

**Dendrogeomorphologische Analyse der Rutschungsaktivitäten
im Gebiet Bruust-Haltiwald**

Gemeinde Horw, Kanton Luzern

GEO 511 - Masterarbeit

Mathematisch–naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Zürich

Vorgelegt von:

Philippe Burkhalter

11-101-185

2017

Betreuer der Arbeit:

Dr. H. Gärtner

Eidg. Forschungsanstalt WSL

Fakultätsmitglied:

Prof. Dr. M. Egli

Geographisches Institut, Universität Zürich

I Danksagung

An dieser Stelle danke ich denjenigen Personen, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Zuerst bedanke ich mich bei **Loïc Schneider** und **Anne Verstege**, die mir im Labor stets zur Seite gestanden sind und mir die komplexe Handhabung der Geräte erklärten.

Mein besonderer Dank gilt **Dr. Holger Gärtner**, meinem Betreuer für die Arbeit. Dank seiner Hilfe wurden Fragen und Unklarheiten stets schnell geklärt und ein zügiges Vorankommen dieser Masterarbeit sichergestellt. Neben der wichtigen, fachlichen Hilfe hatte er auch für weitere Anliegen stets ein offenes Ohr und ermöglichte es, im Rahmen der TRACE 2017 und der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft (SGmG) 2017 meine Arbeit in Form eines Posters zu präsentieren.

Ich bedanke mich ebenfalls bei **Prof. Dr. Markus Egli**, der mich als Fakultätsvorsteher mit nützlichen Tipps bezüglich geeigneter Literatur und seinem Fachwissen unterstützt hat.

II Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde anhand der Rutschung im Gebiet „Bruust-Haltiwald“, die sich in der Gemeinde Horw am Fusse des Pilatus befindet, eine dendrogeomorphologische Untersuchung durchgeführt. Zu dieser Untersuchung gehörten das Kartieren des Rutschgebietes und die räumliche sowie die zeitliche Rekonstruktion vergangener und aktueller Rutschungsphasen.

Dieser Arbeit liegt die Annahme zu Grunde, dass die räumlich verteilten Hangbewegungen und die daraus resultierende Schrägstellung der Bäume auf dem betroffenen Areal das Wachstum dieser Bäume beeinflusst. In den Jahrringen der auf der Rutschung stehenden Bäumen wird eine solche Beeinflussung als Druckholz in Koniferen (Gymnospermen) und Zugholz in Laubbäumen (Angiospermen) widerspiegelt. Für die Untersuchungen wurden 11 Tannen (*Abies alba* Mill.) und 11 Buchen (*Fagus sylvatica* L.) auf der Rutschung beprobt und analysiert. Um eine ortsspezifische Referenzchronologie zu erstellen, wurden weitere 20 Bäume von jeder Art zur Datierungsüberprüfung beprobt. Diese Proben wurden nördlich, unweit des Untersuchungsgebiets, entnommen. Die Referenzchronologie stammt aus stabilerem Gelände ohne offensichtliche Anzeichen auf Hangbewegungen oder sonstige Beeinflussungen.

Die Auswertung aller 122 Bohrkerns geschah mittels standardisierter Verfahren. Durch die visuelle Analyse der Jahrringbreitenkurven konnten Bewegungen aufgrund exzentrischen Wachstums untersucht werden. Zusätzlich wurden die Bohrkerns auf das Vorkommen und Einsetzen von Reaktionsholz überprüft. Nebst der graphischen und visuellen Reaktionsdatierung wurden von ausgewählten Proben von *Fagus sylvatica* Dünnschnitte erstellt und analysiert. Dies geschah hauptsächlich durch die Bestimmung von Zugholz auf Zellebene. Dank dieser Methode wurden Fehler in der visuellen Reaktionsdatierung entdeckt und korrigiert.

Das Resultat der vorliegenden Arbeit ist ein detaillierter Ereigniskatalog des Gebiets „Bruust-Haltiwald“ und präsentiert die ablaufenden Bewegungen zwischen den Jahren 1950 bis Ende 2016. Die Resultate der Untersuchungen zeigen einen aktiven, dynamischen Hang, der seit Beginn der Messreihe kaum eine ruhige Phase aufweist. Insgesamt wurden in den Bohrkerns 42 Signale in 27 Jahren datiert. Dabei gingen die Jahre 1994, 1996 und 2006 als besondere Ereignisjahre hervor: in jeweils vier Bohrkerns konnte ein Hinweis auf ein Ereignis datiert werden. Eine räumliche Aufteilung der Rutschung erwies sich auch nach der Analyse der Daten als schwierig. Eine Einteilung in zwei Gebiete konnte jedoch anhand der Bewegungen sowie durch die Begehung im Feld vorgenommen werden. Die Resultate konnten nicht mit dem Exzentrizitätsindex von Wistuba et al. (2013) verglichen werden, da zu grosse Abweichungen auf Seite des Indexes vorhanden waren.

III Inhaltsverzeichnis

I	DANKSAGUNG	3
II	ZUSAMMENFASSUNG	5
III	INHALTSVERZEICHNIS	7
IV	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	11
V	TABELLENVERZEICHNIS.....	15
1.	EINLEITUNG.....	17
1.1	Zielsetzung und Fragestellung.....	18
2.	THEORETISCHER HINTERGRUND	19
2.1	Geomorphologie	19
2.2	Gravitative Massenbewegungen.....	20
2.2.1	Rutschung	22
2.3	Dendrochronologie.....	24
2.3.1	Baumwachstum	25
2.3.2	Dendrogeomorphologie	27
2.3.3	Reaktionsverhalten.....	29
2.4	Die untersuchten Baumarten.....	35
2.4.1	<i>Fagus sylvatica</i> L. – Buche	35
2.4.2	<i>Abies alba</i> Mill. - Weisstanne	36
3.	DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	37
3.1	Geographische Lage.....	37
3.2	Geologie	38
3.2.1	Bachschutt	39
3.2.2	Gehängelehm	39
3.2.3	Gehängeschutt „Hergiswiler Material“	39
3.2.4	Grundmoräne/ Moräne/ Glaziofluviatile Ablagerungen	40
3.2.5	Verwitterungszone der Felsoberfläche.....	40
3.3	Hydrologie.....	40
3.4	Klima und Vegetation	41

3.5	Rutschung und Bekannte Ereignisse	42
4.	METHODEN	44
4.1	Feldarbeit	44
4.1.1	Begehung und Kartierung.....	44
4.1.2	Abgrenzung des Untersuchungsstandorts.....	45
4.1.3	Selektion der Bäume und Probenentnahme	45
4.1.4	Selektion der Referenzstandorte	47
4.1.5	Kodierung der Proben.....	47
4.1.6	Darstellung mit ArcMap.....	48
4.2	Probenpräparation	48
4.2.1	Trocknung der Proben	48
4.2.2	Aufkleben der Proben auf einen Holzträger	49
4.2.3	Schneiden der Proben	49
4.2.4	Präparation von Dünnschnitten für <i>Fagus Sylvatica</i> L.....	49
4.3	Datenerhebung	52
4.3.1	Jahrringbreitenmessung	52
4.3.2	Kreuzdatierung	53
4.3.3	Erstellung der Referenzchronologie	54
4.4	Datenanalyse.....	55
4.4.1	Reaktionsdatierung.....	55
4.4.2	Exzentrizitätsindex.....	56
4.5	Ableich mit Niederschlagsdaten.....	57
5.	RESULTATE	58
5.1	Ergebnisse der Feldarbeit	58
5.2	Ergebnisse der Referenzchronologie	60
5.3	Ergebnisse des Exzentrizitätsindex.....	62
5.4	Ergebnisse der visuellen Ereignisanalyse.....	65
5.5	Vergleich Reaktionsdatierung und Exzentrizitätsindex.....	71
5.6	Ergebnisse der Holzanatomie	73
6.	DISKUSSION	75
6.1	Diskussion der Feldarbeit	75
6.2	Diskussion Referenzchronologie	77
6.3	Diskussion des Exzentrizitätsindex.....	78
6.4	Diskussion der Ereignisanalyse	80
7.	SCHLUSSFOLGERUNG.....	88

8.	LITERATURVERZEICHNIS.....	90
9.	ANHANG	97
10.	PERSÖNLICHE ERKLÄRUNG.....	105

IV Abbildungsverzeichnis

ABB. 1	DAS GEOMORPHODYNAMISCHE SYSTEM (VERÄNDERT NACH AHNERT, 2009: 21).....	20
ABB. 2	VEKTORPARALLELOGRAMM DER SCHWEREBESCHLEUNIGUNG AN EINEM HANG (AHNERT, 2009).....	21
ABB. 3	BILD A ZEIGT DIE SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER ROTATIONSRUTSCHUNG, DIE ENTLANG EINER KONKAVEN GLEITFLÄCHE ABRUTSCHT. DIE TRANSLATIONSRUTSCHUNG (BILD B) GLEITET ENTLANG EINER BESTEHENDEN SCHWÄCHEZONE. (VARNES, 1978. IN: BAFU, 2014).....	23
ABB. 4	DIE JAHRRINGSTRUKTUR EINER KONIFERE (CHERUBINI ET AL., 2004).....	26
ABB. 5	DÜNNNSCHNITTE VON JAHRRINGEN. AUF BILD (A) IST DER DÜNNNSCHNITT EINER WEISSTANNE ZU SEHEN. BILD (B) ZEIGT EINEN HARZKANAL EINER LÄRCHEN (LARIX DECIDUA MILL.). DAS RINGPORIGE HOLZ EINER ESCHEN (<i>FRAXINUS EXCELSIOR</i> L.) IST AUF DEM BILD (C) ZU ERKENNEN. DIE BUCHE (<i>FAGUS SYLVATICA</i> L.) ZEIGT IM DÜNNNSCHNITT EIN KLASSISCHES HALBRINGPORIGES HOLZ (D) (FOTOS: SCHOCH ET AL., 2004).....	27
ABB. 6	HERLEITUNG DER DENDROGEOMORPHOLOGIE AUS DER DENDROÖKOLOGIE UND DER GEOMORPHOLOGIE.	27
ABB. 7	DAS „PROCESS-EVENT-RESPONSE“ SCHEMA (NACH STOFFEL & BOLLSCHWEILER, 2009: 1016).....	29
ABB. 8	(A) SÄBELWUCHS – KONTINUIERLICHE DRUCKHOLZBILDUNG. (B) SÄBELWUCHS MIT EINER ÜBERKOMPENSATION – KONTINUIERLICHE DRUCKHOLZBILDUNG AUF DER OBER- UND UNTERSEITE. (C) BAJONETT-FORM DURCH PLÖTZLICHE VERSCHIEBUNG – ABRUPTES EINSETZEN VON DRUCKHOLZ (SCHWEINGRUBER, 1993: 5).....	30
ABB. 9	STAMMSCHEIBE EINER KONIFERE MIT DEUTLICHER DRUCKHOLZBILDUNG (GÄRTNER & HEINRICH, 2013: 98) ..	31
ABB. 10	EREIGNISDATIERUNG DER SCHRÄGSTELLUNG ANHAND EINSETZENDER EXZENTRIZITÄT (FRITTS, 1976: 220).....	33
ABB. 11	DAS BEZIEHUNGSGEFLECHT ZWISCHEN NIEDERSCHLAG UND TEMPERATUR (FRITTS, 1976).....	34
ABB. 12	VERBREITUNG DER BUCHE IN DER SCHWEIZ (LFI, 2017A).....	35
ABB. 13	VERBREITUNG DER WEISSTANNE IN DER SCHWEIZ (LFI, 2017B).....	36
ABB. 14	ÜBERSICHTSKARTE DER GEMEINDE HORW UND HERGISWIL. DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET IST MIT DEM ROTEN PFEIL GEKENNZEICHNET (GRUNDLAGE: KARTENPORTAL MAP.GEO.ADMIN.CH, ©SWISSTOPO; GELÄNDEMOMODELL: GOOGLE EARTH; GRAFIK: MAX MAISCH, 2015).....	37
ABB. 15	GEOLOGISCHE KARTE VOM PILATUS UND UMGEBUNG (GRUNDLAGE: KARTENPORTAL MAP.GEO.ADMIN.CH, ©SWISSTOPO; GELÄNDEMOMODELL: GOOGLE EARTH; GRAFIK: MAX MAISCH, 2015).....	38
ABB. 16	DIE GLIEDERUNG UND ENTSTEHUNG DER LOCKERGESTEINE (NACH: LOUIS, 1999: 10).....	40
ABB. 17	KLIMADIAGRAMM VON HORW (CLIMATE-DATA, 2017).....	41
ABB. 18	ÜBERSICHTSKARTE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES „BRUUST-HALTWI WALD“ WELCHES IN DER ALTEN, NACH-EISZEITLICHEN RUTSCHUNG „ROTFLUE“ LIEGT (HINTERGRUND: HILLSHADE SWISSALTI ^{3D} , LANDESKARTE LK25, ©SWISSTOPO 2017).....	43
ABB. 19	(A & B) DIE BEPROBUNG EINER SCHRÄGGESTELLTEN BAUMES ERFOLGT IM BEREICH DER STÄRKSTEN KRÜMMUNG (GÄRTNER ET AL., 2004: 202). (C) BEISPIEL DER BEPROBUNG DES BAUMES WT07.....	46
ABB. 20	PROBEENTNAHME MIT DEM HAGLÖF-ZUWACHSBOHRER.....	47
ABB. 21	ÜBERBLICK ÜBER DIE EINZELNEN SCHRITTE ZUR ERSTELLUNG VON DÜNNNSCHNITTEN EINER GANZEN BOHRKERNES. (A) ZUERST WIRD MAISSTÄRKE AUF DEN KERN AUFGETRAGEN UND ANSCHLIESSEND WERDEN DIE RESTE MIT EINEM TUCH ENTFERNT (B). (C) DANACH WIRD DAS MOWIOL AUF DEN KERN AUFGETRAGEN UND ÜBERSCHÜSSIGES	

