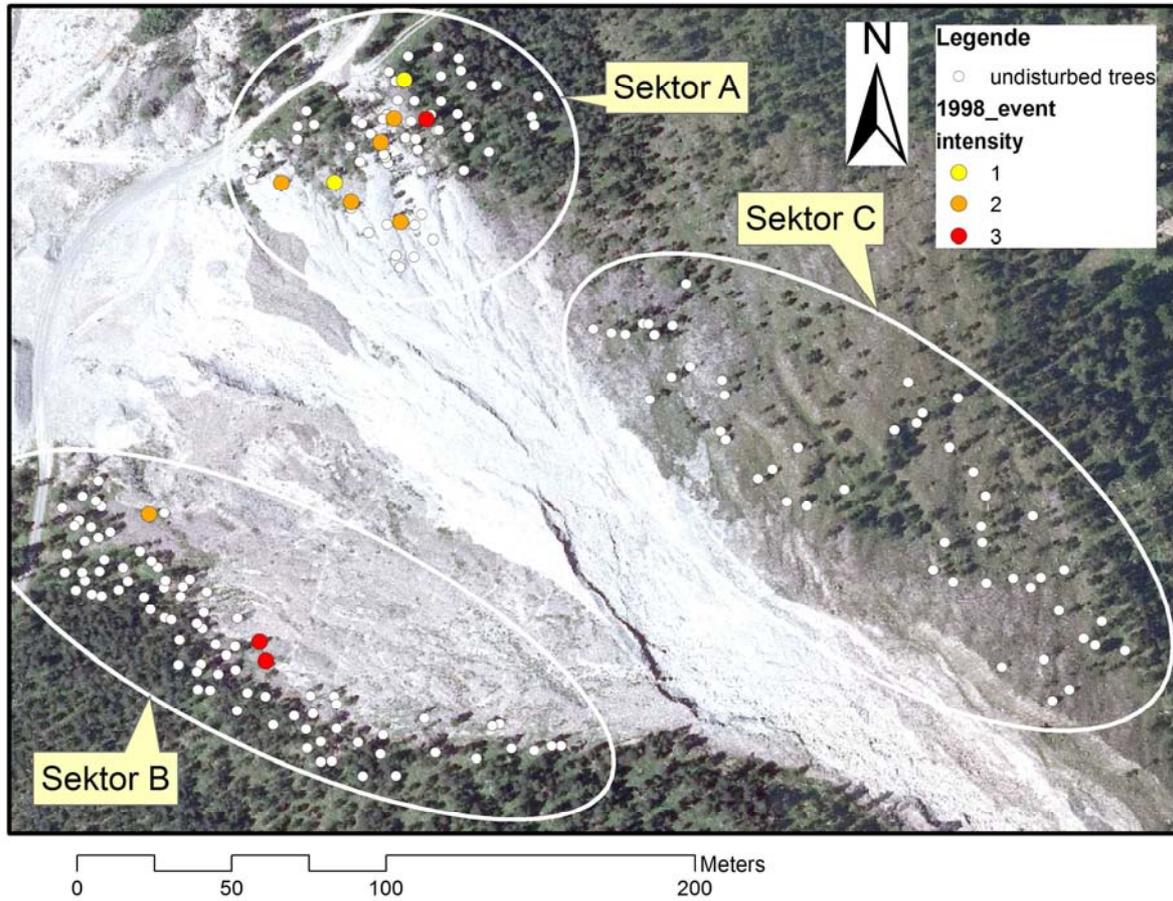
1991 bis 1993 zeigten zahlreiche Bäume in Sektor A Wachstumsreaktionen, traumatische Harzkanäle sowie zahlreiche Verletzungen. Aufgrund der Harzkanäle und der Verletzungen ist eine recht verlässliche Datierung auf das Jahr 1991 möglich.

Ereignis 1994



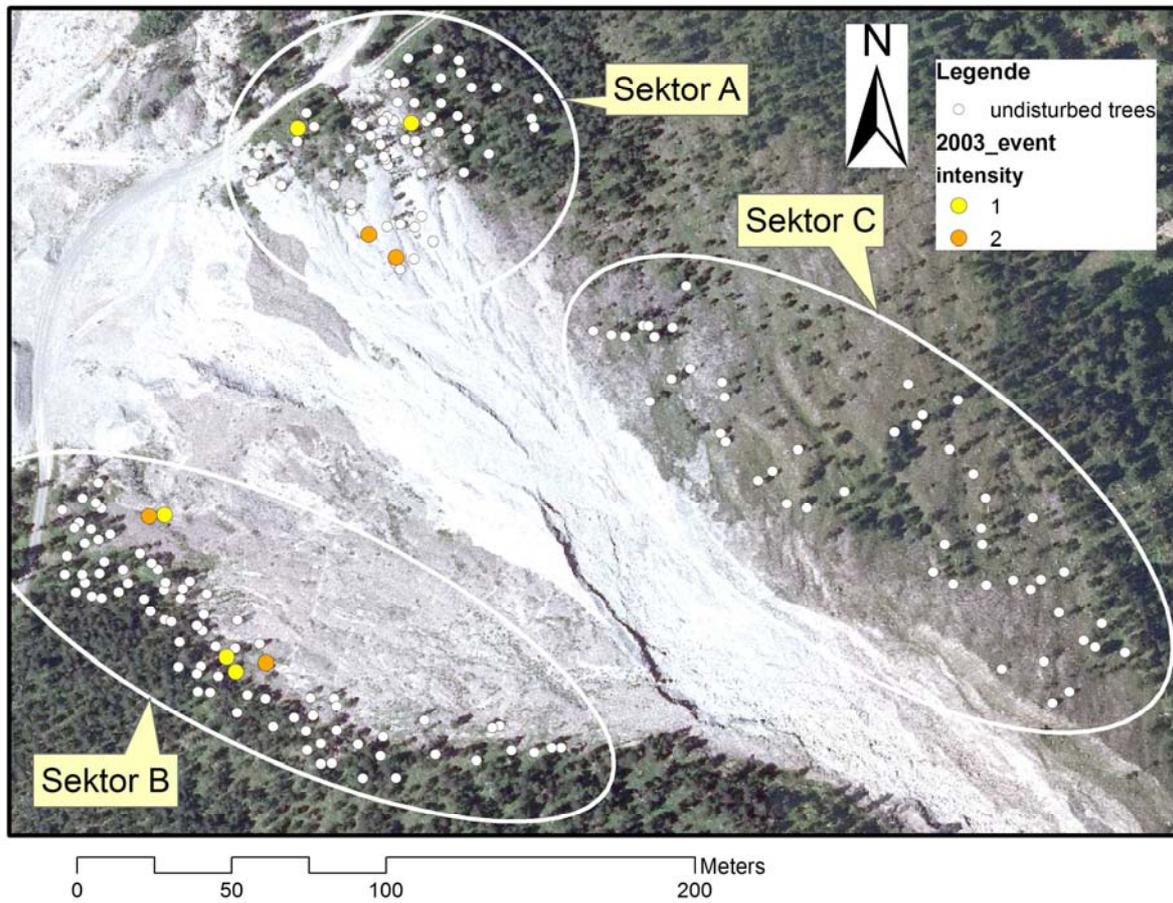
Zwischen 1994 und 1995 zeigten einige Bäume in Sektor A Wachstumsschübe unterschiedlicher Intensität. Ein Baum bildete traumatische Harzkanäle im Jahr 1994, was ein Ereignis in diesem Jahr wahrscheinlich macht.

Ereignis 1998



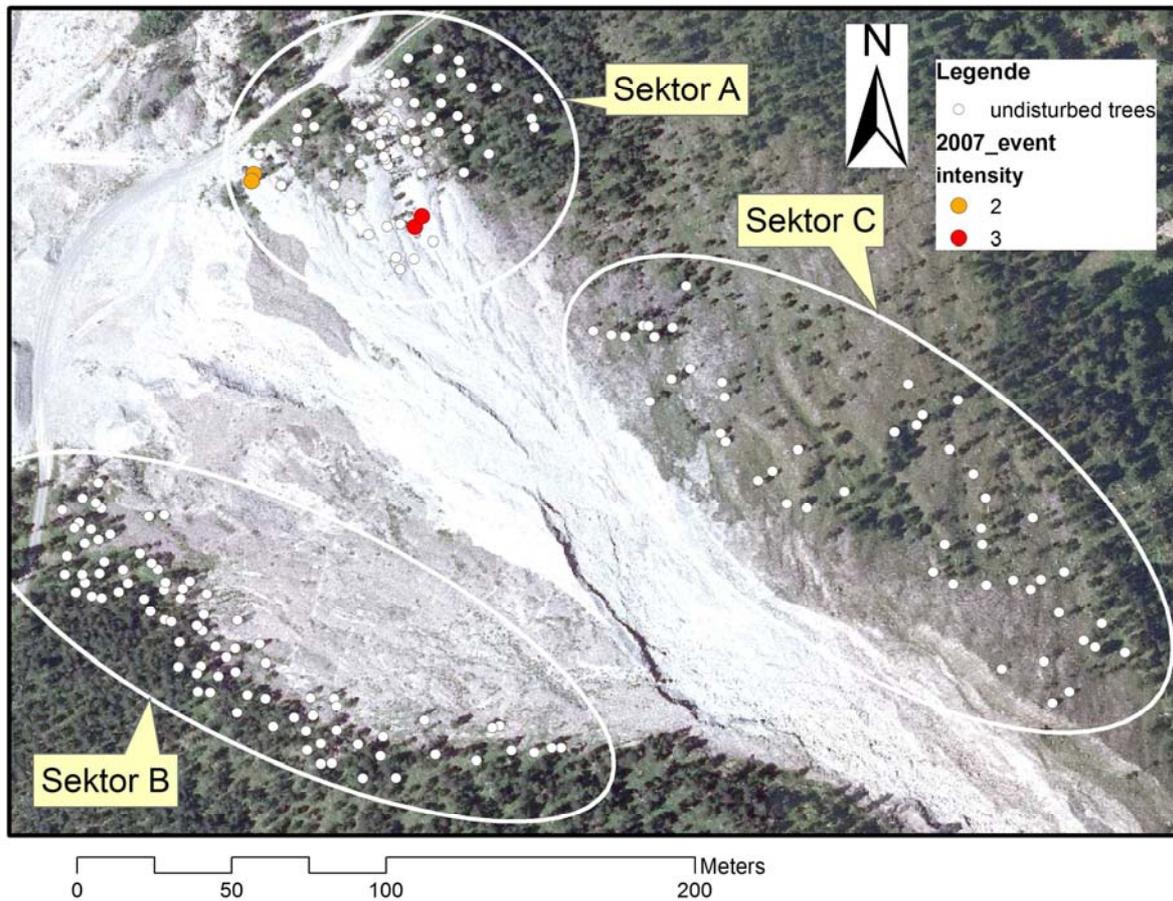
1998-1999 zeigten mehrere Bäume der Sektoren A und B Wachstumsreaktionen. Ein Baum starb im Jahr 1999.

Ereignis 2003



2003 und 2004 reagierten mehrere Bäume mit Wachstumsschüben und –einbrüchen. Zwei Bäume starben in diesem Zeitraum ab.

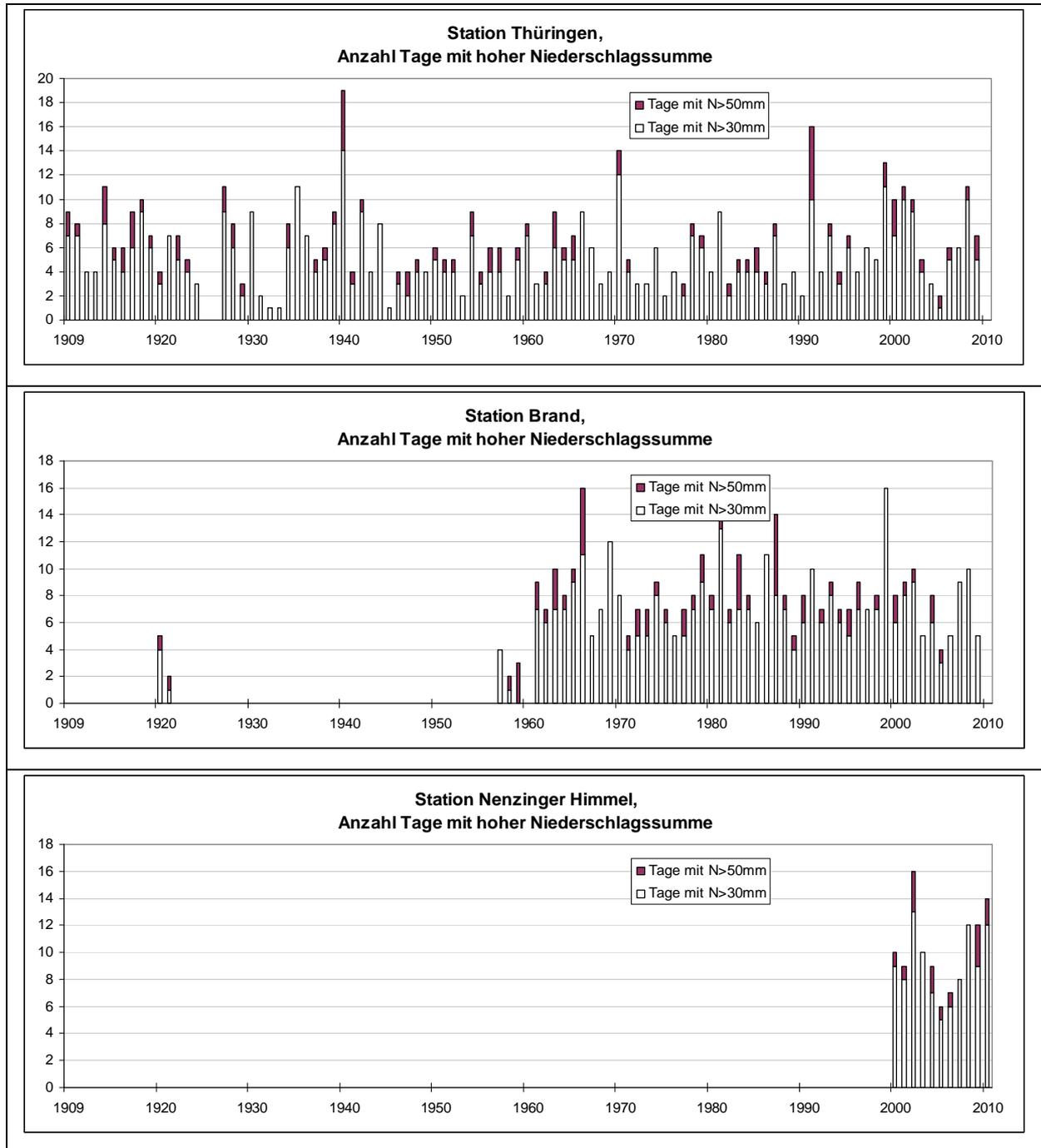
## Ereignis 2007



In Sektor A zeigten jeweils zwei Bäume Verletzungen und deutlichen Druckholzansatz im Jahr 2007. Eventuell hat das auslösende Ereignis auch im Vorjahr 2006 oder in der Wachstumsruhe zwischen 2006 und 2007 stattgefunden. Zwar haben nur relativ wenige Bäume in diesem Zeitraum reagiert, der Indexwert beträgt nur 1,9. Aufgrund der deutlichen Reaktionen und der räumliche Konzentration besteht die berechnete Annahme, dass ein Ereignis diese Reaktionen bewirkt hat.