	MOWIOL NACH DESSEN TROCKNUNG MIT DER KLINGE ENTFERNT. (D) DER GEKÜHLTE TESA-KLEBER WIRD SEITLICH BÜNDIG AUF DIE PROBE AUFGEKLEBT UND, WÄHREND DAS ENDE NACH OBEN GEHALTEN WIRD, MIT DER KLINGE GESCHNITTEN (F). (G) DER KLEBESTREIFEN WIRD EIGEWEICHT UND NACH EINIGER ZEIT KANN DER DÜNNSSCHNITT VOM KLEBER ABGELÖST WERDEN. (H) DIE VERWENDETEN MATERIALIEN FÜR DAS ANSCHLIESSENDE KONSERVIEREN (LINKS NACH RECHTS: GLASTRÄGER, WASSER, KANADABALSAM, ASTRABLAU, SAFRANIN, ETHANOL UND XYLOL). (I) LINKS NACH RECHTS: BOHRKERN MIT GLATTER OBERFLÄCHE, DÜNNSSCHNITT DES KERNS, GEFÄRBTER DÜNNSSCHNITT DES KERNS UND PERMANENT FIXIERTER DÜNNSSCHNITT DES KERNS AUF EINEM GLASTRÄGER (GÄRTNER ET AL., 2015).	51
Abb. 22	(A) BOHRKERN DER PROBE WT03, DURCHGEBOHRT. LINKS SIND DAS DUNKLE DRUCKHOLZ UND DIE DARAUS RESULTIERENDE EXZENTRIZITÄT GUT ERKENNBAR. (B) DÜNNSSCHNITT DER PROBE BU05 MIT REAKTIONSHOLZ IN DER MITTE UND IM RECHTEN AUSSENBEREICH DES KERNS.	52
Abb. 23	LINTAB-MESSTISCH (LINKS) KOMBINIERT MIT DER TSAP-SOFTWARE (RECHTS).....	52
Abb. 24	DAS PRINZIP DER KREUZDATIERUNG (SCHWEINGRUBER, 1988: 51).	53
Abb. 25	BERECHNUNG DER GLEICHLÄUFIGKEIT (SCHWEINGRUBER, 1988: 13).	54
Abb. 26	REAKTIONS DATIERUNG ANHAND DER EXZENTRIZITÄT DER KURVEN.	56
Abb. 27	ÜBERSICHT ÜBER DIE DIGITALE VERSION DER FELDKARTIERUNG (HINTERGRUND: PIXELKARTE PK25, ©SWISSTOPO 2017).	59
Abb. 28	DIE KARTE ZEIGT DIE POSITION UND NEIGUNGSRICHTUNG (PFEILRICHTUNG) DER EINZELNEN PROBEN (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	60
Abb. 29	DIE REFERENZCHRONOLOGIE FÜR <i>ABIES ALBA</i> (BLAU) UND DIE PROBENDICHTE (SCHWARZ).....	61
Abb. 30	DIE REFERENZCHRONOLOGIE FÜR <i>FAGUS SYLVATICA</i> (ORANGE) UND DIE PROBENDICHTE (SCHWARZ).	61
Abb. 31	DAS RESULTAT DES EXZENTRIZITÄTSINDEXES AM BEISPIEL DER PROBE BU05. INSGESAMT ÜBERSCHRITTEN 10 JAHRE DEN SCHWELLENWERT (ROTE STERNE).	63
Abb. 32	DIE DATIERTEN REAKTIONEN PRO BAUM (LINKS) UND PRO JAHR (RECHTS) VON <i>ABIES ALBA</i> ANHAND DES EXZENTRIZITÄTSINDEXES.	63
Abb. 33	DIE DATIERTEN REAKTIONEN PRO BAUM (LINKS) UND PRO JAHR (RECHTS) VON <i>FAGUS SYLVATICA</i> ANHAND DES EXZENTRIZITÄTSINDEXES.	64
Abb. 34	DIE ANHAND DES EXZENTRIZITÄTSINDEXES DATIERTEN REAKTIONEN IM VERGLEICH ZWISCHEN <i>ABIES ALBA</i> UND <i>FAGUS SYLVATICA</i> . AUS DEM DIAGRAM GEHT EINE HÄUFUNG DER PROZESSE UM 1972 UND AB 1992 HERVOR.	65
Abb. 35	DER VERGLEICH DER ANZAHL REAKTIONEN PRO JAHR ZWISCHEN <i>ABIES ALBA</i> UND <i>FAGUS SYLVATICA</i>	66
Abb. 36	DIE DATIERTEN REAKTIONEN PRO BAUM (LINKS) UND PRO JAHR (RECHTS) VON <i>ABIES ALBA</i>	66
Abb. 37	DIE DATIERTEN REAKTIONEN PRO BAUM (LINKS) UND PRO JAHR (RECHTS) VON <i>FAGUS SYLVATICA</i>	67
Abb. 38	DIE KARTE DER FELDKARTIERUNG ZEIGT, IN WELCHEN JAHREN EIN EREIGNIS IN DEN BOHRKERNEN AUFGEZEICHNET WURDE. DABEI WERDEN NUR DIEJENIGEN EREIGNISSE DARGESTELLT, DIE IN ZWEI ODER MEHR BOHRKERNEN ZU BEOBACHTEN WAREN. 1994, 1996 UND 2006 WURDE IN JEWEILS VIER BZW. SECHS BOHRKERNEN EREIGNISSE ENTDECKT (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	70
Abb. 39	DIE ABBILDUNG ZEIGT DIE SUMMIERTEN JAHRESNIEDERSCHLAGSWERTE DER STATION LUZERN (BLAUE LINIE) MIT DEM DURCHSCHNITTSWERT (SCHWARZE LINIE). DIE GRAUEN BALKEN ZEIGEN DIE EREIGNISJAHRE.	71

Abb. 40	VERGLEICH DER DATIERTEN REAKTIONEN VON <i>FAGUS SYLVATICA</i> ANHAND DES EXZENTRIZITÄTSINDEX UND DER REAKTIONSDATIERUNG. DER VERGLEICH WURDE EINERSEITS MIT DER ANZAHL DER REAKTIONEN PRO JAHR (OBEN) UND ANDERERSEITS MIT DER ANZAHL REAKTIONEN PRO BAUM (UNTEN) GEMACHT.	72
Abb. 41	VERGLEICH DER DATIERTEN REAKTIONEN VON <i>ABIES ALBA</i> ANHAND DES EXZENTRIZITÄTSINDEX UND DER REAKTIONSDATIERUNG. DER VERGLEICH WURDE EINERSEITS MIT DER ANZAHL DER REAKTIONEN PRO JAHR (OBEN) UND ANDERERSEITS MIT DER ANZAHL REAKTIONEN PRO BAUM (UNTEN) GEMACHT.	73
Abb. 42	DÜNNSCHNITT DER PROBE BU01I. DIE DATIERTE REAKTION WURDE AUF 2007 FESTGELEGT, BEI GENAUERER BETRACHTUNG IST JEDOCH ZUGHOLZ IM SPÄTHOLZ VON 2006 ERKENNBAR.....	74
Abb. 43	MESSPUNKTE DER GEMEINDE HORW ENTLANG EINER LINIE AUF DER RUTSCHUNG (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	76
Abb. 44	MONATLICHE NIEDERSCHLAGSVERTEILUNG IN LUZERN VON 1950 BIS 2016. DER KONTINENTALE NIEDERSCHLAGSCHARAKTER IST IM SOMMER ERKENNBAR. BESONDERS GROSS SIND DIE STREUUNGEN IN DEN MONATEN MAI, JULI UND NOVEMBER. DIE STATION BEFINDET SICH AUF EINER HÖHE VON 454 M.Ü.M.	78
Abb. 45	DATIERTER REAKTIONEN AUS DER REAKTIONSDATIERUNG (OBEN) UND DEM EXZENTRIZITÄTSINDEX (UNTEN). DIE GRAUEN BALKEN MARKIEREN DIE MIT DER REAKTIONSDATIERUNG DATIERTEN EREIGNISJAHRE (1960 UND 1994). DIESE JAHRE WERDEN MIT DEM EXZENTRIZITÄTSINDEX NICHT ALS EREIGNISJAHRE ERKANNT. DIE ROTEN KREISE ZEIGEN DIE ANSCHEINEND OFFENSICHTLICHSTEN EREIGNISSE.	79
Abb. 46	EREIGNISANALYSE VON 1950 BIS 1959 (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	80
Abb. 47	EREIGNISANALYSE VON 1960 BIS 1969 (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	81
Abb. 48	EREIGNISANALYSE VON 1970 BIS 1979 (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	81
Abb. 49	EREIGNISANALYSE VON 1980 BIS 1989 (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	82
Abb. 50	EREIGNISANALYSE VON 1990 BIS 1999 (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	83
Abb. 51	EREIGNISANALYSE VON 2000 BIS 2009 (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	84
Abb. 52	EREIGNISANALYSE VON 2010 BIS 2016 (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	84
Abb. 53	AUFTEILUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES ANHAND DER BEWEGUNGSRICHTUNG DER RUTSCHUNG (HINTERGRUND: SWISSIMAGE, ©SWISSTOPO 2017).	86

V Tabellenverzeichnis

TAB. 1	KLASSIFIKATION DER MASSESBEWEGUNGEN (NACH VARNES, 1978 UND CRUDEN & VARNES, 1996).....	21
TAB. 2	KLASSIFIKATION VON RUTSCHUNGEN NACH TIEFE DER GLEITFLÄCHE (BUWAL ET AL., 1997. IN: HEINIMANN ET AL., 1998).....	23
TAB. 3	FAKTOREN DIE RUTSCHUNGEN BEEINFLUSSEN KÖNNEN.....	24
TAB. 4	TYPISCHE WACHSTUMSREAKTIONEN IN GEOMORPHOLOGISCH GEPRÄGTEN GEBIETEN (NACH GÄRTNER & HEINRICH, 2013).....	29
TAB. 5	AUFBAU DER LOCKERGESTEINE IM UNTERSUCHUNGSGEBIET (LOUIS, 1999).....	39
TAB. 6	ÜBERSICHT ÜBER DIE VERWENDETEN MODELLE UND IHR ALTER.....	58
TAB. 7	KONTROLLMESSUNGEN DER GEMEINDE HORW DER RUTSCHUNG „BRUUST-HALTIWALD“.....	77

1. Einleitung

In der Schweiz sind rund 6-8% des gesamten Bundesgebietes durch Massenbewegungen gefährdet, wobei die voralpinen Gebiete sowie die Bergkantone am stärksten betroffen sein dürften (Lateltin, 1997). Zu dieser Berechnung zählen heute aktive sowie auch in der Vergangenheit aktive Rutschungen. Geomorphologische Ereignisse werden in der Literatur zusammen mit den zunehmenden Treibhausgasemissionen und einer möglichen Klimaveränderung immer häufiger erwähnt (Stock, 2005). Laut Stoffel et al. (2014) ist eine Abnahme von Niederschlagsereignissen während der Sommerzeit zu erwarten, während die Niederschläge im Frühling und Herbst voraussichtlich zunehmen werden. Extremereignisse, welche den Menschen in seinem Lebensraum bedrohen, unterliegen einem zunehmenden Trend (IPCC, 2014; Hufschmidt et al., 2005). *Dies zeigt sich auch am aktuellen Beispiel, dem Bergsturz von Bondo, der am 23.08.2017 acht Menschen unter sich begrub und anschliessende Murgänge die Umgebung des Dorfes verwüsteten.* Röthlisberger (1991) zeigt in seiner Chronik von AD 600 bis ins Jahr 1988 Unwetterschäden in der Schweiz auf. Alleine ein Unwetterereignis im August 1987 verursachte durch Rutschungen, Murgänge und Überflutungen Schäden von ca. 800 Mio. Franken. Schutzbauten und Sicherungsmassnahmen alleine genügen in solchen Fällen nicht mehr, um die Bevölkerung sowie die Infrastruktur zu schützen (Lateltin, 1997). Die bewusste Wahrnehmung der Gefahren ist notwendig, um diese Herausforderungen verantwortungsvoll zu meistern (Lateltin, 1997). Um Prognosen über die zukünftige Entwicklung einer Gefährdung machen zu können, muss die Aktivität des Gebietes bekannt sein, was durch die Rekonstruktion vergangener Ereignisse aufgearbeitet werden kann (Goudie, 1995). Dabei soll das Augenmerk daraufgelegt werden, wo eine Gefährdung bestehen und wie diese sich auf Mensch und Umwelt auswirken könnte. Um dies festzustellen, sind Beobachtungen, Karten und Messungen notwendig. Eine Dichte der Messreihen nimmt zwar tendenziell zu, meist sind Messungen jedoch nur punktuell und über einen erst kurzen Zeitraum verfügbar (Evans & Kirkby, 2004). Genau hier liegt die Stärke der Dendrogeomorphologie – nämlich in der Rekonstruktion und der Datierung geomorphologischer Ereignisse über eine bestimmte Zeitspanne (Alestalo, 1971; Gärtner et al., 2004). Die so gewonnenen Daten können in eine Gefahrenbeurteilung einfließen und bei der für jede Gemeinde obligatorischen Erstellung einer Gefahrenkarte berücksichtigt werden. Als letzter Schritt erfolgt die Umsetzung durch eine Massnahmenplanung in den Bereichen der Raumplanung, Schutzmassnahmen und Notfallplanung (Lateltin, 1997). Die Resultate der Unwetteranalysen von 2005 und 2007 haben gezeigt, dass solche raumplanerischen Massnahmen von grosser Bedeutung sind, da in diesen Jahren Hänge, die zuvor nicht erfasst oder beurteilt worden sind, instabil wurden (BAFU, 2014). Prognosen über mögliche Hangbewegungen können dabei kaum gemacht werden, was die planerischen Massnahmen erneut als unerlässlich erscheinen lässt (BAFU, 2015).

1.1 Zielsetzung und Fragestellung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die aktive Rutschung im Gebiet Bruust-Haltiwald zu kartieren und vergangene sowie aktuelle Rutschungsphasen räumlich und zeitlich zu rekonstruieren. Der Arbeit liegt die Annahme zu Grunde, dass das Wachstum der Bäume durch die Rutschung und der damit resultierenden Untergrundbewegung beeinflusst wird. Bei einer Rutschung korrigieren Bäume die Wachstumsrichtung so, dass eine Schrägstellung überwunden werden kann. Die Beeinflussung durch die Schrägstellung ist in den Jahrringen als Druckholz in Koniferen (Gymnospermen) und Zugholz in Laubbäumen (Angiospermen) sichtbar (Ruelle, 2014). Um die Hangprozesse zu datieren, werden die Jahrringe von Tannen (*Abies alba* Mill.) und Buchen (*Fagus sylvatica* L.) analysiert. Mit Hilfe der Jahrringanalyse eröffnen sich neue Chancen, gravitative Prozesse zu datieren bzw. zu rekonstruieren (Gärtner et al., 2004).

Bis Dato wurde in der Dendrogeomorphologie hauptsächlich mit Koniferen gearbeitet, die mit der Bildung von Druckholz auf eine Schrägstellung reagieren. Der Grund dafür ist, dass das Reaktionsholz in Koniferen bereits makroskopisch durch eine leicht dunklere, rötliche Färbung erkennbar ist und die Jahrringgrenzen meist klar und deutlich sichtbar sind. In Laubhölzern können Reaktionsholzanalysen nur durch die Auswertung von Dünnschnitten gemacht werden (Pilate et al., 2004). In dieser Arbeit werden Koniferen wie auch Laubbäume, welche mit der Bildung von Zugholz auf eine Schrägstellung reagieren, untersucht.

Aus der Zielsetzung ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Kann das Alter der Rutschung Bruust-Haltiwald bestimmt werden?
- Können die Rutschungsphasen durch eine Jahrringanalyse von *Abies alba* und *Fagus sylvatica* rekonstruiert werden?
- Wie ist die räumliche und zeitliche Auflösung der Ereignisse?
- Können aufgrund der Analyse von Niederschlagsdaten und der datierten Rutschereignisse Vorhersagen über zukünftige Bewegungen gemacht werden?

Die erarbeiteten Daten sollen letztlich dem Forst- und Werkdienst der Gemeinde Horw zur Verfügung gestellt werden. Sie sollen bereits vorhandene Vermutungen mit wissenschaftlichen Daten unterstreichen und ergänzen. Aus eigenen Beobachtungen und Messungen konnte der Forst- und Werkdienst bereits bestätigen, dass der Hang in Bewegung ist. Die Messresultate sind im Kapitel 6.1 zu finden.

2. Theoretischer Hintergrund

Im folgenden Abschnitt werden zu Beginn relevante Begrifflichkeiten definiert und erläutert. Im Anschluss werden die untersuchten Bäume im Detail präsentiert.

2.1 Geomorphologie

„Geomorphologie ist die wissenschaftliche Beschäftigung mit den Formen der Erdoberfläche. Dazu gehören die Oberflächenformen der Landgebiete – zum Beispiel Gebirge, Täler, Ebenen, Hänge, Flussbetten und Dünen – ebenso wie die Oberflächenformen des Meeresboden wie das Watt, Korallenriffe und Tiefseegräben. Die Geomorphologie ist sowohl Bestandteil der Geographie als auch der Geologie.“ (Ahnert, 2009).

Als ein Teilgebiet der physischen Geographie beschreibt die Geomorphologie die Beziehung zwischen Landformen und landschaftsbildenden Prozessen. Diese geomorphologischen Prozesse bilden aktiv neue Landformen und verändern bzw. beeinflussen bestehende Landformen. Abb. 1 zeigt die wesentlichen Beziehungen zwischen den Komponenten des geomorphodynamischen Systems im Überblick. Nach Ahnert (2009) entsprechen Erdkruste und Oberflächenformen sowie deren Eigenschaften bezüglich Relief, Geometrie und Material dem Resultat von reliefbildenden und reliefvermindernden Prozessen.

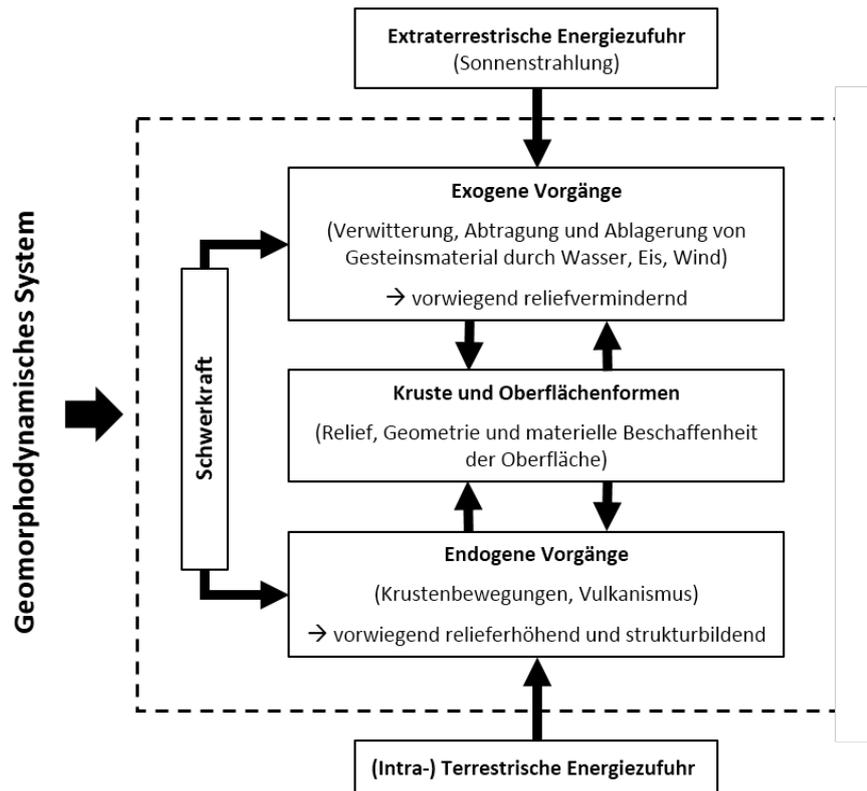


Abb. 1 Das geomorphodynamische System (verändert nach Ahnert, 2009: 21).

Die Prozesse werden in zwei Kategorien unterteilt. Die *endogenen Prozesse* werden hauptsächlich aus dem Erdinnern gesteuert und wirken sich relieferhöhend und strukturbildend auf die Oberflächenformen aus. Prozesse, die aus der Atmosphäre und Hydrosphäre auf die Erdoberfläche wirken, nennt man *exogene Prozesse*. Dazugehörige Prozesse sind Verwitterung, Abtragung und Ablagerung von Gesteinsmaterial (Ahnert, 2009). Da die Schwerkraft oftmals an ein Transportmedium wie Wasser, Eis und Wind gebunden ist, wirken diese Prozesse reliefvermindernd (Zepp, 2004).

2.2 Gravitative Massenbewegungen

„Unter gravitativen Massenbewegungen versteht man hangabwärts gerichtete Verlagerungsprozesse, die auf schwach geneigten bis steilen Hängen überwiegend unter dem Einfluss der Schwerkraft erfolgen. Sie werden deshalb auch Massenbewegungen genannt.“ (Zepp, 2004).

Skempton & Hutchinson (1969) unterteilen den Prozess in Massenbewegung und Massentransport. Neben Skempton & Hutchinson (1969) hat auch Varnes (1978) den Begriff grundlegend beeinflusst. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) unterteilt den Begriff in Sturz- und Rutschgefahren. Eine genaue, einheitliche und internationale Klassifizierung existiert bis heute nicht.

Die Klassifikation der Massenbewegungen (Tab. 1), welche für diese Arbeit verwendet wird, basiert auf Varnes (1978) und auf Cruden & Varnes (1996). Die Einteilung erfolgt anhand der Bewegungsart und der Art der durch den Prozess bewegten Masse.

Bewegungsart	Festgestein	Lockergestein (fein- und grobkörnig)
Stürzen	Steinschlag, Blockschlag, Felssturz Bergsturz	
Kippen	Felskipfung, Hakenwurf	
Gleiten	Felsrutschung, Sackung	Rutschung
Fließen		Murgang, Hangmure

Tab. 1 Klassifikation der Massenbewegungen (nach Varnes, 1978 und Cruden & Varnes, 1996).

Die Unterscheidung des Lockergesteins macht Varnes (1978) wie folgt:

- Grobkörnig: 20-80% der Partikel besitzen einen Korndurchmesser >2 mm.
- Feinkörnig: 80% oder mehr der Partikel weisen eine Korngröße <2 mm auf.

Während die Gravitation g die treibende Kraft während des Prozesses ist, spielt die Hangneigung für die Auslösung einer Massenbewegung eine entscheidende Rolle (Abb. 2). Ahnert (2009) beschreibt die Wirkung der Schwerkraft auf die Materialbewegung an Hängen als eine Funktion der Hangneigung. Wird der Neigungswinkel α erhöht, steigt mit ihr die Scher- oder Schubspannung τ auf die Masse m an, wobei die Druckspannung σ gleichzeitig abnimmt. Übersteigt α den kritischen Winkel, beginnt sich die Masse m hangabwärts zu bewegen.

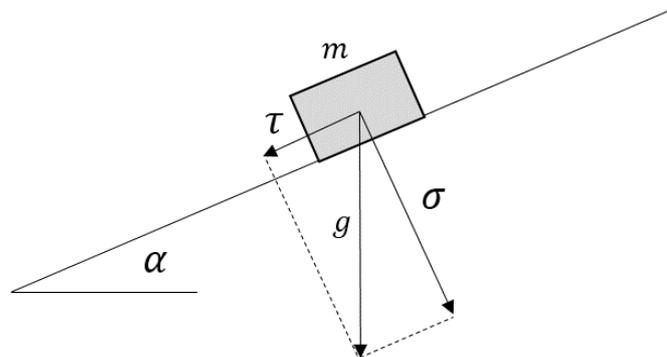


Abb. 2 Vektorparallelogramm der Schwerkerebeschleunigung an einem Hang (Ahnert, 2009).

Doch nicht nur die oben beschriebenen physikalischen Grundlagen sind für die Auslösung einer Massenbewegung entscheidend. Neben der geologischen Struktur sind die Gesteinsbeschaffenheit sowie die Wassersättigung wichtige, zu berücksichtigende Faktoren. Nach Lateltin (1997) werden Massenbewegungen auch oft durch anthropogene Einflüsse beeinflusst.

2.2.1 Rutschung

„Eine Rutschung ist eine hangabwärts gerichtete, zusammenhängende Bewegung von Fest- und/oder Lockergestein unter dem Einfluss der Gravitation.“ (Cruden, 1991).

Goudie (2006) erweitert Cruden's Definition, indem er eine Gleitfläche hinzufügt, auf welcher sich das Material bewegt. Rutschungen ereignen sich meist an mässig geneigten bis steilen Böschungen (10-40° Neigung). Sie sind das Resultat eines Scherbruchs an der Untergrenze der bewegten Masse (Heinimann et al., 1998). Wasser spielt bei diesem Prozess eine entscheidende Rolle. Durch das Wasser wird der Porenwasserdruck erhöht und gleichzeitig die Scherfestigkeit erniedrigt. Im Verhältnis dazu steigt die Scherspannung an, bis die Masse in Bewegung gerät. Eine solche Reaktion kann auch durch die Zunahme des Quelldrucks, also durch das Quellen von Tonmineralien, ausgelöst werden. Die folgenden drei Kräfte sind für die Bewegung ausschlaggebend:

- Schwerkraft
- Reibungskraft
- Kohäsion

Daraus lässt sich folgende Formel ableiten:

Hang ist stabil wenn: $\text{Reibungskraft} + \text{Kohäsion} > \text{Schwerkraft}$

Hang ist instabil wenn: $\text{Reibungskraft} + \text{Kohäsion} < \text{Schwerkraft}$

Aufgrund unterschiedlicher Rutscheigenschaften werden Rutschungen in Rotations- und Translationsrutschungen unterteilt.

Gleitet die Rutschmasse entlang einer konkaven Rutschfläche ab, wird sie *Rotationsrutschung* genannt (Abb. 3). Durch den konkaven, kreisförmigen Gleithorizont treten im Anrissgebiet der Rotationsrutschung oftmals charakteristische Nackentälchen auf (Krummenacher & Tobler, 2009). Wegen Stauchung der Rutschmasse entsteht an der Front eine Stauchwulst. Diese Art von Rutschungen entstehen typischerweise in tonigem und siltigem Lockergestein (Heinimann et al., 1998) und verformen sich intern nur wenig während des Prozesses. Ist die Wassersättigung im Rutschkörper zu hoch, kann sich eine Rotationsrutschung in eine Hangmure weiterentwickeln (Ritter et al., 2011).

Als *Translationsrutschung* versteht man das Abgleiten von Schichten oder Schichtpaketen auf einer planaren Scherfläche entlang einer bestehenden Schwächezone (Casale & Margottini, 1999). Während des Prozesses wird der Rutschkörper nicht verformt. Sie entstehen häufig auf Flysch, kalkigem Mergelschiefer oder metamorphen Schieferen (Heinimann, 1998). Die räumliche Ausdehnung einer Translationsrutschung kann von wenigen m² bis zu 30 km² variieren, wobei die Tiefe der Rutschmasse mehrere Dekameter erreichen kann (BAFU, 2015).

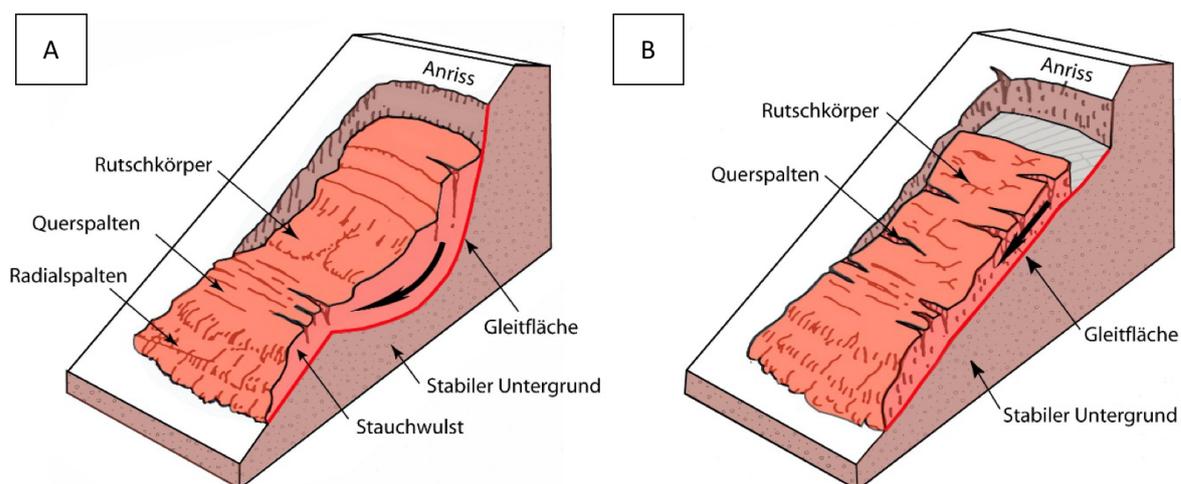


Abb. 3 Bild A zeigt die schematische Darstellung einer Rotationsrutschung, die entlang einer konkaven Gleitfläche abrutscht. Die Translationsrutschung (Bild B) gleitet entlang einer bestehenden Schwächezone. (Varnes, 1978. In: BAFU, 2014).

Neben der Einteilung der Rutschung anhand der charakteristischen Gleitfläche werden Rutschungen auch nach Rutschmächtigkeit eingeteilt (Tab. 2).

Rutschung	Tiefe der Gleitfläche unter Terrain
oberflächlich, flachgründig	0-2 m
mitteltief, mittelgründig	2-10 m
tief, tiefgründig	>10 m

Tab. 2 Klassifikation von Rutschungen nach Tiefe der Gleitfläche (BUWAL et al., 1997. In: Heinimann et al., 1998).

Rutschungen werden auch anhand der Rutschgeschwindigkeit klassifiziert. Dabei wird zwischen permanenter und spontaner Rutschung unterschieden. Bei spontanen Rutschungen gleiten die Lockergesteinsmassen plötzlich aufgrund des Verlusts der Scherfestigkeit auf einer neu ausgebildeten Gleitfläche ab. Bei den schnellen, spontanen Bewegungen handelt es sich meistens um flach- bis mittelgründige Translations- oder Rotationsrutschungen (Krummenacher & Tobler, 2009). Bewegen sich die Lockergesteinsmassen über einen längeren Zeitraum gleichmässig und kontinuierlich auf einer bestehenden Gleitfläche talwärts, spricht man von einer permanenten Rutschung. Es handelt sich meistens um tiefgründige Rotations- oder Translationsrutschungen (Krummenacher & Tobler, 2009).

Beeinflusst werden Rutschungen von verschiedenen Faktoren.

Grunddisposition	Variable Disposition	Auslöser
Geologie	Masse	Starkniederschlag/ Schneeschmelze
Tektonik	Hangwasser	Erschütterungen (Erdbeben, vulkanische Aktivitäten und anthropogene Einflüsse)
Hydrologie	Strömungsdruck	
Topographie		
Hydrogeologie		
Bodenmechanik		

Tab. 3 Faktoren die Rutschungen beeinflussen können.

2.3 Dendrochronologie

Das Wort „Dendrochronologie“ setzt sich aus den griechischen Wörtern Dendron (Baum), Chronos (Zeit) sowie Logos (Lehre) zusammen. Diese Wissenschaft untersucht das Baumwachstum in Bezug auf seine Umwelt in Abhängigkeit von Zeit und Raum (Fritts, 1976). Nicht nur Bäume wachsen mit einem rhythmischen Zuwachs – die Hörner eines Steinbocks, die Schale einer Muschel oder auch der Zahn eines Mammuts weisen ebenfalls rhythmische Wachstumsphasen auf (Schweingruber, 1988). Das Baumwachstum wird durch innere (Alter und Genetik) sowie äussere Einflüsse (Wind, Schnee und Exposition) limitiert und kontrolliert (Schweingruber, 1993). Beeinflusst wird das Baumwachstum auch durch das Klima sowie durch mechanische Einwirkungen (z.B. Rutschungen). Die Dendrochronologie basiert auf dem Prinzip, dass Bäume und Sträucher in saisonal geprägten Klimaregionen ein jährliches Wachstumsmuster, die so genannten Jahrringe, bilden. Zu Beginn der Vegetationsperiode wird dabei das dünnwandige Frühholz gebildet, welches im frühen Herbst, gegen Ende der Vegetationsperiode, von dunkleren und dickwandigeren Spätholzzellen (Spätholz) abgelöst wird. Dadurch können Jahrringe abgegrenzt, einem bestimmten Kalenderjahr eindeutig zugeordnet und datiert werden (Fritts & Swetnam, 1989; Schweingruber, 1993). Dank der Holzanatomie kann nicht nur das exakte Kalenderjahr, sondern auch die Saisonalität bestimmt werden (Gärtner & Heinrich, 2010).

Die jahrgenaue Zuordnung, also die absolute Datierung, ist die Stärke der Dendrochronologie. Laut Schweingruber (1993) ist die Dendrochronologie die genaueste Methode der Geo-Wissenschaften, um Datierungen zu machen. Der Einfluss des Klimas kann sich direkt auf die Ausbildung extrem breiter oder schmaler Jahrringe auswirken. Diese charakteristische Abfolge von Jahrringen widerspiegelt sich an einem Standort mit denselben klimatischen Bedingungen in den Jahrringen von Bäumen derselben Art wieder. Mit diesen Informationen können mit Hilfe der Kreuzdatierung (siehe Kapitel 4.3.2) Chronologien erstellt und jahrgenaue Datierungen gemacht werden (Phipps, 1985). Als Gründer der Dendrochronologie zu Beginn des 20. Jahrhunderts zählt der Astronom A. E. Douglass, der mit Hilfe des Geographen Ellsworth Huntington eine 3000 Jahre

lange Chronologie erstellte, um die Entstehung und den Niedergang der Maya-Kultur zu untersuchen. Ausserdem versuchte Douglass, mit der Hilfe der Kreuzdatierung eine Verbindung zwischen dem Klima auf der Erde und dem elfjährigen Zyklus der Sonnenfleckenaktivitäten herzustellen (Klein & Eckstein, 1988; Becker, 1992).

2.3.1 Baumwachstum

Wie bereits erwähnt, basiert die Dendrochronologie auf der Tatsache, dass Bäume in den gemässigten Zonen deutliche Jahrringe bilden. Die Bildung von Jahrringen ist das Resultat des sekundären Wachstums (Schweingruber, 2007). Dieses wird durch das Kambium initiiert. Es handelt sich dabei um eine dünne Schicht lebender Zellen, welche gegen innen das Xylem (Holzzellen) und gegen aussen das Phloem (Borke) bilden (Schweingruber, 1988). In saisonal geprägten Klimaregionen ist das Baumwachstum auf eine genaue Vegetationsperiode beschränkt (Gärtner & Heinrich, 2013). Die Dauer dieser Vegetationsperiode ist Temperatur-, Niederschlags- und Standortabhängig. Das Zellwachstum unterscheidet sich bei Koniferen (Gymnospermen) und Laubhölzern (Angiospermen) deutlich. Beide bilden jedoch Früh- und Spätholzzellen. Koniferen bilden grosse, dünnwandige Tracheiden im Frühholz. Die grosslumigen Frühholzzellen stellen hauptsächlich den Wasser- und Nährstofftransport im Frühling sicher. Später im Sommer, bis zum Ende der Vegetationsperiode, werden abgeflachte, kleinlumigere und dickwandigere Spätholzzellen gebildet. Diese Zellen sind wegen den dickeren Zellwänden und des höheren Lignin Anteils dunkler und verleihen dem Baum mehr Stabilität (Stoffel & Bollschweiler, 2009).