### D) Auswertung Niederschlagsdaten

Anzahl Tage, an denen Grenzwerte des Tagesniederschlags überschritten wurden, als Graph und als Tabelle (Ereignisjahre markiert)



# Anhang

Thüringen	1900	1907	1908	1909	1910	1911	1912	1913	1914	1915	1917	1918	1919	1920	1921	1922	1923
N>30mm	2	0	5	7	7	4	4	8	5	4	6	9	6	3	7	5	4
N>50mm	0	0	2	2	1	0	0	3	1	2	3	1	1	1	0	2	1
Brand																	
N>30mm														4	1	0	0
N>50mm														1	1	0	0
Thüringen	1924	1927	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942
N>30mm	3	9	6	2	9	2	1	1	6	11	7	4	5	8	14	3	9
N>50mm	0	2	2	1	0	0	0	0	2	0	0	1	1	1	5	1	1
Brand																	
N>30mm																	
N>50mm																	
Thüringen	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959
N>30mm	4	8	1	3	2	4	4	5	4	4	2	7	3	4	4	2	5
N>50mm	0	0	0	1	2	1	0	1	1	1	0	2	1	2	2	0	1
Brand																	
N>30mm															4	1	0
N>50mm															0	1	3
Thüringen	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
N>30mm	7	3	3	6	5	5	9	6	3	4	12	4	3	3	6	2	4
N>50mm	1	0	1	3	1	2	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0
Brand																	
N>30mm	0	7	6	7	7	9	11	5	7	12	8	4	5	5	8	6	5
N>50mm	0	2	1	3	1	1	5	0	0	0	0	1	2	2	1	1	0
Thüringen	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
N>30mm	2	7	6	4	9	2	4	4	4	3	7	3	4	2	10	4	7
N>50mm	1	1	1	0	0	1	1	1	2	1	1	0	0	0	6	0	1
Brand																	
N>30mm	5	7	9	7	13	6	7	7	6	11	8	7	4	6	10	6	8
N>50mm	2	1	2	1	2	1	4	1	0	0	6	1	1	2	0	1	1
Thüringen	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
N>30mm	3	6	4	6	5	11	7	10	9	4	3	1	5	6	10	5	
N>50mm	1	1	0	0	0	2	3	1	1	1	0	1	1	0	1	2	
Brand																	
N>30mm	6	5	7	7	7	16	6	8	9	5	6	3	5	9	10	5	
N>50mm	1	2	2	0	1	0	2	1	1	0	2	1	0	0	0	0	
Nenzinger H.																	
N>30mm							9	8	13	10	7	5	6	8	12	9	12
N>50mm							1	1	3	0	2	1	1	0	0	3	2

## Anhang

Temperaturbereinigung von Niederschlagsereignissen, für Tage in Ereignisjahren, die große Niederschlagssummen aufwiesen, mit Temperaturdaten Abschätzen der Niederschlagsform

			Temp_T	Nieders_O	Temp_O	Regen/Schnee
03.09.1968				6	10,8	
04.09.1968				200	1,05	S?
05.09.1968				15	2,75	
13.09.1968				-1	6,85	
14.09.1968				10	7,25	R
15.09.1968				120	9,95	
30.09.1968				45	0,65	
01.10.1968				165	0,8	S?
02.10.1968				42	3,4	
21.09.1981				40	13,4	
22.09.1981				85	11,325	R
23.09.1981				96	6,325	
24.09.1981				59	6,65	
25.09.1981				-1	7,75	
26.09.1981				208	8,8	
27.09.1981				81	7	
28.09.1981				295	-0,15	S?
29.09.1981				86	-1	
25.09.1987	07:00:00	9,6				
25.09.1987	14:00:00	15,8				
25.09.1987	21:00:00	12,2	12,45	2	6,1	
26.09.1987	07:00:00	11,8				
26.09.1987	14:00:00	13,8				
26.09.1987	21:00:00	12,8	12,8	422	7,65	R
27.09.1987	07:00:00	7,4				
27.09.1987	14:00:00	9,2				
27.09.1987	21:00:00	9	8,65	18	1,35	
21.03.1991	07:00:00	8,1				
21.03.1991	14:00:00	19,8				
21.03.1991	21:00:00	16,8	15,375	-1	4,8	
22.03.1991	07:00:00	9,1				
22.03.1991	14:00:00	5,7				
22.03.1991	21:00:00	3	5,2	138	-1,425	S
23.03.1991	07:00:00	4				
23.03.1991	14:00:00	11				
23.03.1991	21:00:00	8,1	7,8	-1	-1,225	
21.09.1991	07:00:00	14,1				
21.09.1991	14:00:00	24,6				
21.09.1991	21:00:00	20,2	19,775	-1	12,425	

## Anhang

22.09.1991	07:00:00	16,2				
22.09.1991	14:00:00	26,2				
22.09.1991	21:00:00	17	19,1	160	12,725	R
23.09.1991	07:00:00	15,1				
23.09.1991	14:00:00	13,8				
23.09.1991	21:00:00	11,8	13,125	26	3,8	
24.09.1991	07:00:00	9,2				
24.09.1991	14:00:00	21,2				
24.09.1991	21:00:00	16,2	15,7	-1	12,15	
25.09.1991	07:00:00	13,1				
25.09.1991	14:00:00	25,2				
25.09.1991	21:00:00	19,1	19,125	-1	12,3	
26.09.1991	07:00:00	19,8				
26.09.1991	14:00:00	19,3				
26.09.1991	21:00:00	14,1	16,825	205	9,375	R
27.09.1991	07:00:00	9,2				
27.09.1991	14:00:00	10,1				
27.09.1991	21:00:00	9	9,325	278	1,575	
20.12.1991	07:00:00	3,4				
20.12.1991	14:00:00	0,5				
20.12.1991	21:00:00	-0,8	0,575	25	-8,4	
21.12.1991	07:00:00	-1,3				
21.12.1991	14:00:00	-0,8				
21.12.1991	21:00:00	1,8	0,375	184	-6,375	S
22.12.1991	07:00:00	1,9				
22.12.1991	14:00:00	4,1				
22.12.1991	21:00:00	5	4	287	-0,425	S
23.12.1991	07:00:00	6				
23.12.1991	14:00:00	9,1				
23.12.1991	21:00:00	6,3	6,925	13	0,125	
07.09.1994	07:00:00	17,6				
07.09.1994	14:00:00	25,8				
07.09.1994	21:00:00	18,2	19,95	-1	15,85	
08.09.1994	07:00:00	15				
08.09.1994	14:00:00	17,1				
08.09.1994	21:00:00	11	13,525	260	9,95	R
09.09.1994	07:00:00	9,6				
09.09.1994	14:00:00	18,8				
09.09.1994	21:00:00	13,9	14,05	0	6,325	
18.11.1994	07:00:00	4,7				
18.11.1994	14:00:00	3,9				
18.11.1994	21:00:00	5	4,65	130	-3,45	
19.11.1994	07:00:00	4,4				
19.11.1994	14:00:00	7,1				
19.11.1994	21:00:00	8,2	6,975	345	1,475	S?
20.11.1994	07:00:00	9,4				

## Anhang

20.11.1994	14:00:00	16,1				
20.11.1994	21:00:00	12,2	12,475	-1	5,65	
10.09.1998	07:00:00	18,9				
10.09.1998	14:00:00	25,1				
10.09.1998	21:00:00	18,2	20,1			
11.09.1998	07:00:00	14,7				
11.09.1998	14:00:00	14				
11.09.1998	21:00:00	13	13,675			R
12.09.1998	07:00:00	9,2				
12.09.1998	14:00:00	11				
12.09.1998	21:00:00	8,1	9,1			
02.10.2003	07:00:00	12,4				
02.10.2003	14:00:00	23				
02.10.2003	21:00:00	16,6	17,15			
03.10.2003	07:00:00	13				
03.10.2003	14:00:00	15,5				
03.10.2003	21:00:00	13,6	13,925			R
04.10.2003	07:00:00	11,4				
04.10.2003	14:00:00	12,8				
04.10.2003	21:00:00	10,8	11,45			R
05.10.2003	07:00:00	6,2				
05.10.2003	14:00:00	3,8				
05.10.2003	21:00:00	1	3			S
06.10.2003	07:00:00	2,4				
06.10.2003	14:00:00	12,9				
06.10.2003	21:00:00	6,2	6,925			S?
07.10.2003	07:00:00	6,8				
07.10.2003	14:00:00	8,3				
07.10.2003	21:00:00	1,1	4,325			S?
08.10.2003	07:00:00	0,9				
08.10.2003	14:00:00	3,2				
08.10.2003	21:00:00	4,6	3,325			S
09.10.2003	07:00:00	5,8				
09.10.2003	14:00:00	8				
09.10.2003	21:00:00	8,1	7,5			S?
10.10.2003	07:00:00	8,8				
10.10.2003	14:00:00	15,6				
10.10.2003	21:00:00	11,5	11,85			
15.09.2006	07:00:00	16,5				
15.09.2006	14:00:00	23,2				
15.09.2006	21:00:00	18,9	19,375			
16.09.2006	07:00:00	13,2				
16.09.2006	14:00:00	24,1				
16.09.2006	21:00:00	15,7	17,175			R
17.09.2006	07:00:00	15,1				
17.09.2006	14:00:00	19,2				

## Anhang

17.09.2006	21:00:00	15,8	16,475			
02.09.2007	07:00:00	12,5				
02.09.2007	14:00:00	21,1				
02.09.2007	21:00:00	15,8	16,3			
03.09.2007	07:00:00	13				
03.09.2007	14:00:00	20,2				
03.09.2007	21:00:00	12,6	14,6			R
04.09.2007	07:00:00	8,1				
04.09.2007	14:00:00	8,1				
04.09.2007	21:00:00	6,1	7,1			S?
05.09.2007	07:00:00	5				
05.09.2007	14:00:00	7,1				
05.09.2007	21:00:00	6,1	6,075			
09.11.2007	07:00:00	4,9				
09.11.2007	14:00:00	1,9				
09.11.2007	21:00:00	2,7	3,05			
10.11.2007	07:00:00	0,5				
10.11.2007	14:00:00	0,5				
10.11.2007	21:00:00	2,8	1,65			S
11.11.2007	07:00:00	2,5				
11.11.2007	14:00:00	6,1				
11.11.2007	21:00:00	8,1	6,2			

Die 5 größten Niederschlagssummen der Stationen Brand (N\_B) und Thüringen (N\_T) in Ereignisjahren, Tagesmitteltemperaturen der Stationen Thüringen (T\_T) und Obervermunt (T\_O), grau – Tage mit wahrscheinlich Niederschlag in fester Form im Untersuchungsgebiet

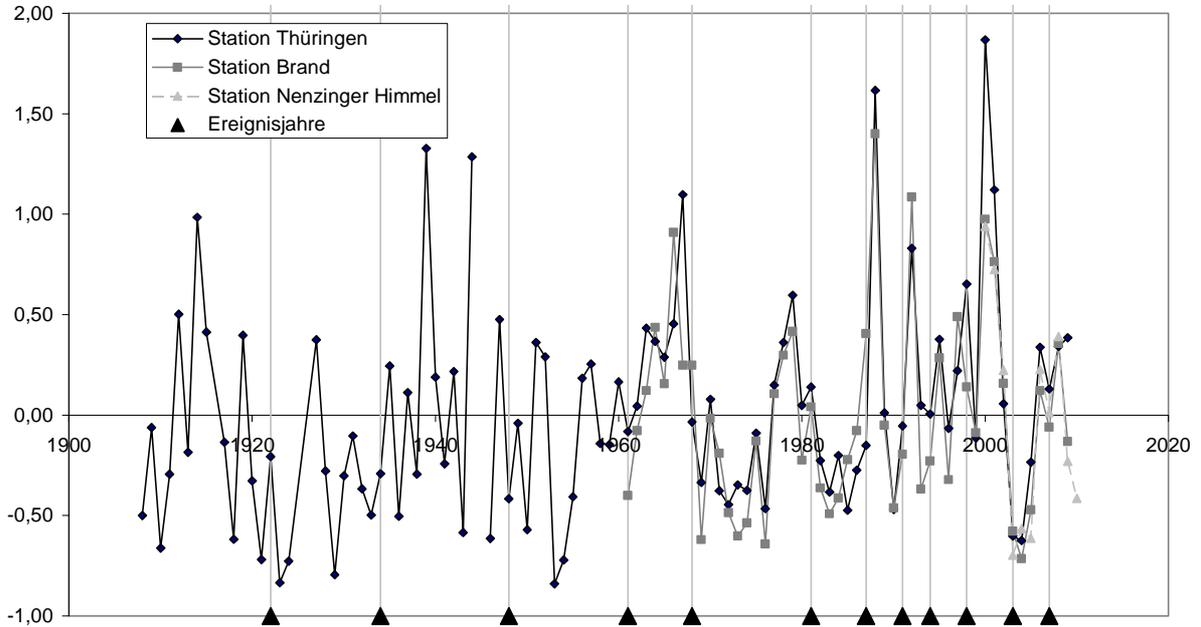
Thüringen	N_T	T_T	T_O		Brand	N_B	T_T	T_O	
	[mm]	[°C]	[°C]			[mm]	[°C]	[°C]	
08.01.1922	36,3								
09.01.1922	45,6								
16.06.1922	35								
15.07.1922	102,5								
24.07.1922	53								
15.07.1934	60,2								
03.08.1934	43								
04.08.1934	56								
31.08.1934	36,5								
09.09.1934	43,5								
19.06.1948	93,1								
06.07.1948	47,5								
24.07.1948	30								
30.07.1948	40,1								
12.08.1948	37								

# Anhang

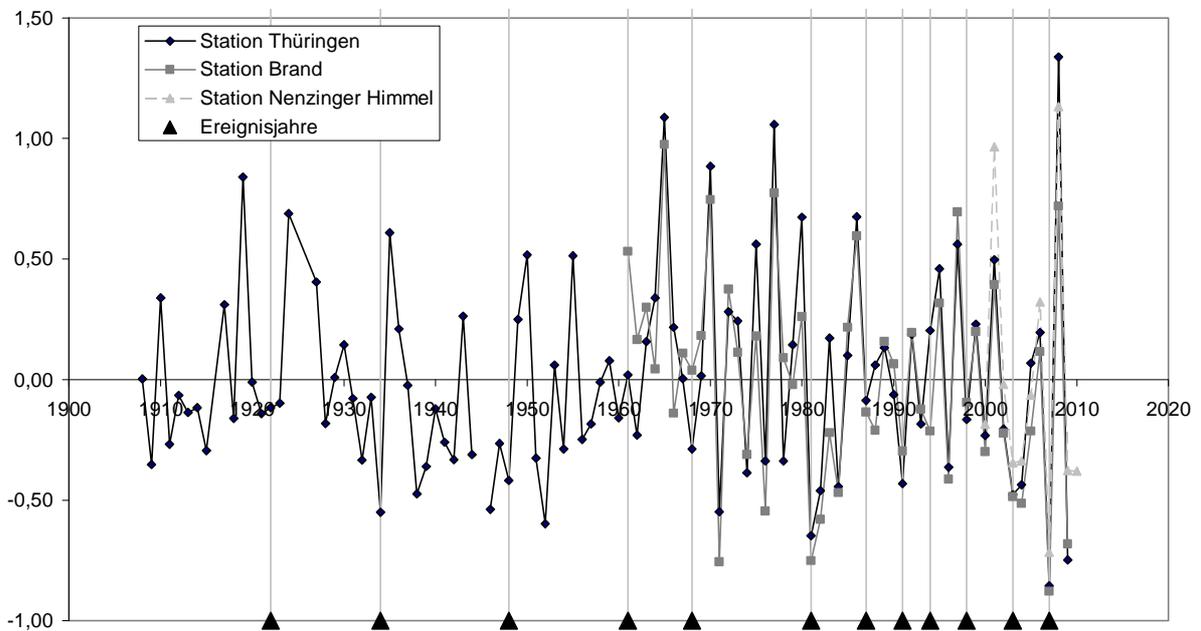
<b>Thüringen</b>	<b>N_T</b>	<b>T_T</b>	<b>T_O</b>		<b>Brand</b>	<b>N_B</b>	<b>T_T</b>	<b>T_O</b>	
	[mm]	[°C]	[°C]			[mm]	[°C]	[°C]	
03.05.1987	39,4	4	-0,8		08.06.1987	58,5	10,1	2,2	
15.06.1987	51	8,9	4,4		15.06.1987	54,7	8,9	4,4	
17.07.1987	39	21,6	12,4		17.07.1987	49,8	21,6	12,4	
18.07.1987	41,5	11,2	5,5		18.07.1987	50,3	11,2	5,5	
26.09.1987	48	12,8	7,7		26.09.1987	57,6	12,8	7,7	
22.03.1991	32,1	5,2	-1,4		22.03.1991	34	5,2	-1,4	
11.05.1991	75,4	7,4	-1,2		11.05.1991	55,4	7,4	-1,2	
16.06.1991	58,5	12,2	8,2		16.06.1991	68,9	12,2	8,2	
17.06.1991	56,8	5,9	-2,3		17.06.1991	59,7	5,9	-2,3	
24.07.1991	40,9	18,5	11,9		12.07.1991	32,8	26,3	18,2	
26.07.1991	32,5	12,1	1,3		24.07.1991	41,8	18,5	11,9	
22.09.1991	42,9	19,1	12,7		26.07.1991	32,1	12,1	1,3	
26.09.1991	58,6	16,8	9,4		26.09.1991	56	16,8	9,4	
21.12.1991	74,6	0,4	-6,4		21.12.1991	80,9	0,4	-6,4	
22.12.1991	81,4	4	-0,4		22.12.1991	80,5	4	-0,4	
12.04.1994	25,4	2,2	-5,6		04.07.1994	55,4	21,5	19,8	
06.07.1994	79,4	18,2	12,5		06.07.1994	57,5	18,2	12,5	
10.08.1994	35,6	20,7	16,5		10.08.1994	48,3	20,7	16,5	
08.09.1994	31,2	13,5	10		08.09.1994	48,3	13,5	10	
19.11.1994	25,2	7	1,5		14.09.1994	37,9	11,5	6,8	
15.03.1998	44,6	1,7			11.06.1998	37,2	10,6		
11.06.1998	38,5	10,6			27.07.1998	37,6	16,7		
12.06.1998	43,1	5,6			22.08.1998	42,5	15,3		
27.07.1998	37,7	16,7			11.09.1998	50,9	13,7		
11.09.1998	40,5	13,7			24.10.1998	34,9	11,2		
22.05.2003	28,8	9,1			01.07.2003	24,5	16		
12.06.2003	29	24,2			24.07.2003	24	17,5		
27.07.2003	23,3	24,4			27.07.2003	26,5	24,4		
29.08.2003	20,7	20,2			29.08.2003	36,8	20,2		
03.10.2003	25,5	13,9			03.10.2003	37,4	13,9		
04.10.2003	28,7	11,5			04.10.2003	25,7	11,5		
05.10.2003	52	3			05.10.2003	37,1	3		
07.10.2003	30,6	4,3			07.10.2003	33,1	4,3		
08.10.2003	30,8	3,3			08.10.2003	24,6	3,3		
09.10.2003	35	7,5			09.10.2003	35,1	7,5		
09.07.2007	42,4	13,7			17.05.2007	47,2	11,2		
08.08.2007	39,6	15,3			25.06.2007	35,7	10,7		
03.09.2007	31,3	14,6			09.07.2007	47,1	13,7		
04.09.2007	36	7,1			16.08.2007	36	12,1		
10.11.2007	35	1,6			03.09.2007	37,3	14,6		