Laubhölzer bilden zusätzlich die auffälligen grossen Gefässe (Tracheen) und Faserzellen, die hauptsächlich dem Wassertransport aus den Wurzeln in die Blätter dienen (Gärtner & Heinrich, 2010). Die Variabilität der Laubhölzer ist dadurch höher als bei Koniferen (Schweingruber, 2001). Laubhölzer werden in ringporig, halbringporig und zerstreutporig unterteilt. Ringporige Hölzer bilden im Frühjahr deutlich grössere, weitlumigere Gefässe als im Spätholz. Dadurch sind die Jahrringgrenzen relativ gut erkennbar (Fritts, 1976). Bei halbringporigen Hölzern nimmt die Grösse der Gefässe innerhalb des Jahrringes ab (Schweingruber, 1993). Bei den zerstreutporigen Hölzern sind die weitläufigen Gefässe über das Früh- und Spätjahr einigermaßen gleich verteilt (Fritts, 1976).

Gemeinsam haben sie jedoch die mehr oder weniger markante Jahrringgrenze, die den Übergang zwischen Spät- und Frühholzzellen signalisiert (Schweingruber, 1988).

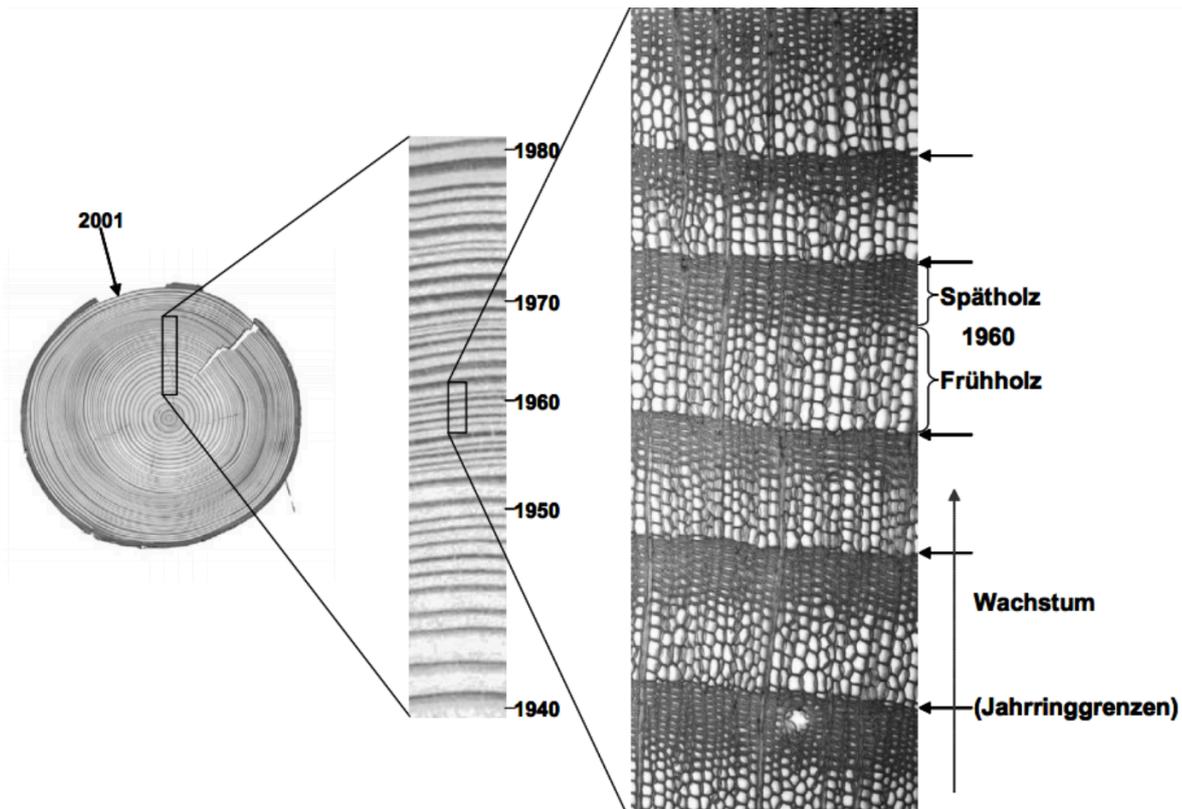


Abb. 4 Die Jahrringstruktur einer Konifere (Cherubini et al., 2004).

Die Breite des Jahrrings wird durch biotische und abiotische Faktoren beeinflusst. Zu den biotischen Faktoren gehören die genetische Grundvoraussetzung und das Altern des Baumes, welches für jede Baumart und jeden Baum individuell ist. Zu den abiotischen Faktoren gehören Licht, Wasser, Wind, Temperatur und Nährstoffverfügbarkeit (Schweingruber, 1996). Da die abiotischen Faktoren für Bäume an einem spezifischen Standort ähnlich sind, registrieren sie auch die gleichen Umwelteinflüsse und Veränderungen in den Jahrringen. Neben diesen Informationen werden in den Jahrringen auch mechanische Störungen durch Oberflächenprozesse festgehalten (Stoffel & Bollschweiler, 2009). Bäume können durch Steinschlag verletzt, durch Murgänge begraben und durch Rutschungen schräg gestellt werden. Solche Prozesse zeigen sich in den Ringen mit Wachstumsanomalien. Mit Hilfe der Dendrogeomorphologie, die im Kapitel 2.3.2 beschrieben wird, werden diese Anomalien untersucht.

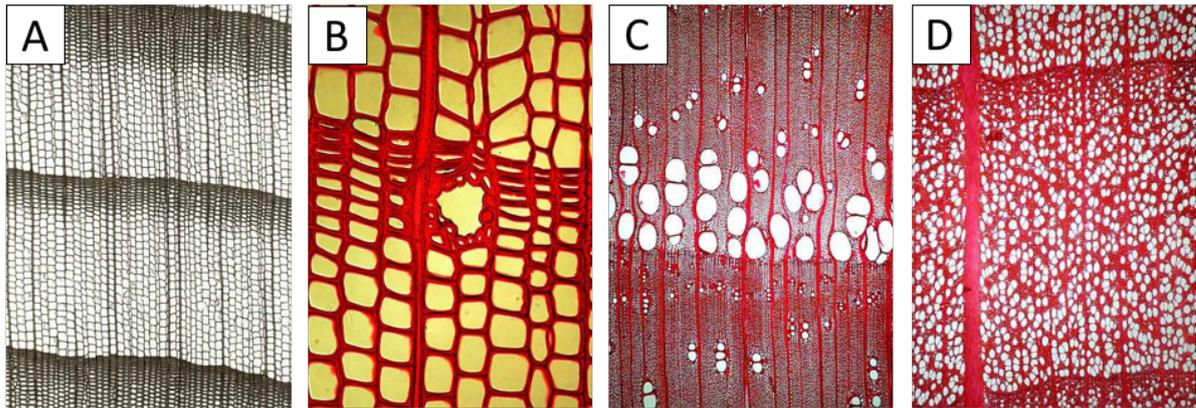


Abb. 5 Dünnschnitte von Jahrringen. Auf Bild (A) ist der Dünnschnitt einer Weisstanne zu sehen. Bild (B) zeigt einen Harzkanal einer Lärche (*Larix Decidua* Mill.). Das ringporige Holz einer Esche (*Fraxinus excelsior* L.) ist auf dem Bild (C) zu erkennen. Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) zeigt im Dünnschnitt ein klassisches halbringporiges Holz (D) (Fotos: Schoch et al., 2004).

2.3.2 Dendrogeomorphologie

Die Dendrogeomorphologie (dendron (Baum), geo (Erde), morphos (Gestalt) und logos (Lehre)) kombiniert die beiden Forschungsrichtungen der Geomorphologie, welche die Erdoberfläche mit ihren Prozessen und Landformen beschreibt (Strahler 2006) und der Dendroökologie, die sich mit der Rekonstruktion vergangener Umweltprozesse durch die Analyse der Jahrringe beschäftigt. Der Begriff der Dendrogeomorphologie wurde von Jouko Alestalo (1971) eingeführt und geprägt. Er verwendete die Techniken der Dendrochronologie, um geomorphologischer Prozesse zu untersuchen und war an der Weiterentwicklung der Dendrogeomorphologie entscheidend beteiligt. Auch Shroder (1980), Braam et al. (1987a & 1987b) sowie Butler (1987) hatten grossen Einfluss auf die Weiterentwicklung der Dendrogeomorphologie.

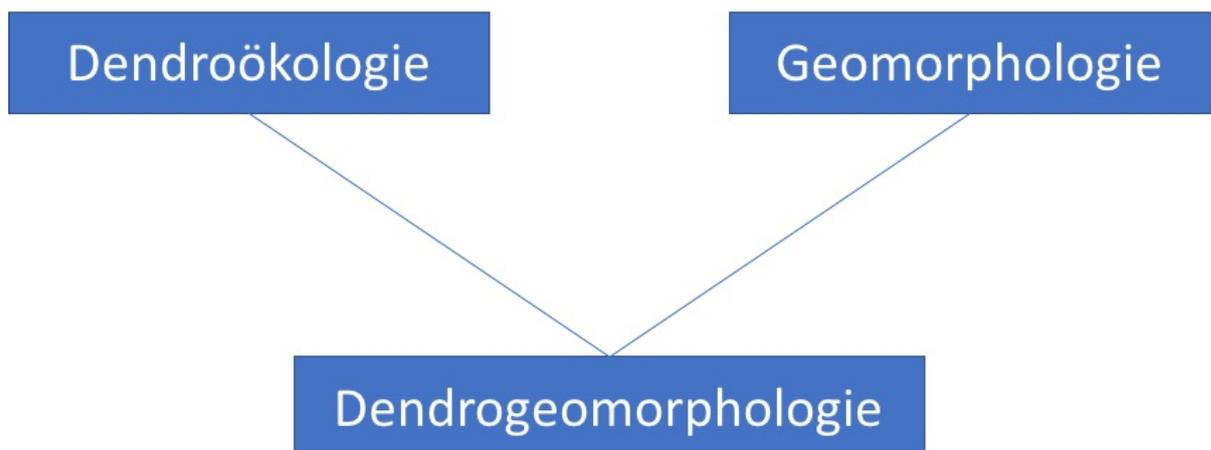


Abb. 6 Herleitung der Dendrogeomorphologie aus der Dendroökologie und der Geomorphologie.

Bei der Dendrogeomorphologie werden geomorphologische Prozesse und Ereignisse anhand bestimmter Merkmale in den Jahrringen datiert und rekonstruiert (Shroder, 1980). Sie ermöglicht es, dank einer Vielzahl von Analysetechniken einen Blick in die Vergangenheit zu werfen. Durch Jahrringanalysen betroffener, auf der Rutschung stehender Bäume kann eine exakte räumliche und zeitliche Rekonstruktion von Rutschungen erstellt werden (Chelli & Stefanini, 1999). Wachstumsreaktionen bzw. Störungen sind in den Jahrringen messbar und makro- oder mikroskopisch sichtbar. Somit können sie dank der Kreuzdatierung absolut datiert werden (Gärtner & Heinrich, 2013). Diese Reaktion auf eine Störung nennt Shroder (1980) ein „process-event-response system“ (Abb. 7). Dabei löst ein geomorphologischer Prozess einen spezifischen Event in unmittelbarer Nähe des Baumes aus, welcher anschliessend eine messbare Wachstumsreaktion auf die Störung aufweist (Gärtner & Heinrich, 2013).

Zentraler Aspekt in der Dendrogeomorphologie ist, dass ein geomorphologisches Ereignis das Wachstum eines Baumes durch ein oder mehrere Prozesse beeinflussen kann, welche der Baum mit Wachstumsreaktionen auszugleichen versucht. Um den verantwortlichen Prozess eindeutig bestimmen zu können, muss jedoch das gesamte Gebiet geomorphologisch betrachtet und analysiert werden. Zu dieser Analyse gehören die genaue Bestimmung der vorhandenen geomorphologischen Prozesse sowie eine geomorphologische Feldkartierung. Anschliessend können anhand der Wachstumsreaktionen der Bäume und der Standorte der einzelnen Individuen Interpretationen über abgelaufene Prozesse gemacht werden. Wichtig dabei ist es, dass die standortspezifischen Signale ausgeschlossen werden (Gärtner & Heinrich, 2013). Deshalb wird eine Referenzchronologie erstellt, die das ungestörte Baumwachstum im Untersuchungsgebiet wieder spiegeln soll. Sie ist die Grundlage jeder dendrochronologischer Untersuchung, um Störungen jeglicher Art zu datieren und zu erkennen. Die Bäume, die für die Referenzchronologie verwendet werden, müssen ausserhalb des von den Prozessen beeinflussten Gebietes stehen, sollten jedoch in der näheren Umgebung wachsen, um dieselben lokalen Wachstumsbedingungen wie z.B. Klima, Niederschlag, Bodeneigenschaften und Höhe widerzuspiegeln.

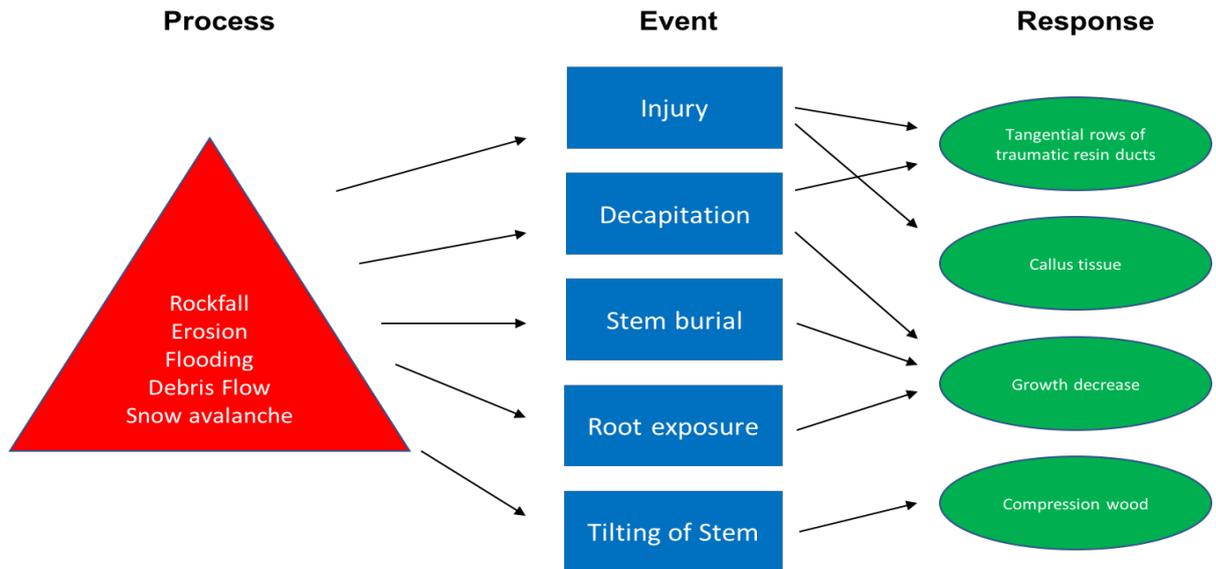


Abb. 7 Das „process-event-response“ Schema (nach Stoffel & Bollschweiler, 2009: 1016).

Üblicherweise werden Koniferen für dendrogeomorphologische Untersuchungen verwendet. Einerseits sind Koniferen die dominante Spezies in alpinen Gebieten, wo das Naturgefahrenpotential am höchsten ist. Andererseits sind die simple Zellstruktur und die deutlicheren Jahrringgrenzen einfacher zu analysieren, als bei Laubhölzern (Gärtner & Heinrich, 2013). Mit Hilfe von aufwändigen, holzanatomischen Untersuchungen können jedoch auch Laubhölzer für dendrogeomorphologische Untersuchungen verwendet werden.

2.3.3 Reaktionsverhalten

Im folgenden Kapitel wird eine Übersicht über mögliche Wachstumsreaktionen gegeben und aufgezeigt, wie sie äusserlich erkennbar sind. Eine detaillierte Beschreibung wird jedoch nur von den im Gebiet vorhandenen Wachstumsreaktionen gemacht. Die folgende Tabelle wurde nach Gärtner & Heinrich (2013) abgeändert.