Abweichung von Monatssummen des Niederschlags vom langjährigen Mittel und Ereignisjahre durch vertikale Linien und Dreiecke markiert

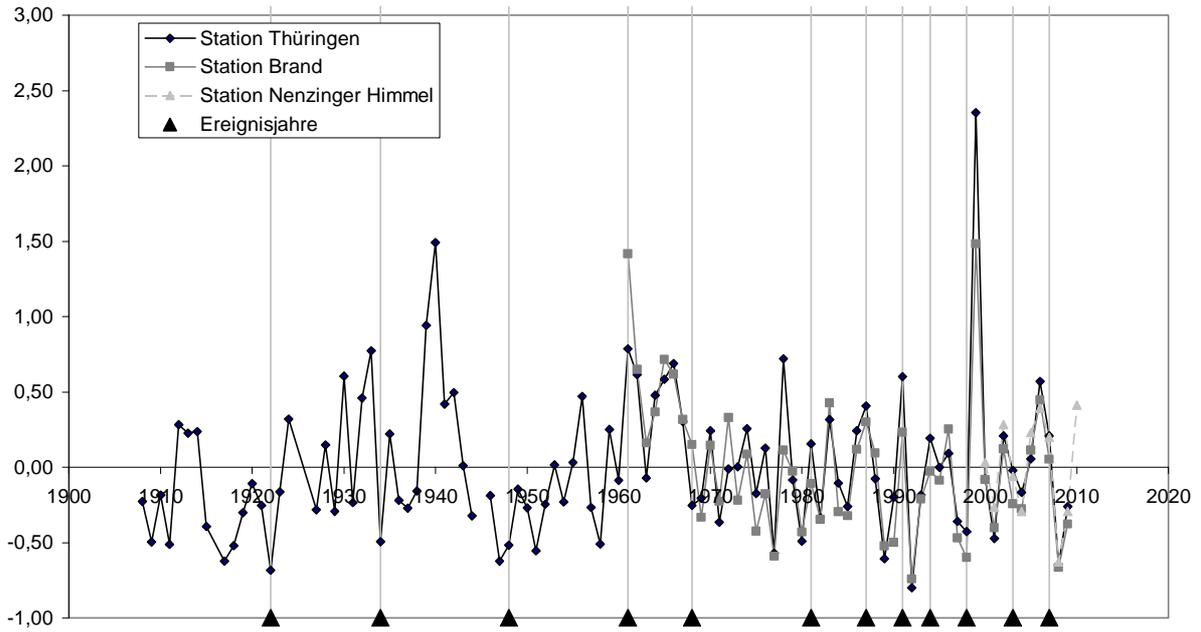
**Prozentuelle Abweichung von Mittelwert  
- Monatssumme März**



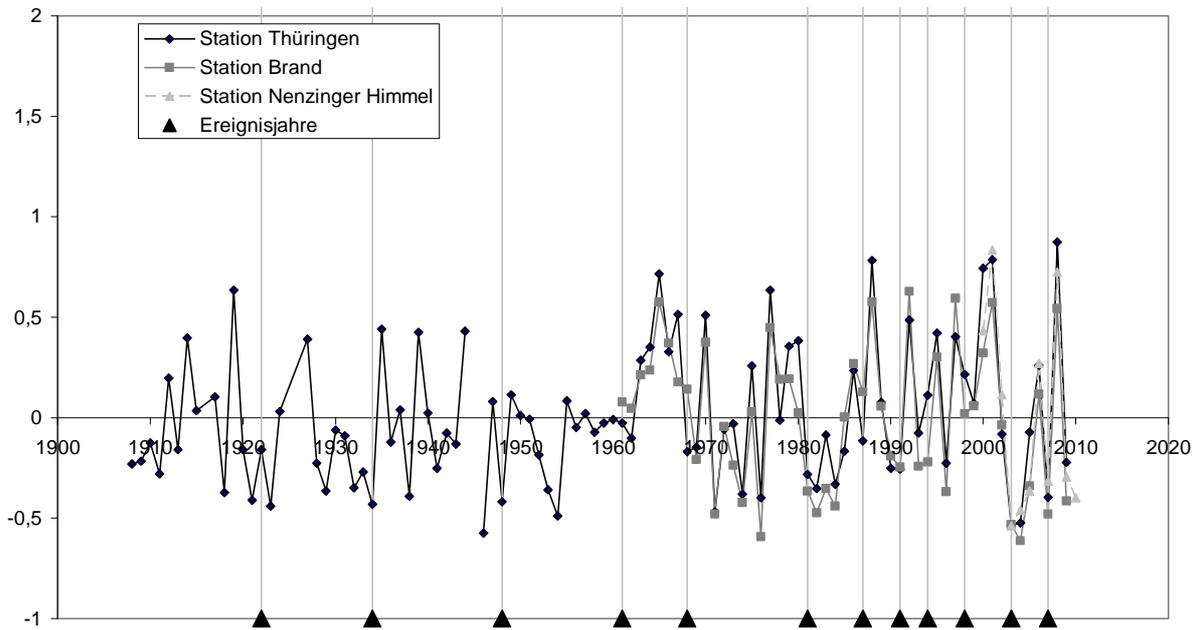
**Prozentuelle Abweichung von Mittelwert  
- Monatssumme April**



**Prozentuelle Abweichung von Mittelwert  
- Monatssumme Mai**



**Prozentuelle Abweichung von Mittelwert  
- Monatssumme März+April**



## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

## English Summary

### ***Introduction***

Debris flows are important geomorphic processes in steep alpine catchments, which might have big influence on the economic activity and existence in these areas. Therefore information on the frequency and spatial distribution are valuable in the face of coping with this process. A tool to collect data on past debris flows is dendrogeomorphology. This method utilizes the capacity of trees to integrate the living conditions in the past within their growth and store these informations in their bodies. With adequate methods these informations can be extracted and made accessible (Alestalo 1971, Fritts 1976).

Several research projects and surveys have highlighted the potential of dendrogeomorphological methods in the field of assessment of natural hazards. By analyzing the past growth of trees both temporal and spatial reconstruction of the debris flow activity of forested catchments is possible. Depending on the available plant material even statements on the intensity and event volume of past debris flow events are possible (Bollschweiler et al. 2008, Stoffel 2010, Mayer et al. 2010).

For this survey the “Bärenröfe”, a debris cone in Vorarlberg, Austria, was chosen as a survey site. The “Bärenröfe” is within the Gamperdona valley formed by the river Meng, which acts as the receiving stream for this debris cone.

The objects of this survey are the following:

- temporal and spatial reconstruction of the local debris flow activity using adequate dendrogeomorphological methods
- filtering of the influence of snow avalanches on sampled trees, respectively differentiation between debris flow and avalanche events using dendrogeomorphological methods
- assessment of event-triggering precipitation using the results of the dendrogeomorphological analysis and available meteorological data
- assessing the suitability of the species *Pinus mugo* ssp. *uncinata* for dendrogeomorphological campaigns

The geological material of the catchment is limestone of the mountain range Nördliche Kalkalpen. The catchment is relatively small, with a the total size of 0,68 km<sup>2</sup>. Excluding the deposition area of the debris cone it has a size of 0,55 km<sup>2</sup>. The mean slope of the deposition

area is approx. 28 %, while the upper catchment, the accumulation area, is steep with a mean slope of approx. 92 %.



Accumulation area		
area	0,55	km <sup>2</sup>
Mean slope	91,67	%
Deposition area		
area	0,13	km <sup>2</sup>
Mean slope	27,94	%
Catchment total		
area	0,68	km <sup>2</sup>
Channel length	1,24	km
Elevation difference	1,20	km
Relief-ratio	0,97	[/]
Melton-ratio	1,46	[/]

Picture of the “Bärenrufe” and its catchment, table with topographical parameters of the catchment

Samples were taken mainly from the species *Pinus mugo* ssp. *uncinata*. This species is almost exclusively colonizing the debris cone of the “Bärenrufe”. *Pinus mugo* ssp. *uncinata* (Straight Mountain Pine) is a sub-species of the *Pinus mugo* the Mountain Pine. It is a pioneer plant of high montane to subalpine sites up to 2400 m.a.s.l. adapted to dry soil conditions (Mayer 1977). Similar to its relative *Pinus sylvestris* the Scots Pine it has a wide ecological amplitude but gets pushed aside to sites with extreme conditions by more competitive species. Such sites, where *Pinus mugo* ssp. *uncinata* still flourishes, are nutrient-poor carbonate sites, debris cones or bog and marshlands (Starlinger 1999).

On the debris cone silent witnesses like recent debris deposits and lobes indicate the existence of debris flows on this site. Archival data and oral reports support this assumption. In total there are reports for 4 years with intensive debris flow activity in the “Bärenrufe”. The delivered years are 1948, 1979, 1991 and 1999. Exceptional strong flash floods of the river Meng are reported for the years 1762, 1910, 1976 and 2005.

The most prominent process in the catchment appears to be the debris flow activity. However in the catchment evidences for snow avalanche activity can be found too. In the higher sections of the cone areas with a small number of trees are present. Furthermore many trees in

this area appear deformed and stunted and show stem break. Such evidences were reported as signs for snow avalanche activity (Schönengruber et al. 1994, Bartelt & Stöckli, 2001). In dendrogeomorphological surveys such signs were used for selective sampling of trees affected by snow avalanches (Stoffel & Bollschweiler, 2008).



**Debris lobes as silent witnesses for past and recent debris flow activity**



**Signs of avalanche activity, stunted trees and tree with multiple stem failure and candelaber growth**

## ***Methods***

In total 206 trees growing on the “Bärenrüfe” were sampled using increment borer, chain - and hand saw. The sample trees were selected with the aim to reconstruct the debris flow activity for this area. Hence in general trees apparently affected by snow avalanches, trees damaged by game or other damaging factors were excluded for sampling. In general at least two increment cores or one core and a wedge were taken. Small trees were sampled using the hand saw and stem discs were taken. From dead erect trees also stem discs were taken with a chain saw. Samples were taken on the stem base as close to the ground as possible. In case of an injury a wedge or a core was taken close to the wound.

Three sectors, A, B and C, were defined to facilitate the orientation and future work with the samples. The sectors A and B, orographic right and left of the centre of the cone, showed mainly signs of debris flow activity. Sector C is on the orographic right side close to the proximal limit of the cone. In this sector signs of avalanche activity are frequent. Here exclusively trees were selected for sampling, if they showed signs of avalanche activity.

For documentation purposes for each sampled tree a printed form was completed. This form included amongst others information on the location of the tree, social position, tree height, circumference and nature of disturbance.

The collected cores were prepared for the analysis first by mounting on sample supports. Then the samples got sanded to reach a smooth surface. The final sanding step was done using a fine 600-sand paper. Resin marks on the samples were removed with acetone. The next steps were done using treering-measuring device (type LINTAB) coupled with a LEICA-stereomicroscope. Then every ten years (2000, 1990, 1980, etc.) a mark got set on the samples for orientation purposes. Subsequently by measuring the tree ring width curves of the tree ring width of the samples were created.

Challenges in tree ring analysis are the phenomena of missing and fake tree rings. Under certain conditions a tree might show no growth for several years resulting in missing tree rings for these years. Reasons are usually very unfavorable growth condition. In consequence the tree regains its vitality by showing growth and new tree rings once again (Schweingruber 1983). Fake tree rings have a similar appearance than tree rings like a darker coloured band. However they are in fact regions within two tree rings with high density and thick-walled cells. Such a feature might occur in case of extreme climatic conditions during the growing season. After such a period the growth and the appearance of the cells and the created tissue returns back to normal (Wimmer & Strumia 1998). These features represent error potential in tree ring measurements. Using reference curves such mistakes can be identified and corrected. Usually a reference curve is created using data of undisturbed trees. For this survey no trees from the species *Pinus mugo* ssp. *uncinata* appear to be undisturbed by debris flow activity. Hence a reference curve was created using data of disturbed trees. It was assumed that by integration of ring width curves from many trees the influence of debris flows on the growth remains suppressed. In total four reference curves were created, one for each sector and one using trees from all sectors. With these reference curves the measuring curves were checked for mistakes and if required corrected.

In the next step growth the samples and the curves were screened for growth reactions, which were caused by a debris flow. These reactions were abrupt growth decrease or increase,

formation of compression wood, injury or callus tissue and formation of lines traumatic resin ducts. If a growth reaction was found, the intensity was estimated subjectively, ranging from low (1), medium (2) to high intensity (3).

Behind the analysis is the “process-event-response concept” of Shroder (1980). A certain process (in this case debris flow activity) might show an event (a year with one or more debris flows). Such an event might cause a growth reaction in an affected tree. However not every growth reactions is a reliable indicator for event year. Due to the fact that these growth reactions might have other reasons then a debris flow certain tresholds have to be applied to differentiate from statistical noise.

For the identification of event years in this survey a semi-quantitative approach was applied (Stoffel & Bollschweiler, 2008). For this purpose an index value  $I_t$  were calculated for every year according to Shroder (1978). This index value is the ratio between the number of trees with reactions and the total number of living trees for the particular year.

Using a treshold for  $I_t$  of 4 % and the criterium of spatial clustering of the affected trees a list of event years were established. In detail this means that to identify a year as an event year at least 4 % of the trees on the debris cone have to show a growth reaction and the positions of these trees have to show some clustering. While some trees were affected by the event, which are clustered in a certain region of the cone, others remained unaffected.

To separate snow avalanche from debris flow events samples were taken in Sector C. The assumption is that there the influence of debris flow is less pronounced of snow avalanches. Thus with the analysis of samples of sector C it could be possible to identify avalanche events. Avalanche typically cause tilting and / or breaking of the stem or branches. These usually cause onset of compression wood, excentric growth and abrupt growth decrease (Laroque et al. 2001, Stoffel et al. 2006).

Meteorological data was available from four measuring station in the region. Unfortunately the station “Nenzinger Himmel” (altitude 1305 m.a.s.l.) located only 3 km from the survey site had data only until the year 2000. The station with the longest meteorological records (until 1907) has a distance of 13 km (altitude 550 m.a.s.l.). Both temperature and precipitation data was available. However the quality of the data was mediocre with gaps in the time series and precipitation measurements only on a daily basis.

For identification of event triggering precipitation events two tresholds were used. According to literature a daily precipitation sum of 30 mm (Fliri 1962) can be event triggering, while Wehry (1967) suggests a value of 50 mm.

Several arial photographs were available for the survey site. The years of the records were 1950, 1973, 2001, 2005 and 2007.

## **Results**

The analysis of the samples showed different properties between trees in the three sectors. While trees in sector A and B had similar properties with respect to number of tree rings (mean and variance) and mean ring width. In contrast trees in sector C had a higher mean age and especially in the 20<sup>th</sup> century smaller tree ring widths. Comparing the reference curves of the three sectors the synchronone appearing was striking. Peaks and drops correlate well.