Störung	Erkennungsmerkmale	Reaktion des Baumes
Direkter Druck	Schrägstellung, Säbelwuchs	Exzentrizität (Druck- und Zugholz)
Unstabiler Untergrund	Schrägstellung, Säbelwuchs	Exzentrizität, Wachstumseinbruch, traumatische Harzkanäle
Nudation	Nicht sichtbar	Wachstumszunahme
Einschlag	Wunden am Stamm	Überwallung der Wunde, Wachstumseinbruch, traumatische Harzkanäle
Verschüttung	Wurzelansatz nicht sichtbar	Wachstumseinbruch oder Wachstumszunahme, Adventivwurzeln
Erosion	Partielle Freilegung der lebenden Wurzeln, Freilegung toter Wurzelspitzen, Schrägstellung	Anatomische Veränderung der Wurzeljahrringe
Veränderung des Grundwasserspiegels	Nicht sichtbar	Wachstumseinbruch oder Wachstumszunahme

Tab. 4 Typische Wachstumsreaktionen in geomorphologisch geprägten Gebieten (nach Gärtner & Heinrich, 2013).

2.3.3.1 Schrägstellung und Säbelwuchs

Bäume, die auf einem sich bewegenden Untergrund stehen, weisen oft eine J-Form auf. Die Ursachen für eine Schrägstellung variieren. Plötzlich auftretender Druck, von geomorphologischen Prozessen verursacht (z.B. Lawinen und Murgänge), oder langsame jedoch stetige Hangprozesse (z.B. Kriechprozesse und Rutschungen) führen zur Schrägstellung der durch die Prozesse betroffenen Bäume (Lundström et al., 2007). Die bogenförmigen Bäume sind das Resultat der Schrägstellung durch mechanischen Druck im Untergrund. Schiefgestellte Bäume kommen häufig in Gebieten vor, die durch geomorphologische Prozesse beeinflusst werden (Stoffel & Bollschweiler, 2009). Im Allgemeinen orientiert sich das Wachstum eines ungestörten Baumes entgegen dem Schwerfeld und ist folglich negativ geotrop (Alestalo, 1971; Timell, 1986b). Ein schräggestellter Baum wird immer versuchen, seine aufrechte Position wieder zu erlangen (Mattheck, 1993). Einfach gekrümmte (J-Form) oder mehrfach gekrümmte Bäume (S-Form) lassen neue Triebe wieder senkrecht nach oben wachsen (Alestalo, 1971).

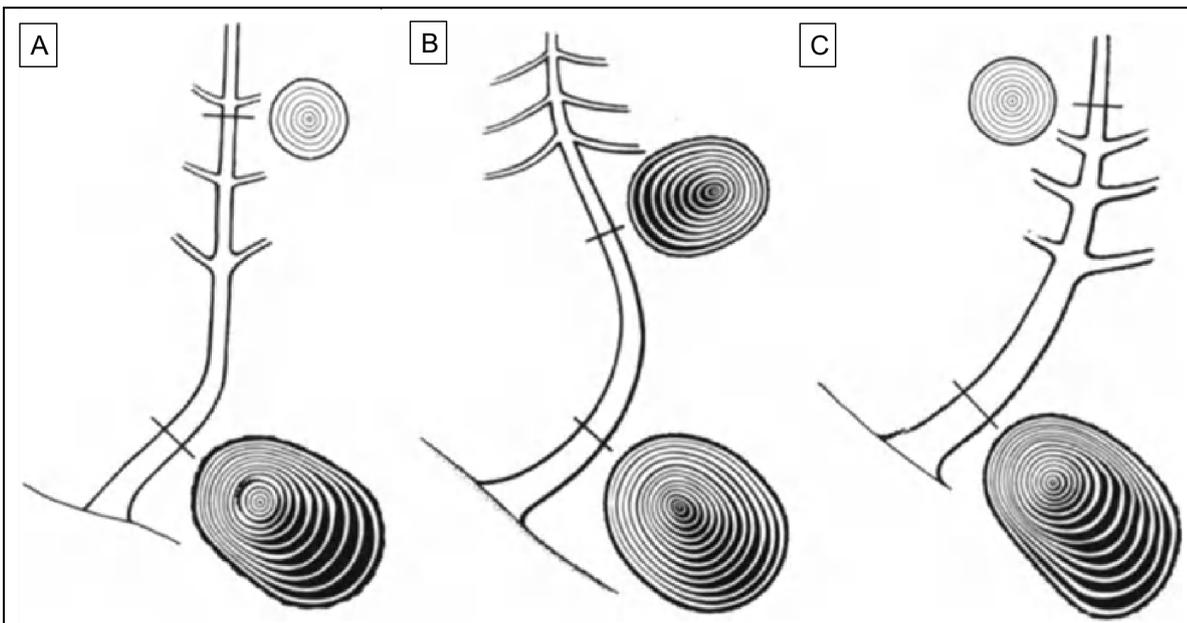


Abb. 8 (A) Säbelwuchs – kontinuierliche Druckholzbildung. (B) Säbelwuchs mit einer Überkompensation – kontinuierliche Druckholzbildung auf der Ober- und Unterseite. (C) Bajonett-Form durch plötzliche Verschiebung – abruptes Einsetzen von Druckholz (Schweingruber, 1993: 5).

Es existieren viele Anpassungsformen, anhand welcher Rückschlüsse auf die Art der Störung gezogen werden können. Eine S-Form entsteht laut Schweingruber (1996) durch eine Überkompensation nach einer episodischen, plötzlichen Schrägstellung. Kontinuierliche, langanhaltenden Bewegungen führen hingegen zu Säbelwuchs, indessen die Höhe der Krümmung ein Indikator für das Alter der Störung ist. Während Koniferen dazu Druckholz bilden, um den Stamm wieder in eine vertikale Position zu drücken, bilden Laubbäume Zugholz (siehe Kapitel 2.3.3.2).

2.3.3.2 Reaktionsholz

Bäume, die nicht durch mechanische Störungen beeinflusst werden, wachsen aufrecht, das heisst senkrecht zur Gravitationskraft (Chen et al., 1999). Werden Bäume durch einen bewegenden Untergrund oder sonstige mechanische Kräfte gestört, geraten sie aus ihrem Gleichgewicht. Um dieses Ungleichgewicht zu kompensieren, bilden Bäume auf einer Seite des Stammes solange Reaktionsholz, bis sie sich wieder im Gleichgewicht befinden (Gärtner & Heinrich, 2013). Dabei gilt es zwischen Koniferen und Laubböhlzern zu unterscheiden. Koniferen bilden auf der Unterseite des geneigten Stammes Druckholz (Du & Yamamoto, 2007). Nicht nur der Stamm bildet Druckholz, auch die Äste und Wurzeln wirken der Gravitation und mechanischem Stress mit Druckholz entgegen (Gärtner & Heinrich, 2013). Der Grund, warum hauptsächlich Koniferen für die Datierung geomorphologischer Ereignisse wie z.B. Rutschungen, Murgänge und Lawinen verwendet werden, ist, dass das Druckholz makroskopisch gut erkennbar ist. Die gelben bis rotbraunen Farbtöne sind in den eher breiten Jahrringen der Druckholzbereiche dominant (Shroder, 1980). Weitere Eigenschaften sind nur mikroskopisch erkennbar. So sind zwischen den Zellen Freiräume erkennbar (Interzellularräume) und die Tracheiden sind rund und dickwandig (Timell, 1986). Druckholzzellen besitzen einen erhöhten Lignin Anteil, welcher die Zellwände anschwellen lässt und somit Druck aufbaut, um der Schrägstellung entgegen zu wirken. Dies führt zur Krümmung des Stammes (Timell, 1986a).



Abb. 9 Stammscheibe einer Konifere mit deutlicher Druckholzbildung (Gärtner & Heinrich, 2013: 98).

Laubbäume hingegen bilden Zugholz auf Oberseite des geneigten Stammes, um sich nach einer Schrägstellung wieder in die vertikale Position zu bringen. Ähnlich einer Feder bildet der Baum eine Zugkraft aus, um sich aufzurichten (Bamber, 2001). Da Zugholz nur mit aufwändigen Analysen mikroskopisch erkennbar ist, hat es in der Dendrogeomorphologie eine kleinere Bedeutung für die Datierung spezifischer Ereignisse. Die Variation der Ausprägung des Zugholzes ist sehr gross. Einerseits ist sie abhängig von der Baumart, andererseits von der Dauer der Belastung sowie auch den klimatischen Bedingungen (Wardrop, 1964).

Charakteristisch ist die G-Schicht, die direkt an der sekundären Zellwand der Faserzelle haftet und teilweise das gesamte Lumen ausfüllt (Coutand et al., 2004). Erkennen kann man diese gelatinöse Schicht, in dem man sie mit Astrablau und Safranin einfärbt. Dabei färben sich lignifizierte Zellwände rot, nicht lignifizierte Zellwände dagegen blau. Normalerweise sind die Zellen stark lignifiziert. Sind jedoch Zugholzzellen vorhanden, sind sie mit gelatinösen, gummiartigen Fasern gefüllt, welche eine Zugbelastung ausüben, um den Baum aufzurichten (Heinrich & Gärtner, 2013).

Die Bildung von Reaktionsholz geschieht unmittelbar nach der äusserlichen Einwirkung und ermöglicht somit intraannuelle Datierungen (Gärtner & Heinrich, 2013). Wird der Baum nach dem Ende der Vegetationsperiode beeinflusst, tritt das Reaktionsholz frühestens zu Beginn der nächsten Vegetationsperiode im Frühjahr auf (Hupp et al., 1987). Eine plötzliche oder starke Schrägstellung kann zu einem Wachstumseinbruch führen (Stoffel & Bollschweiler, 2008).

2.3.3.3 Exzentrizität

Exzentrizität ist die Tendenz eines einzelnen Baumes auf einer Seite des Stammes breitere Ringe zu bilden als auf der anderen. Dies geschieht wenn die Wachstumsintensität im Stamm ungleich verteilt ist (Wistuba et al., 2013).

Exzentrisches Wachstum ist oft in schräggestellten Bäumen zu beobachten und hängt in den meisten Fällen mit der Bildung von Reaktionsholz zusammen. Das ist auf die mechanische Beanspruchung des Baumes durch die Schrägstellung zurückzuführen. Bei Koniferen führt das verstärkte Wachstum auf der komprimierten Seite zur Verminderung der einseitigen Belastung, um ein Auseinanderbrechen des Stammes zu verhindern (Timell, 1986). Neben den bekannten geomorphologischen Prozessen, die zu einer Schrägstellung des Baumes führen können, kann auch Wind exzentrisches Wachstum fördern. Weht der Wind konstant aus einer Richtung wird einerseits die Baumkrone beansprucht und andererseits bildet der Stamm breitere Jahrringe auf der windabgewandten Seite (Schweingruber, 1993).

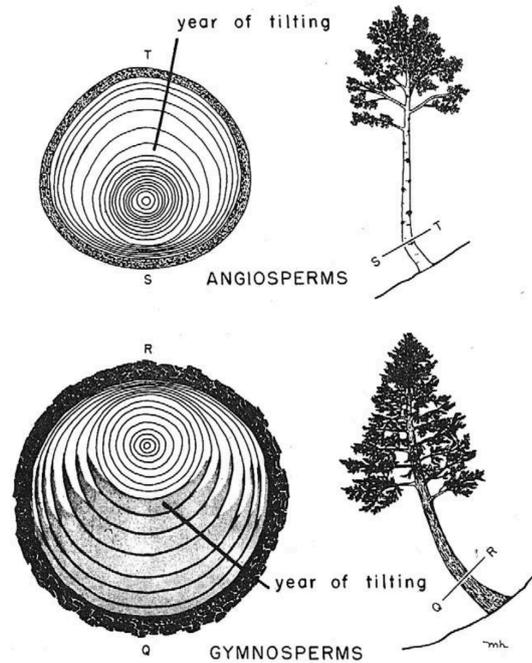


Abb. 10 Ereignisdatierung der Schrägstellung anhand einsetzender Exzentrizität (Fritts, 1976: 220).

Ereignisdatierungen mit Hilfe von Exzentrizitätsindices wird in der Praxis eher selten angewandt. Es ist in der Dendrogeomorphologie üblich, die Untersuchungen mit der Analyse von Reaktionsholz zu kombinieren. Zu den wichtigsten Indices gehören unter anderem die Forschungen von Alestalo (1971), Braam et al. (1987a, 1987b), Schweingruber (1996) und Rozas (2003).

2.3.3.4 Wachstumseinbruch

Die plötzliche Reduktion der Jahrringbreiten kann durch verschiedene ökologische Ursachen hervorgerufen werden. Extreme klimatische Ereignisse und Schädlinge können Gründe dafür sein (Schweingruber, 2007; Vanoni et al., 2016). Die Entlaubung des Baumes durch z.B. Schädlingsbefall kann zu einem Wachstumseinbruch führen (Gärtner et al., 2003). Geomorphologische Prozesse sind ebenfalls oft für Wachstumseinbrüche verantwortlich. Wird ein Baumstamm durch Ablagerungen zugeschüttet, führt dies zur Abnahme der Wurzelaktivität wegen der großen Auflast des Gerölls (Kogelnig-Mayer et al., 2013). Treten jedoch plötzlich breite Jahrringe auf, ohne dass sich das Klima verändert hat, ist es möglich, dass der Baum durch das Absterben benachbarter Bäume einen Wachstumsschub erhalten hat (Gärtner et al., 2003).

2.4 Die untersuchten Baumarten

2.4.1 *Fagus sylvatica* L. – Buche

Die Buche – auch Rotbuche genannt – ist ein Baum mit dicht verzweigter und belaubter Krone, der eine Höhe von maximal 45m erreichen kann. In den ersten zwei Jahren bildet die Buche eine kräftige Pfahlwurzel, die vertikal in den Boden wächst. Anschliessend bildet sich durch die Entwicklung der Seitenwurzeln ein Herzwurzelsystem mit einer hohen Feinwurzeldichte. Die charakteristische silbergraue Rinde bleibt bis ins hohe Alter glatt und bildet keine Borke (ETH Zürich, 1995). Die Buche ist eine europäische Pflanze und ist mit einem Gesamtanteil von 24% die häufigste Baumart in der kollinen bis unteren montanen Stufe im Mittelland. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde sie vielerorts durch Nadelbaumarten, vor allem von der Fichte, verdrängt. In niederschlagsarmen Alpentälern mit kontinentalem Klima ist die Buche wetterbedingt nicht zu finden. Sie sind in einer Höhe von bis zu 1300 m.ü.M. zu finden und meiden vernässte Böden (LFI, 2017a). Mit ca. 750mm Jahresniederschlag benötigen sie jedoch viel und vor allem gut verteilten Niederschlag (ETH Zürich, 1995).

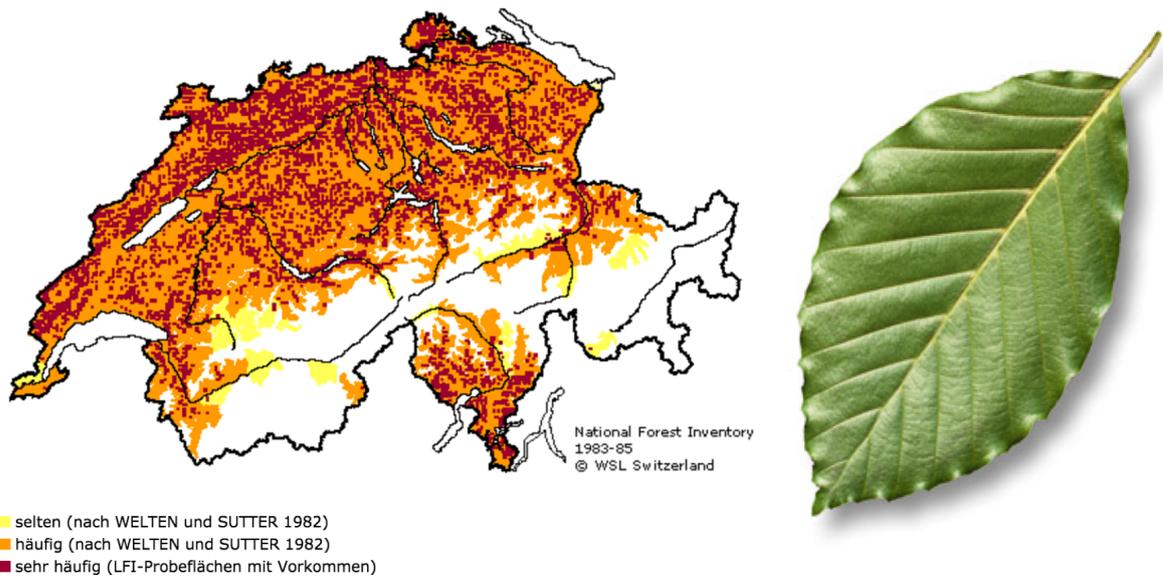


Abb. 12 Verbreitung der Buche in der Schweiz (LFI, 2017a).