In total 367 growth reactions were found in the samples. 66 % had the type growth increase, 22 % growth decrease, 4 % compression wood and 4 % injuries. Hence changes in growth were the prominent type of growth reactions.

In the time period between 1839 and 2007 171 growth reactions were related to 16 event years. For the rest 196 reactions or 53 % of the total amount it was not possible to relate these reactions to a particular event year.

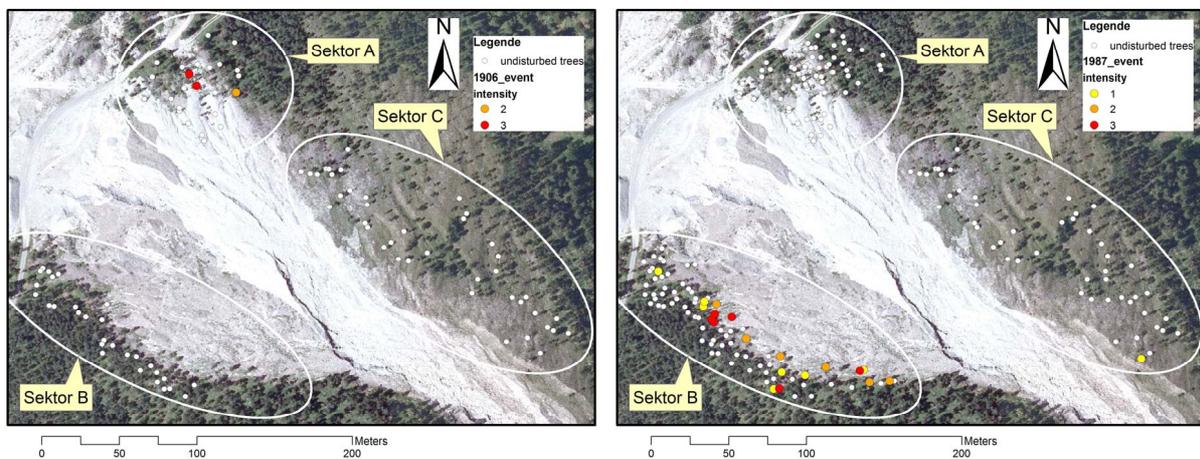
The reported event years of 1948 and 1991 were confirmed by the results, while the years 1979 and 1999 with reported debris flow activity did not have corresponding results.

<b>Event year</b>	<b>TRD</b>	<b>GD</b>	<b>GI, CW</b>	<b>dead</b>	<b>injury</b>	<b>sum</b>	<b>It</b>
1839			10			10	17,2
1851			6			6	9,5
1878			4			4	4,5
1906			3			3	2,4
1922			20			20	13,7
1934		5				5	3,1
1948		3	10			13	7,2
1961		2	8			10	4,9
1968		1	5			6	2,9
1981		1	20		1	22	10,7
1987		1	19	1	1	22	10,7
1991	1	6	5		6	18	8,7
1994	1		7			8	3,9
1998		5	5	1		11	5,3
2003		3	4	2		9	4,4
2007			2		2	4	1,9
<b>Summe</b>	<b>2</b>	<b>27</b>	<b>128</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>171</b>	

**List of event years and the related growth reactions, sum of reactions for the single event years, Index value calculated according to Shroder (1978)**

The filtering of avalanche events did not prove successful. The growth reactions of trees in sector C were mainly from the type growth increase or decrease with a small intensity. Such reactions are not typical for avalanche influence and thus it was not possible to identify single event years as avalanches.

Plotting the locations of trees with reactions related to the single event years it appears that the area of process activity varied in the past. While some event years had reactions in all three sectors, some only had reaction in one or two sectors. Assuming that the location of a growth reaction is connected with process activity in the surrounding of the tree, the debris flow activity shifted its location on the cone during the years.



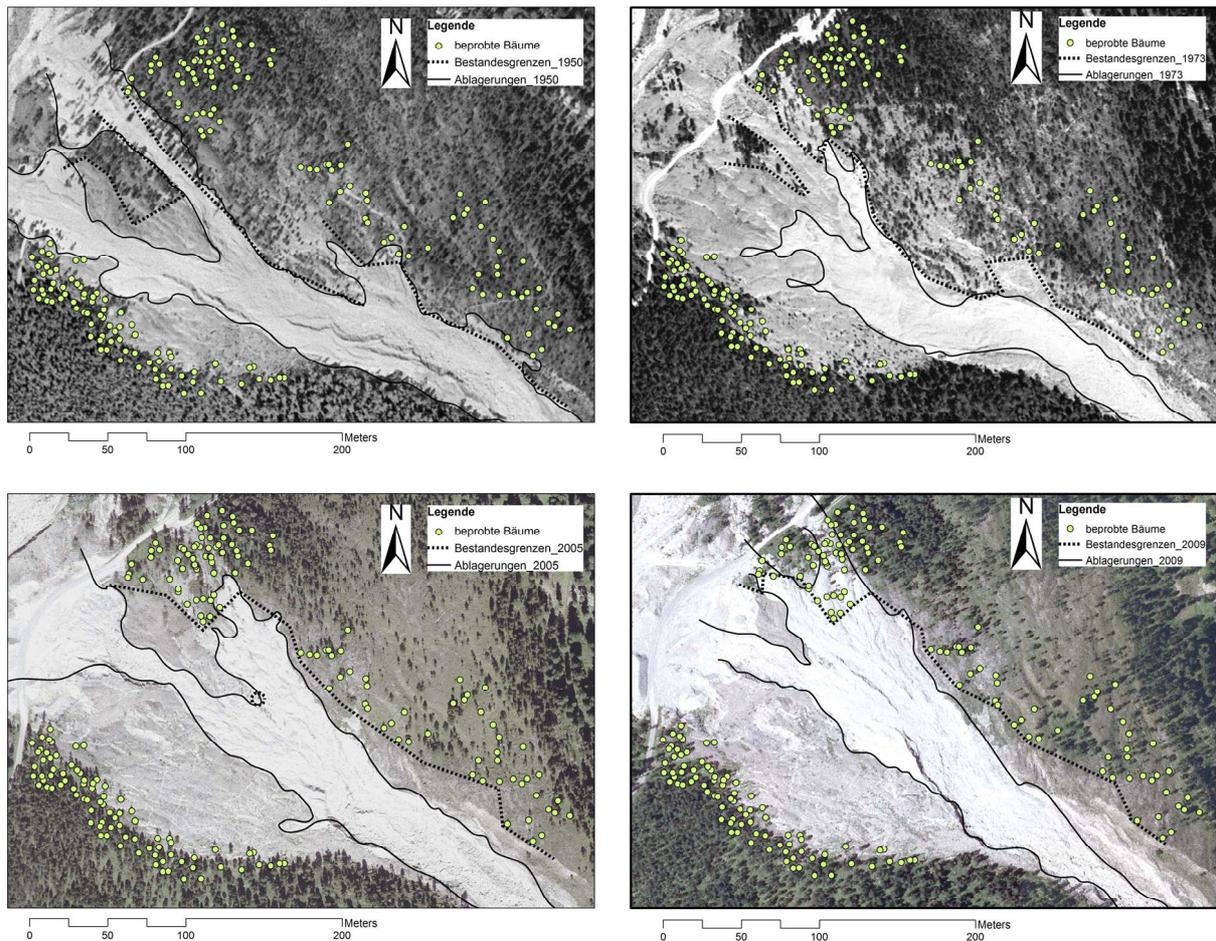
**Aerial photo with the location of trees with reactions related to respective event year**

The analysis of the meteorological data showed that the thresholds 30 and 50 mm were often exceeded at all measuring stations. Even during years with no reconstructed process activity often several times these thresholds were exceeded. Thus these thresholds were unsuitable for identification of event triggering precipitation. Comparing the 20 highest precipitation sums of the records with the reconstructed event years some agreement can be observed. During the event years 1922, 1948, 1981, 1991 and 1994 days with exceptional high precipitation sums were recorded. However for the days in the years 1981 and 1991 temperature data suggests that the precipitation happened in solid form.