2.4.2 *Abies alba* Mill. - Weisstanne

Die Weisstanne ist ein immergrüner Baum mit sehr regelmässig verzweigten Ästen und einem durchgehenden Stamm. Die Äste wachsen hauptsächlich horizontal aus dem Stamm. Sie kann eine Höhe von 65m und einen Stammdurchmesser von ca. 2m erreichen. Junge Tannen wachsen bei guten Lichtverhältnissen sehr schnell, mit dem Alter nimmt das Höhenwachstum allerdings ab. Die Rinde ist in den jungen Jahren hellgrau und hat kleine Harzblasen. Ab einem Alter von ca. 40 Jahren bildet sich eine weisse bis dunkelgraue Schuppenborke mit Querrissen. Die innere Rinde ist rotbraun gefärbt. Die Wurzeln reichen tief in den Boden, sind jedoch schwach verzweigt. In der Jugend entsteht eine Pfahlwurzel mit langsamem Tiefenwachstum, welches sich später zu einem Herzwurzelsystem mit tiefgehenden Senkern entwickelt (Bucher & Sieber, 2000). Die Weisstanne ist ein wärmeliebender und frostempfindlicher Baum. Sie bevorzugt einen Standort mit guter Wasserversorgung und ist hauptsächlich in den Voralpen, dem zentralen Mittelland und dem westlichen Jura in einer Höhe von 600 bis 1200 m.ü.M. zu Hause. Wie die Buche wächst auch die Tanne auf der Alpensüdseite in grössere Höhen als am Nordhang (LFI, 2017b).

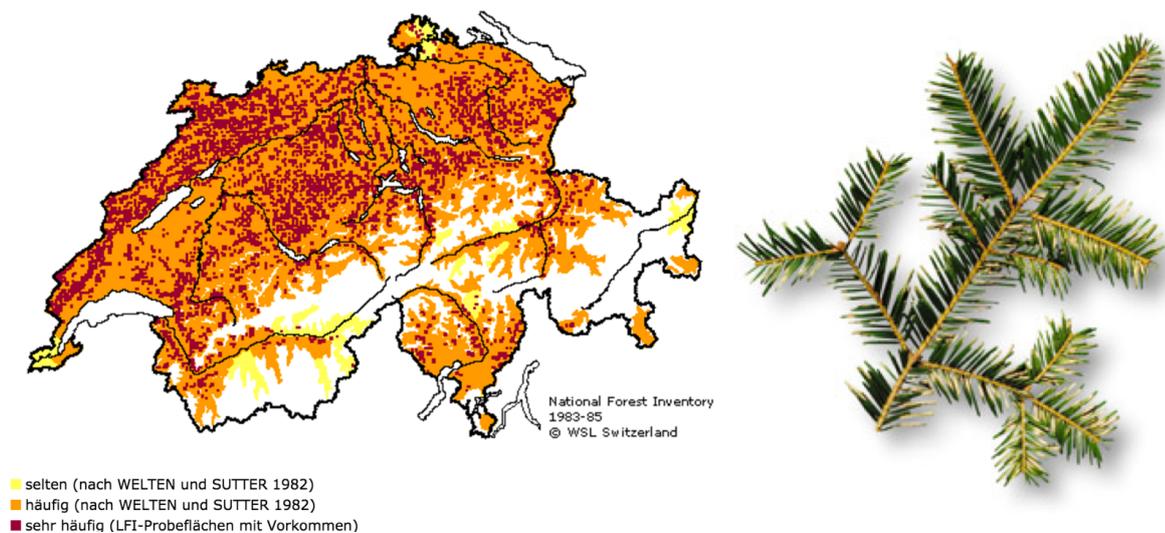


Abb. 13 Verbreitung der Weisstanne in der Schweiz (LFI, 2017b).

3. Das Untersuchungsgebiet

3.1 Geographische Lage

Die Gemeinde Horw liegt am Hangfuss des Pilatus im Kanton Luzern auf einer durchschnittlichen Höhe von 440 m.ü.M. Im Norden grenzt die Gemeinde an die Stadt Luzern, westlich liegt die Agglomeration Kriens. Im Süden befindet sich Hergiswil, welches sich bereits im Kanton Nidwalden befindet und östlich wird Horw durch den Vierwaldstättersee begrenzt. Die Gemeinde umfasst inklusiv der Seefläche rund 20.4 Quadratkilometer und hat aktuell 13'000 Einwohner (Gemeinde Horw, 2017).

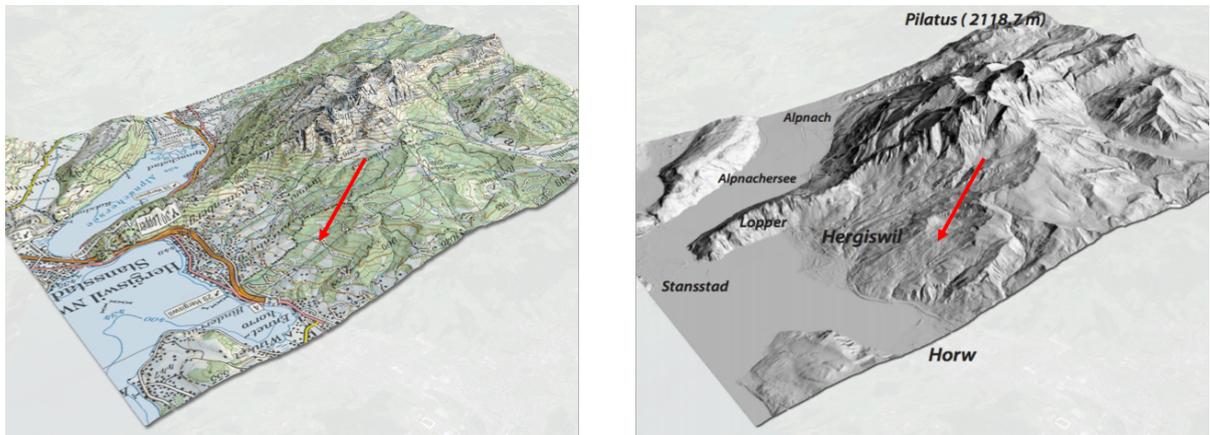


Abb. 14 Übersichtskarte der Gemeinde Horw und Hergiswil. Das Untersuchungsgebiet ist mit dem roten Pfeil gekennzeichnet (Grundlage: Kartenportal map.geo.admin.ch, ©swisstopo; Geländemodell: Google Earth; Grafik: Max Maisch, 2015).

Das Untersuchungsgebiet Bruust (=Bruch) / Haltiwald (=Halde, Schutt) liegt am westlichen Pilatushang. Der tiefste Punkt des Untersuchungsgebiets liegt auf ca. 670 m.ü.M., der höchste auf ca. 800 m.ü.M. Das Hanggefälle zwischen Anrissgebiet und dem unteren Ende des Untersuchungsgebiets beträgt durchschnittlich 31% (17°). In der Nähe des Untersuchungsgebietes befinden sich vereinzelte Wohn- und Landwirtschaftsgebäude, Wasser- und Abwasserleitungen sowie die Schwendelbergstrasse und mehrere kleine Forstrassen bzw. Wanderwege. Strom- und Telefonleitungen verlaufen direkt durch das Untersuchungsgebiet. Am Hangfuss befinden sich wichtige Verkehrswege (N2, Bahnlinie und Kantonsstrasse) und eine zwei- und dreigeschossige Wohn- und Bauzone auf Hergiswiler Gemeindegebiet (Louis, 1999).

3.2 Geologie

Der Pilatus befindet sich am geologischen Alpenrand und erstreckt sich quer durch den Vierwaldstättersee. Die Gesteine des Pilatus stammen aus der Kreide (Schrattenkalk) und dem Tertiär (Flysch), die sich vor über 145 Millionen Jahren in einem Meer zwischen Aare- und Gotthardmassiv bildeten (Louis, 1999). Deshalb spricht man auch von mächtigen Kalkschuppen, die den Berg aufbauen. Nach der Alpenfaltung, welche vor ca. 100 Millionen Jahren begann und rund 70 Millionen Jahre dauerte, sorgten die ersten Flüsse für grosse Geschiebeablagerungen, bevor die alpinen Berge, wie sie heute die Landschaft prägen, sich auf türmten. Im Norden liegt der Pilatus auf dem subalpinen Flysch, welcher zuvor die subalpine Molasse überfuhr. Der Pilatus gehört inkl. Bürgenstock und Rigi zur helvetischen Randkette und definiert die Front der Drusbergschichten, die ebenfalls zum helvetischen Deckensystem gehören (Erdwissen, 2016). Das Untersuchungsgebiet Bruust/Haltiwald liegt zwei Kilometer nördlich der Alpenhauptüberschiebung. Laut Louis (1999) sind weitere noch nicht bekannte Störungen und Brüche im Gebiet vorhanden.

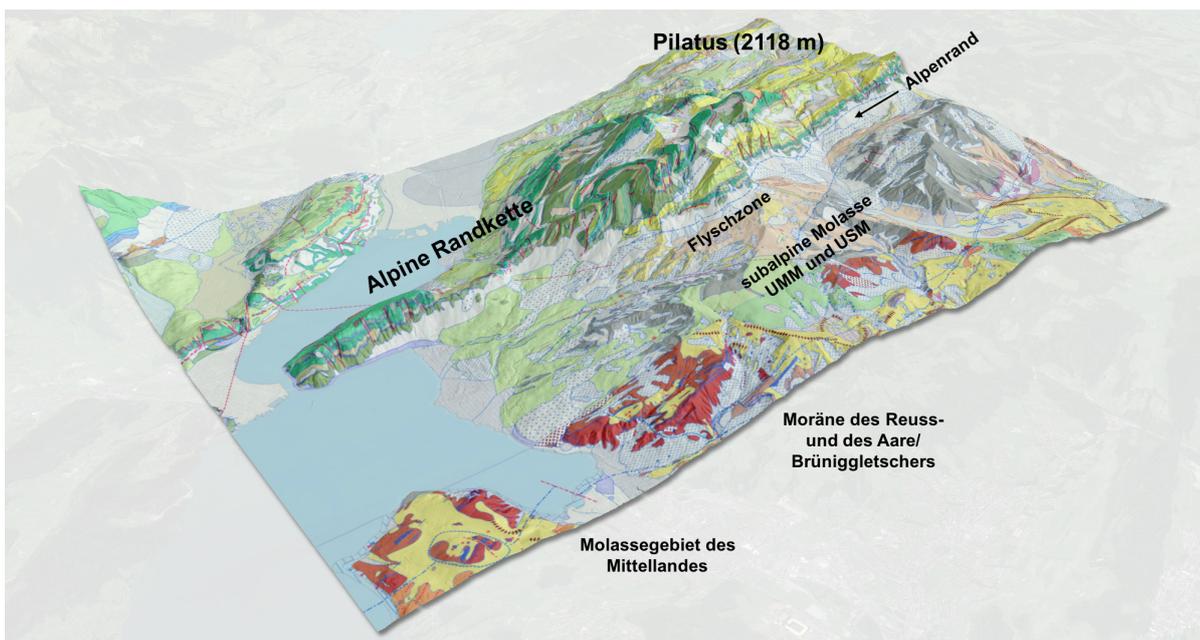


Abb. 15 Geologische Karte vom Pilatus und Umgebung (Grundlage: Kartenportal map.geo.admin.ch, ©swisstopo; Geländemodell: Google Earth; Grafik: Max Maisch, 2015).

Die Festgesteine im Untersuchungsgebiet werden aus über 1000m mächtigen Mergel-, Sandstein- und Nagelfluhabfolgen der unteren Süßwassermolasse aufgebaut (Louis, 1999). Die Schichtflächen fallen mit 30-45° nach SSW ein und sind normal gelagert. Im unteren Teil dominieren Mergel und Mergelsandsteine; in höheren Lagen die Kalksandstein- und Nagelfluhbänke (Louis, 1999).

Die Lockergesteine im Gebiet sind wie folgt aufgebaut:

Tiefe	Material
-1.7m	Künstliche Aufschüttung
-6.0 m	Gehängeschutt (Hergiswiler Material)
-6.7 m	Ehemalige Terrainoberfläche
-12.7 m	Gehängeschutt (Hergiswiler Material)
-20.4 m	Gehängeschutt mit Moräne; bei -17.1 m Reste eines Fossilen Bodens
-22.7 m	Verlandeter Tümpel (ehemalige Terrainoberfläche)
-37.8 m	Moräne mit Grundmoräne vermischt
-45.1 m	Grundmoräne
-47.5 m	Glaziofluviale Ablagerungen
-51.1 m	Grundmoräne
-52.8 m	Stark verwitterter Mergel
-64.5 m	Mergel (USM)

Tab. 5 Aufbau der Lockergesteine im Untersuchungsgebiet (Louis, 1999).

3.2.1 Bachschutt

Entlang der heutigen und ehemaligen Bachläufe ist Bachschutt abgelagert worden. Zusammengesetzt ist er aus einem variablen Kies-, Stein- und Blockanteil mit feinkörniger Matrix. Für die Lagerungsdichte und Durchlässigkeit kann kein uniformer Wert angenommen werden, da die Grenzen sehr undeutlich sind (Louis, 1999).

3.2.2 Gehängelehm

Ein ca. 2m mächtiger, stark toniger Silt ist im Gebiet zu finden. Wegen der geringen Durchlässigkeit dieser Deckschicht erzeugt er in darunterliegenden Schichten gespannte Wasserverhältnisse (Louis, 1999).

3.2.3 Gehängeschutt „Hergiswiler Material“

Gravitative Umlagerungen der eiszeitlichen Ablagerungen sorgten für eine bis zu 35m mächtige Schicht aus Gehängeschutt. Periglaziale Solifluktion, Rutschungen und Wildbachprozesse sorgten für diese Umlagerung. Zusammengesetzt ist der Schutt hauptsächlich aus tonigem Silt mit grossem Kiesanteil. Die fossilen Böden, welche in Zeiten relativ morphologischer Ruhe entstanden, sind oft eingeknetete Bestandteile in grösseren Rutschpaketen (Louis, 1999).

3.2.4 Grundmoräne/ Moräne/ Glaziofluviale Ablagerungen

Am Hangfuss wurden Teile des Brüniglappen des Aaregletschers gefunden. Durch die glaziale Vorbelastung des Materials (Sand-, Kies- und Steinanteile) ist die Wasserdurchlässigkeit äusserst gering. Darüber sind glaziofluviale Ablagerungen aus schwach siltigen Kiessanden zu finden, die vor dem Gletscher oder an Randgebieten abgelagert wurden (Louis, 1999).

3.2.5 Verwitterungszone der Felsoberfläche

Ein potentieller Gleithorizont ist der glazial aufgearbeitete Felsverwitterungsschutt sowie die verlehnten Felsverwitterungszone, die über den unverwitterten Felsoberflächen liegen (Louis, 1999).

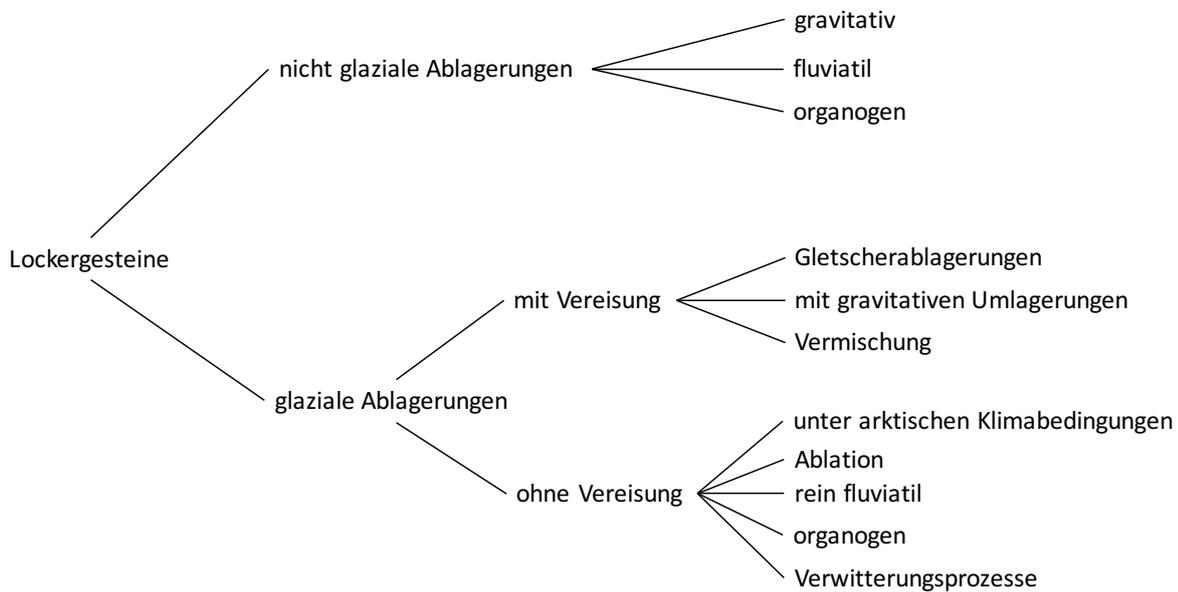


Abb. 16 Die Gliederung und Entstehung der Lockergesteine (Nach: Louis, 1999: 10).

3.3 Hydrologie

Die schlecht wasserdurchlässigen ton- und siltreichen Lockergesteine sind für den grossen Oberflächenabfluss des Meteorwassers verantwortlich. In willkürlich verteilten Horizonten und Schichtgrenzen bewegt sich das Hangwasser. Das unregelmässige Abfliessen der Quellen versumpft die Umgebung stark, da die Drainagen nur schmale Einzugsgebiete erfassen. Davon betroffen sind vor allem flachere Hangflanken und Senken (Louis, 1999).

3.4 Klima und Vegetation

Die jährliche Jahresniederschlagsmenge der Gemeinde Horw beträgt 1113mm bei einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9.4 °C (Abb. 17). Der Jahresniederschlag in der Pilatus-Gipfelregion beträgt ca. 1800mm und im Untersuchungsgebiet ca. 1250mm. Die Gemeinden befinden sich im voralpinen Starkregenstreifen. Nach Köppen und Geigers Klima-Klassifikation befindet sich die Region in einem Cfb Klima, dem häufigsten Klimatyp in Mittel- und Westeuropa. Mit rund 64mm Niederschlag ist der Dezember der Niederschlagsärmste Monat. Der niederschlagsreichste Monat ist der Juni mit 143mm (Climate-Data, 2017).

Waldmeister-Buchenwälder dominieren bis auf 650 m.ü.M. Anschliessend überwiegen die Waldhirschen-Buchenwälder, die bis 950 m.ü.M. reichen. Oberhalb dieser Vegetationsstufe folgen Tannen-Buchenwälder, die bis über 1100 m.ü.M. reichen. Auf dieser Höhe sind auch Ahorn-Eschenwälder und Eiben-Steilhang-Buchenwälder vertreten (Louis, 1999).

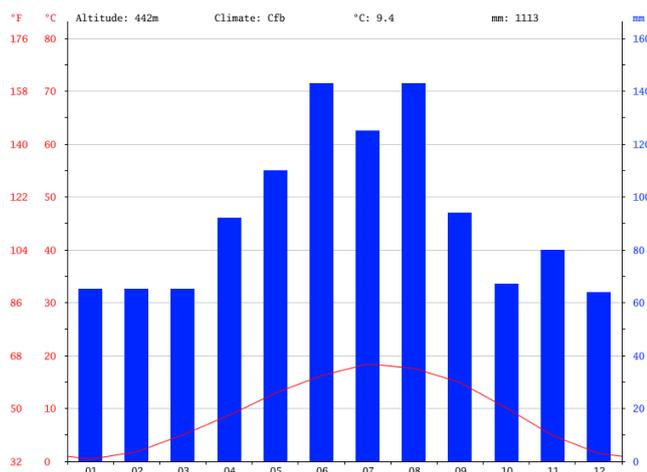


Abb. 17 Klimadiagramm von Horw (Climate-Data, 2017).

3.5 Rutschung und Bekannte Ereignisse

Verrutschte Moränenpakete auf deutlich ausgebildeten Gleithorizonten in 6, 17, 22, 29 und 38m Tiefe, deren Alter anhand fossiler Böden datiert wurden, beweisen die Überschüttung des Hangfusses durch mindestens drei Grossrutschungen in den letzten 4000 Jahren. Exakt dokumentierte, historische Rutschereignisse vor Mitte dieses Jahrhunderts gibt es jedoch nicht (Louis, 1999).

Mengis & Schmidt (1975) stellen fest, dass seit dem Bau der N2 am Fuss des Haltiwaldes Rutschungen mit einer Länge von 300m und einer Breite von 120m stattfanden. Kombiniert man diese Erkenntnisse mit den Kartierungen von Kopp (1961) ist erkennbar, dass sich die Grösse der Rutschung seit der Kartierung (1961) beinahe verdoppelt hat. Mengis & Schmidt schliessen daher auf eine Reaktivierung einer alten Gleitfläche in 9m Tiefe durch den 12m hohen Autobahnanschnitt (Louis, 1999). Auch die CKW-Leitungsmasten, welche auf einem tiefgründigen Rutschhang stehen, rutschen jährlich weiter ab. Zwischen 1930-1979 bewegten sich die Masten um 3.1 m, mit einer Kippbewegung talabwärts. 1981 wurden die Masten durch neue, tiefer fundierte Masten ersetzt. Eine Beschleunigung der Bewegungen ist von 1989-1997 erkennbar, wobei die Geschwindigkeit durchschnittlich 9.9 cm/Jahr betrug. Dabei verringerte sich auch die Höhe der Masten um bis zu 30 cm (Louis, 1999).

Auf grossem Massstab betrachtet ist der ganze Hang zwischen Roteflue und Vierwaldstättersee eine grosse, tiefgründige Rotationsrutschung mit einer Fläche von 1.2km². Im mittleren Abschnitt, in welchem sich das Untersuchungsgebiet befindet, beult sich die Masse leicht auf und es kommt zu Wasseransammlungen. Die Grösse der Rutschung Bruust/Haltiwald beträgt 8 ha. Die Anrisskante ist 10m hoch und 140m lang und besteht aus siltig-steinig-blockigem Lockermaterial. Nach Louis (1999) befindet sich der Gleithorizont, welcher wahrscheinlich durch eine verlehnte Mergeloberfläche gebildet wurde, in einer durchschnittlichen Tiefe von 10 bis 15m. Multipliziert mit der Fläche ergibt dies eine Kubatur von rund 900'000m³. Die Seitenränder der Rutschung sind am Nordrand klar begrenzt, südlich sind sie hingegen etwas diffuser ausgebildet. Die Rutschgeschwindigkeit beträgt durchschnittlich 10 cm/Jahr (Louis, 1999).

Die Rutschfront der Rotflue-Rutschung stösst dabei bis in den See vor. Mehrere grosse Rutschungen erreichten in den letzten 4000 Jahren den Hangfuss, wodurch eine bis zu 38m mächtige Gehängeschuttdecke entstand. Die Gesamtkubatur der grossen Rutschung Bruust/Haltiwald beträgt über 15 Mio m³ (Louis, 1999).

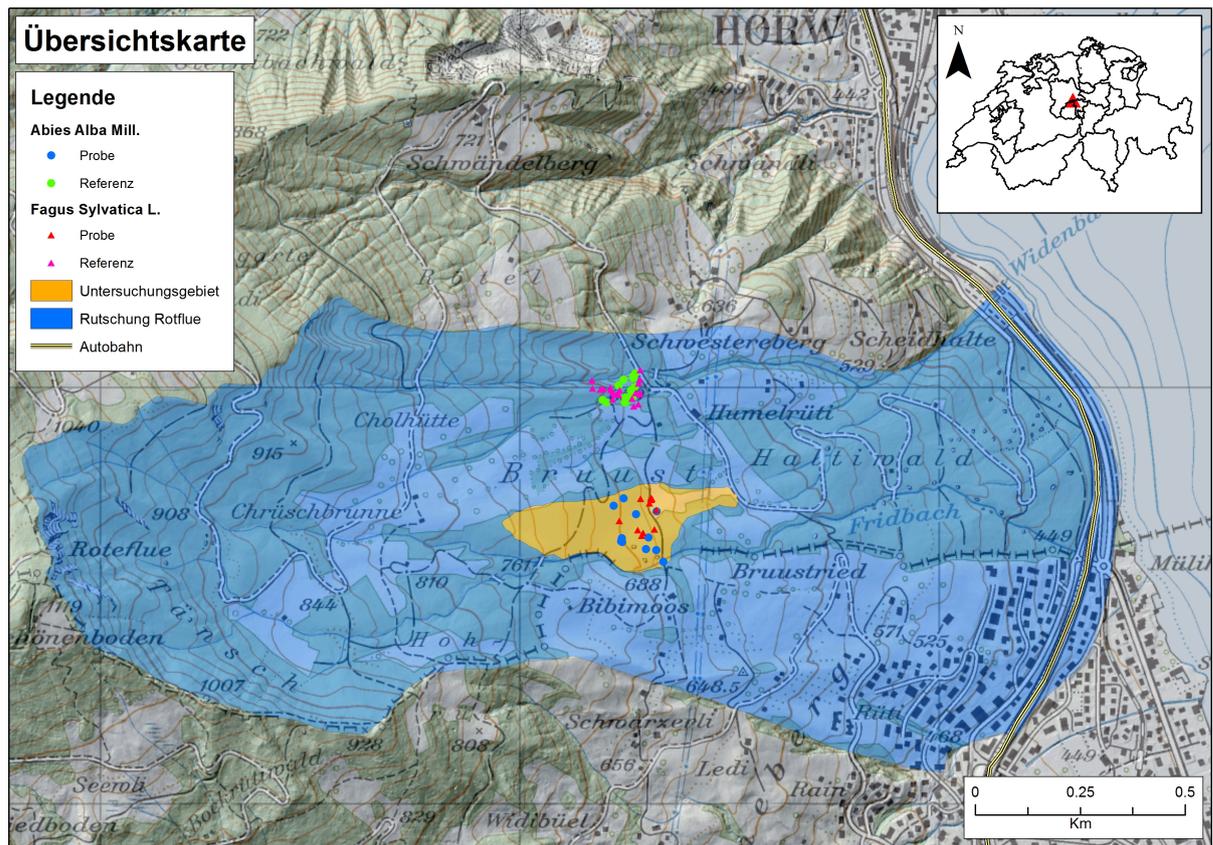


Abb. 18 Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes „Bruust-Haltwiwald“ welches in der alten, Nach-Eiszeitlichen Rutschung „Rotflue“ liegt (Hintergrund: hillshade SwissALTI^{3D}, Landeskarte LK25, ©Swisstopo 2017).

4. Methoden

Im zweiten Kapitel wird das Vorgehen beschrieben und die für die Arbeit wichtigen Methoden näher erläutert. Die angewandten Methoden dienen der Erarbeitung der Grundlagen dieser Arbeit.

4.1 Feldarbeit

Die Feldarbeit ist die Grundlage der Arbeit. Die Arbeiten wurden im Dezember 2016 am Schwen- delberg im Gebiet Bruust-Haltiwald in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Phase wurde das Gelände kartographisch erfasst und skizziert. Danach wurden die Standorte für die Probeentnah- men festgelegt und die Proben gebohrt.

4.1.1 Begehung und Kartierung

Um einen fundierten Überblick über die Rutschung Bruust-Haltiwald und die Zusammenhänge der geomorphologischen Formen zu erhalten, ist die Kartierung im Gelände von entscheidender Bedeutung. Sie dient als Grundlage für die spätere Prozessanalyse und hilft, die Bewegungsab- läufe der Rutschung sowie die Orientierung der schräggestellten Bäume besser zu verstehen. Zu- erst wurde das Gebiet auf der Meso-Skala (100 bis 10000m) betrachtet und es wurden Informa- tionen über Geologie und Klima gesammelt. Danach wurde das Untersuchungsgebiet definiert und das Relief genau untersucht und kartiert (Gärtner et al., 2004).

In einer ersten Phase wurde eine Geländebegehung durchgeführt, Fotografien gemacht und mar- kante Punkte im Gelände vermessen. Wichtig war es dabei, die entdeckten Formen und Struktu- ren aus der Nähe sowie aus der Ferne zu betrachten. Nur so sind die Zusammenhänge erkennbar. Ebenfalls wichtig für die Interpretation der Formen ist der Blickwinkel. Beobachtungen wurden skizziert und die relative Lage der Punkte zueinander festgehalten. In einer zweiten Phase wur- den die Punkte mit einem GPS eingemessen. Dafür wurde ein Garmin eTrex Vista verwendet, mit welchem Positionspunkte schnell und mit einer Genauigkeit von $\pm 2\text{m}$ (abhängig von der Anzahl Messungen und Bedeckung durch Bäume des Standorts) gemessen werden konnten. Die Punkte wurden anschliessend kartiert und so die Ausdehnung der Rutschung skizziert. Die Kartierung des Untersuchungsgebiets erfolgte auf einer Länge von ca. 400m und einer Breite von ca. 200m im Massstab von 1:1'500. Dabei wurden die Anrisskante, Scherrisse, Risse, Stauchwülste, Distan- zen, Änderungen des Gefälles und Steilhänge auf der Karte eingetragen. Wichtige, auf der Rut- schung liegende Punkte wurden danach mit der absoluten Distanz zu einander kartiert. Um Dis- tanzen und Entfernungen zwischen den Punkten im Feld zu messen, wurde der Baumhöhenmes- ser Vertex IV-GS von Haglöf verwendet.

Die ist ein Ultraschallmessgerät, mit welchem Distanz-, Höhen- und Neigungsmessungen durchgeführt werden können. Die Distanzauflösung dieses Geräts ist mit 0.01cm äusserst präzise. Markante Neigungsänderungen und die Deklination wurden mit einem geologischen Kompass gemessen. Alle gesammelten Daten wurden anschliessend mit ArcMap 10.4.1 dargestellt, um eine masstabsgetreue geomorphologische Karte zu produzieren.

4.1.2 Abgrenzung des Untersuchungsstandorts

Das Untersuchungsgebiet wurde einerseits durch die Analyse des digitalen Höhenmodells und andererseits durch die Festlegung der Ausdehnung während den Begehungen bestimmt. Nördlich ist das Untersuchungsgebiet durch den markanten und scharfen Rand der Rutschung, der beinahe auf einer Linie verläuft, abgegrenzt. Der Wanderweg, welcher von der Schwendelbergstrasse südlich abzweigt, bildet die östliche und damit die untere Grenze der Rutschung. Diese Grenze wurde bewusst durch den Wanderweg gewählt, weil unterhalb des Weges die Auswirkungen der Rutschung auf die darauf stehenden Bäume nicht mehr deutlich sichtbar sind. Ebenfalls die geplante Aufforstung des unterhalb liegenden Teils hat diese Entscheidung mit beeinflusst. Die südliche, orographisch rechte Abgrenzung verläuft entlang dem Friedbach bis zur Anrisskante. Die 6-10m hohe Anrisskante und somit der oberste Punkt der Rutschung bildet die Begrenzung im Osten des Untersuchungsgebiets.

4.1.3 Selektion der Bäume und Probenentnahme

Nach einer groben Inventur der im Gebiet vorkommenden Baumarten erwiesen sich *Abies alba* Mill. und *Fagus sylvatica* L. am geeignetsten für die Untersuchung. Wie im Kapitel 3.4 beschrieben, handelt es sich bei dieser Höhenstufe um einen Waldhirschen-Buchenwald. Die zwei Baumarten sind auf der gesamten Rutschung dominant und widerspiegeln den Baumbestand des Gebietes am repräsentativsten. Die Auswahl der beprobten Bäume erfolgte nach den folgenden Kriterien:

- *Abies alba* oder *Fagus sylvatica*
- Deutliche Beeinflussung durch Rutschungsaktivitäten (z.B. Schrägstellung oder Säbelwuchs)
- Keine Beeinflussung des Stamms durch Steinschlag (Stoffel & Bollschweiler, 2008)

Es wurden nur Bäume auf der unteren Hälfte der Rutschung gewählt. Einerseits ist die Zugänglichkeit des oberen Teils der Rutschung erschwert; andererseits ist die Dichte der zur Verfügung stehenden Bäume im oberen Teil sehr limitiert. Es wurden Bäume über die gesamte Breite der Rutschung beprobt, um allfällige Bewegungscharakteristiken zu erkennen.