Station Brand	N_B	T_T	T_O	Station Thüringen	N_T	T_T	T_O
	[mm]	[°C]	[°C]		[mm]	[°C]	[°C]
17.08.1963	70,2			11.09.1899	108		
07.10.1963	70,9		0,8	14.06.1910	146,5		
10.09.1965	82,1		0,3	09.01.1914	125		
31.05.1967	70,1		-1,6	30.09.1915	136,7		
30.06.1975	72,4		0	13.12.1918	94,4		
01.06.1976	75,4		3,6	15.07.1922	102,5		
07.08.1978	80,1		10,3	23.08.1937	96,4		
21.09.1979	77,9		3,3	30.05.1940	95		
19.07.1981	73,1		-2	31.05.1940	120,3		
05.09.1984	112,2	10,4	2,4	19.06.1948	93,1		
25.08.1985	77,3	12,5	3,6	20.01.1951	97		
06.07.1986	79,3	15,2	7	01.07.1954	107		
20.08.1988	81,8	13	7,4	10.06.1965	95		7,9
21.12.1991	80,9	-0,4	-6,4	05.09.1984	102,3	10,4	2,4
22.12.1991	80,5	4	-0,4	22.12.1991	81,4	4	-0,4
21.05.1999	173,9	7,2		06.07.1994	79,4	18,2	12,5
06.08.2000	83	13,1		21.05.1999	193,7	7,2	
11.08.2002	88,9	12,1		11.08.2002	80	12,1	
22.08.2005	120	14		22.08.2005	126,4	14	
17.07.2009	71,8	13,5		18.07.2009	83,5	12,8	

**The 20 highest precipitation sums in mm of the stations Brand (N\_B) and Thüringen (N\_T) daily mean temperature of the stations Thüringen (T\_T) and Obervermunt (T\_O)**

Due to the fact that several historical arial photographier were available a qualitative comparison and assessment of possible changes in the past was possible. The arial photos support the assumption that the process activity changed its location in the past. It seems that in the year 1950 the debris flow activity did more affect the south-western parts of the cone and the debris deposits appeared as two branches. During the decades the activity shifted towards the north-eastern border of the cone. Furthermore a significant change in the vegetation can be observed. While on the photo of 1950 big parts of the cone are covered with tree vegetation, this vegetation retreats at the north-eastern border during the years and the number of trees on the cone get significantly smaller.



Comparison of four aerial photos (from up left to right bottom, 1950, 1973, 2005, 2009)

## Discussion

In literature the index value  $I_t$  was used as a tool and criterium whether to accept a hypothetical event year or discard it. In this context the value of  $I_t$  as the threshold is the crucial question. By recent publications little comments were made on this matter, with the exception of Mayer et al. (2010), which suggests a threshold of 4 %. The results of this analysis support this suggestion. For two debris flow events in the “Bärenrufe”, 1948 and 1991, archival records are available. These records point out that in these years big parts of the cone were influenced by the debris flow events. The  $I_t$  value for these two event years is 7,2 resp. 8,7. In other words although big parts of the cone were affected only approx. 8 % of the sampled trees showed a reaction. Considering this a value of 4 % might include also smaller events, which did not have the same widespread influence then the events in year 1948 and 1991.

The attempt to identify avalanche events by selective sampling of trees hypothetically affected by avalanches did not prove successful. The assumptions that these trees show

significant reactions in their tree rings turned out to be wrong. However it seems likely that the reconstructed event years are in fact debris flow events rather than snow avalanches. This can be argued because of the type of growth reactions used to identify the event years. Usually for one event year growth reactions of several types were found, while the type growth increase was especially frequent. Abrupt growth increase is not a typical reaction caused by an avalanche, in contrast to compression wood, excentric growth and abrupt growth decrease (Laroque et al. 2001, Stoffel et al. 2006). However such especially strong reactions were rarely found in the samples.

Here the question arises, what caused these trees to have this special growth and appearing. A possible explanation is the effect of extreme site conditions. Shallow soil, long snow cover and the tendency to drain quickly might cause *Pinus mugo* ssp. *uncinata* to show slow growth and reach only weak dimensions in diameter and height. This forest type was described as an own variety (Mayer 1974). Thus it seems possible that the small height and stunted growth, which was estimated to be caused by avalanche activity, in fact is the product of the special site conditions.

With the available precipitation data from the measuring station it was not possible to clearly identify, which rainfall events have caused the reconstructed debris flows. The applicability of the thresholds of 30 and 50 mm was not given. Solely for some event years days with very high precipitation sums were found, suggesting that these days are related to the reconstructed events. Still the question remains why the other event years do not have corresponding extreme records. Precipitation data on a daily basis may not be sufficient to assess local rainfall events, which cause high peak discharge in the relatively small catchment of the "Bärenrufe". The accumulation area of the catchment has an area of 0,55 km<sup>2</sup> and a mean slope 100 %. After Clark (1945) the calculated time of concentration is approx. 30 min. It takes this amount of time for water to travel through the whole area and reach the outlet. Therefore given equal return periods a rainfall event with a duration of 30 min, would cause the highest discharge peak at the outlet of the accumulation area. Considering this daily precipitation sums may not be able to assess local rainfall events, which have usually short duration but high intensities.

Proving the suitability of the species *Pinus mugo* ssp. *uncinata* was one goal of this study. Two main restrictions are reported for this species in the face of dendrogeomorphological investigations of debris flows. First, due to the fact that this species is often growing only on sites affected by debris flows it may not be possible to get samples from trees unaffected by the process thus leaving it impossible to establish an undisturbed reference curve. Second, this

species is reported to be unsensitive towards sedimentation by debris flow material due to its deep root system, while other species like *Picea abies* Karst are more sensitive (Strunk 1995). With the results of this study both arguments can be opposed on a qualitative basis. The applied methodology of using many disturbed trees for the reference curve gave good results and seems to be capable of suppressing the influence of debris flows in the reference curve.

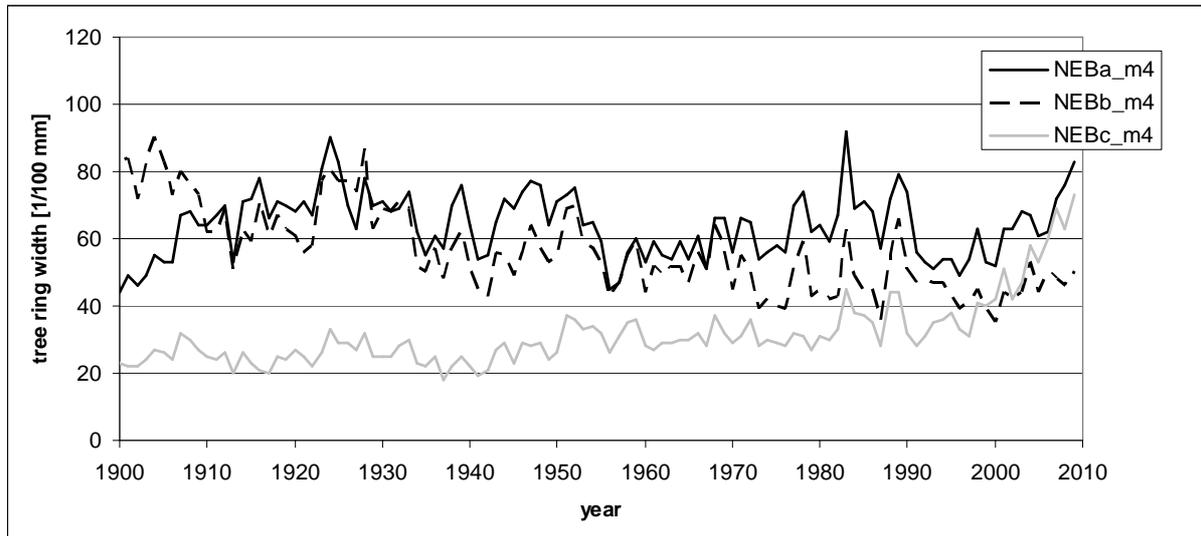


Chart showing three reference curves of the sectors a, b and c in the period of 1900 until 2010

Physiological properties like the tendency to develop a certain type of root system might get suppressed by the local site conditions. Although *Pine*-species usually develop a deep rooting trunk, on loose well drained debris material their roots remain shallow (Kutschera & Lichtenegger 2002). A few trees of the species *Picea abies* Karst were also sampled. A qualitative comparison of samples of *Picea abies* Karst and neighbouring *Pinus mugo* ssp. *uncinata* showed no obvious difference in the sensitivity in growth. It seems that although *Picea abies* Karst has an advantage in regards of competition and growth, under the local site conditions this advantage do not stick out and both species show similar growth and sensitivity towards disturbances.