Da die Bäume nicht gefällt werden durften und das Entnehmen von Stammscheiben sicherheitstechnisch schwierig gewesen wäre, wurden Bohrkern von 5mm Durchmesser mit einem schwedischen Zuwachsbohrer, dem «Mora-Coratex» der Marke Haglöf, entnommen. Die Beprobung wurde nach den vorgegebenen Standards, wie sie in Gärtner et al., (2004) und Stoffel & Bollschweiler (2008) beschrieben werden, durchgeführt. Je nach Art der Störung kann sich die Beprobung mit einem Zuwachsbohrer ändern. Von allen Bäumen mussten mindestens zwei Proben genommen werden (Cook & Kairiukstis, 1990). Die Beprobungen wurden parallel zur Falllinie gemacht, wobei pro Baum jeweils ein Kern auf der Stammoberseite und einer auf der Stammunterseite entnommen wurde. Bei deutlich erkennbarem Säbelwuchs wurde wenn möglich darauf geachtet, den Bohrer im Bereich der stärksten Krümmung anzusetzen. Wichtig bei der Probeentnahme war es, den Bohrer senkrecht zum Stamm zu stellen, sodass der Bohrkopf scharf genug war.

Insgesamt wurden pro Baumart 11 Bäume auf der Rutschung mit jeweils zwei Bohrungen beprobt, was ein Total von 44 Bohrkernen ergibt.

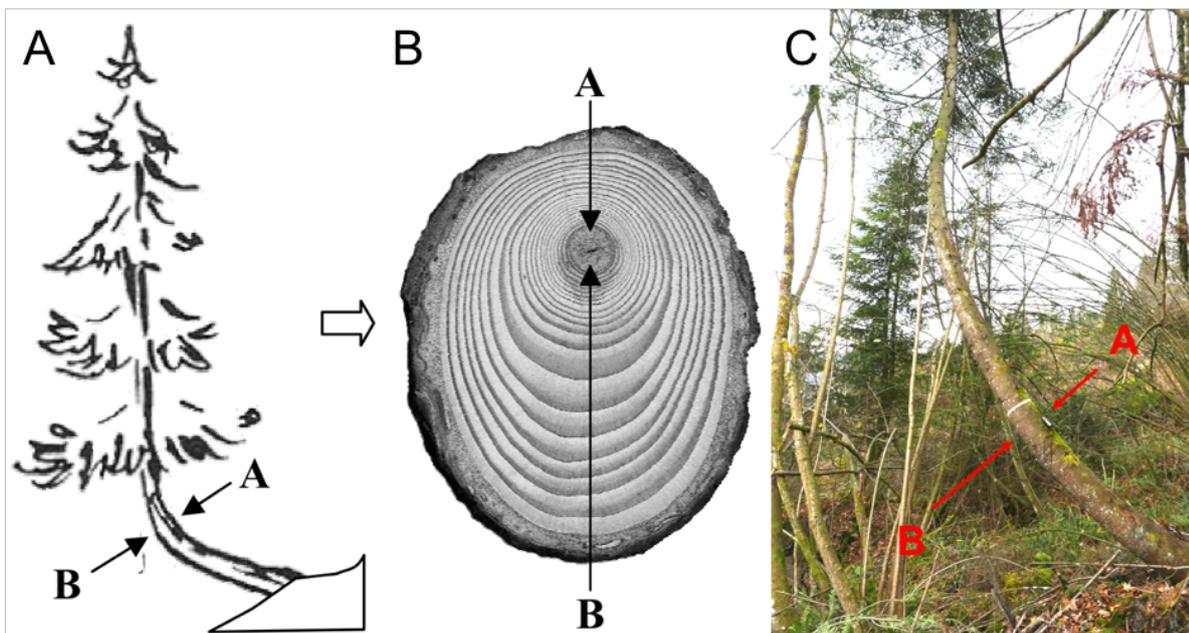


Abb. 19 (A & B) Die Beprobung eines schräggestellten Baumes erfolgt im Bereich der stärksten Krümmung (Gärtner et al., 2004: 202). (C) Beispiel der Beprobung des Baumes WT07.

Neben den gewählten zwei Baumarten befinden sich auch Lärchen (*Larix decidua* Mill.), Fichten (*Picea abies* Karst.) und Eschen (*Fraxinus excelsior* L.) im Untersuchungsgebiet, allerdings in geringerer Anzahl.

4.1.4 Selektion der Referenzstandorte

Der Referenzstandort darf nicht von den geomorphologischen Prozessen und Störungen des Gebietes beeinflusst sein. Die Referenzstandorte müssen jedoch auch dieselben klimatischen Umweltbedingungen widerspiegeln wie das Untersuchungsgebiet. Da es sich bei der Region um ein sehr dynamisches Gebiet handelt, wurde ein Referenzstandort gewählt, der optisch keinerlei Aktivitäten aufweist. Ein stabiles, geeignetes Gelände in der direkten Umgebung wurde nördlich der Rutschung gefunden und ausgewählt. Für die Referenzchronologie wurden Bäume selektiert, die optisch keinerlei Anzeichen auf eine Störung zeigen und ein möglichst hohes Alter erreicht haben. Um eventuelle Störungen und Wachstumsanomalien durch Hangbewegungen auszuschliessen, wurde der Zuwachsbohrer auf Brusthöhe (ca. 1.3 m) parallel zum Hang angesetzt. Pro Baum wurden jeweils zwei gegenüberliegende Bohrkerne entnommen (Gärtner et al., 2004). Für die Referenzchronologie wurden pro Baumart 20 Bäume beprobt, was ein Total von 80 Kernen für die Referenzchronologie ergibt. Die Anzahl Bäume, die für eine Referenzchronologie verwendet werden soll, variiert in der Literatur stark. Nach Schweingruber (1996) liegt der Standard bei mindestens 15 Bäumen.



Abb. 20 Probeentnahme mit dem Haglöf-Zuwachsbohrer.

4.1.5 Kodierung der Proben

Für die Proben der Referenz und diejenigen auf der Rutschung wurde jeweils eine unterschiedliche Kodierung verwendet. Die auf der Rutschung stehenden Buchen wurden mit der Abkürzung Bu am Anfang mit anschliessender Nummerierung von 1-11 betitelt. Dahinter wurde die Bezeichnung mit einem a oder i ergänzt. Das a steht für die konkave Seite des Baumes, während das i für die Innenseite der Krümmung steht. Für die Buche Nr. 3 mit der Probe der konkaven Seite des Stammes heisst es folglich: Bu03a. Dasselbe Prinzip wurde für die Weisstanne verwendet, mit dem Unterschied, dass am Anfang die Abkürzung Wt gewählt wurde.

Die Proben der Referenzchronologie wurden ebenfalls mit Bu und Wt beschriftet, mit dem Unterschied, dass am Anfang noch ein R für Referenz steht. Um die Proben vom selben Baum unterscheiden zu können wurden sie mit r und l am Schluss ergänzt. Dies steht jeweils für die beprobte Seite, orographisch betrachtet.

4.1.6 Darstellung mit ArcMap

Um die von Hand kartierten und Gefundenen Strukturen grafisch dazustellen, wurde das Programm ArcMap verwendet. Als Grundlage der Kartierung diente das digitale Laserscan-Höhenmodell der Schweiz „SwissALTI3D“ (DHM) mit einer räumlichen Auflösung von 2m aus dem Jahr 2015. Zusätzlich wurde die Swisstopo „Pixelkarte“ 1:25'000 verwendet, die aus dem Jahr 2007 stammt. Ebenfalls in die Darstellung miteinbezogen wurden die Luftbilder „Swissimage“, das digitale Farbornthophotomosaik der Schweiz, mit einer Auflösung von 0.25m aus dem Jahr 2013.

In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe der von Hand im Gelände erstellten Feldkartierung und dem DHM die Ausdehnung der Rutschung festgelegt und kartiert. Anschliessend wurden die Bäume mit den eingemessenen GPS-Punkten in die Karte übertragen und die Richtung, in welche der jeweilige Baum schräggestellt wurde, eingetragen. Risse und Stauchungswülste wurden mit Hilfe der Kartierung sowie auch des DHM's in der Karte eingezeichnet. Neigungswinkel und Distanzen wurden in der mit ArcMap erstellten Karte nicht eingetragen, da die Karte möglichst übersichtlich bleiben soll. Für diese detaillierten Angaben ist die von Hand gemachte Feldkartierung im Anhang zu konsultieren.

4.2 Probenpräparation

In den folgenden Abschnitten wird erklärt, wie die Proben nach der Entnahme präpariert und bearbeitet wurden. Dabei werden die wichtigsten Schritte des jeweiligen Arbeitsprozesses erläutert.

4.2.1 Trocknung der Proben

Damit die Bohrkerne nicht von Pilzen befallen werden, wurden die Bohrkerne nach der Entnahme direkt in beschriftete Papierröhrchen gesteckt. Diese Röhrchen haben gegenüber den üblichen Plastikköchern den entscheidenden Vorteil, dass Proben nach getaner Feldarbeit nicht wieder ausgepackt und getrocknet werden müssen. Allfällige Feuchtigkeit wird durch das Papier direkt aufgesogen.

4.2.2 Aufkleben der Proben auf einen Holzträger

Die Bohrkerne wurden nach der Feldarbeit in einem ersten Schritt auf einen Holzträger mit kaltwasserfestem Holzleim aufgeklebt. Dies vereinfachte die spätere Bearbeitung der Kerne und ermöglichte es, beim Schneiden der Kerne etwas mehr „Spielraum“ zu haben. Wichtig dabei war es, die Faserrichtung senkrecht zum Träger zu stellen. Denn, die Faserrichtung innerhalb eines Baumes ist nicht immer absolut senkrecht und kann unter Umständen sogar spiralig auftreten (Kubler, 1991; Skatter & Kucera, 1997). Zudem kann sich ein Kern durch das Bohren verdrehen, weshalb es anspruchsvoll sein kann, die Faserrichtung an allen Punkten senkrecht zum Träger auszurichten. Bei einigen der untersuchten Proben wurden die Waldkante und das Phloem des Kerns entfernt, um die Faserrichtung eindeutig zu bestimmen. Damit die Jahrringgrenzen besser zu erkennen waren, wurden die Kerne mit unterschiedlichen Korngrößen geschliffen. Der dabei entstandene Schleifstaub wurde durch die Bewegungen in die Zellen gerieben, was dazu führte, dass die Jahrringgrenzen meist besser sichtbar wurden (Schweingruber, 1988). Dabei war darauf zu achten, dass die Proben nicht zu stark auf das Schleifpapier gedrückt wurden, damit die Oberfläche nicht verbrannte.

4.2.3 Schneiden der Proben

Seit der Entwicklung der Bohrkern-Mikrotome an der WSL ist es möglich, Proben zu schneiden. Der entscheidende Vorteil (gegenüber dem Schleifen von Proben) ist dabei die saubere, glatte Oberfläche, die nur durch das Schneiden erzeugt werden kann. Zellen werden nicht mehr wie beim Schleifen mit Staub gefüllt, was jedoch mit Kreide leicht von Hand eingerieben werden kann (Gärtner & Nievergelt, 2010). Weil das Reaktionsholz von Laubhölzern nicht makroskopisch erkennbar ist, war bereits zu Beginn der Arbeit klar, dass die Proben geschnitten werden müssen, um anschliessend holzanatomische Untersuchungen mit den Kernen durchführen zu können. Beim Schneiden musste darauf geachtet werden, dass der Kern jeweils ausreichend befeuchtet wurde, um die Zellwände nicht zu beschädigen. Zuviel Feuchtigkeit jedoch löste den Leim und somit den Halt auf den Holzträgern (Gärtner & Nievergelt, 2010). Um dies zu verhindern, wurde teilweise mit Sekundenkleber nachgeklebt.

4.2.4 Präparation von Dünnschnitten für *Fagus Sylvatica* L.

Die Erstellung und Bearbeitung von Dünnschnitten für eine holzanatomische Untersuchung von den *Fagus sylvatica* Proben war enorm zeitaufwändig. Die Schwierigkeit bestand darin, einen 15-20µm dünnen Schnitt über die gesamte Länge des Kerns zu machen. Da in einem ersten Anlauf die Dünnschnitte generell zu dick waren, um genaue Zellstrukturen erkennen zu können, wurden anschliessend einzelne Ausschnitte, in welchen Reaktionsholz vermutet wurden, bearbeitet. Um einen Dünnschnitt zu erstellen, gibt es nützliche Tricks, die im Folgenden erläutert werden.

Eine detaillierte Anleitung zur Herstellung von Dünnschnitten findet sich in Gärtner und Schweingruber (2013).

Zu Beginn musste sichergestellt werden, dass die Klinge des Bohrkernmikrotoms scharf und unbeschädigt ist. Normalerweise werden herkömmliche NT-Papiermesserklingen verwendet, die günstig in der Anschaffung sind. Für die Bearbeitung der Buchen-Proben wurden die robusten Mikrotom-Klingen verwendet, die regelmässig geschliffen werden mussten. Diese Klinsen sind besonders nützlich bei Holz mit hoher Dichte (Gärtner & Schweingruber, 2013). Um die Zellstruktur durch das Schneiden nicht zu zerstören, wurde eine Maisstärkemischung mit wasserlöslichem Kleber angefertigt (Gärtner et al., 2015). Die sogenannte Mowiol-Mischung ist folgendermassen zuzubereiten:

Für 50ml:

10g Mowiol 4-88 mit 50ml Wasser vermischen. Anschliessend lässt man das Gemisch auf einem Heizrührer erwärmen und auflösen. Dabei ist zu beachten, dass die maximale Löslichkeit von Mowiol bei ca. 26% liegt. Ist das Gemisch frei von Klumpen, wird eine Messerspitze Thymol hinzugefügt. Dies dient als Konservierungsmittel und sorgt dafür, dass das Gemisch frei von Bakterien, Viren und Pilzen bleibt. Zum Schluss wird die Reisstärke dazugegeben, bis eine cremige Masse entsteht.

Das fertige Gemisch wurde auf die glatte Oberfläche des Bohrkerns aufgetragen und getrocknet, anschliessend mit einem gekühlten Tesa-Klebeband abgeklebt. Nun konnte eine ca. 15µm dünne Schicht abgeschnitten werden. Um den Dünnschnitt vom Klebeband auf einen Glasträger zu bringen, wurde er mit viel Wasser eingeweicht – so liess sich der Schnitt leicht auf den Glasträger ziehen. Um den Dünnschnitt vor dem Austrocknen zu schützen, wurde er mit Glycerin getränkt. Die Probe wurde gefärbt, entwässert und eingeschlossen, um sie permanent zu fixieren. Dafür wurde zuerst mit Wasser das zuvor aufgebrachte Glycerin ausgewaschen. Anschliessend wurde die Probe mit Safranin und Astrablau eingefärbt. Dieser Schritt führte zu der markanten Färbung der Proben. Lignifizierte Zellstrukturen wurden dadurch rot, während sich nicht-lignifizierte Strukturen blau verfärbten (Gärtner & Schweingruber, 2013). Folglich waren Zugholzzellen in Laubhölzern bläulich eingefärbt. Nach fünf Minuten wurde die überschüssige Farbe zuerst mit Wasser und anschliessend mit Ethanol (75%, 90% & 96%) ausgewaschen. Anschliessend wurde die Probe mit Xylol abgewaschen. Verfärbte sich die Flüssigkeit milchig, war noch immer Wasser in der Probe vorhanden und das Auswaschen mit Hilfe der Ethanolreihe musste wiederholt werden. Blieb die Flüssigkeit klar, wurde Kanadabalsam aufgetragen und die Probe mit einem dünnen Deckglas verschlossen. Dabei verdünnte sich das vorher verwendete Xylol mit dem Kanadabalsam und verhinderte die Bildung von Luftblasen. Zum Abschluss wurden die Proben im Ofen bei 60° C während mind. 24 Stunden getrocknet.

Total wurden 22 Dünnschnitte erstellt. Da einige jedoch zu dick waren, wurden anschliessend nur die Druckholzbereiche der Proben Bu01a, Bu02a, Bu03a, Bu03i, Bu06i und Bu08i ein zweites Mal geschnitten. Die fertigen Dünnschnitte wurden unter einem Durchlichtmikroskop (Olympus BX 41, 40-400x) mit einer Kamera (Canon EOS 650D) abgelichtet. Die hohe Qualität und Auflösung der Bilder sorgte für äusserst grosse Dateien, weshalb aus den Einzelbildern keine ganzen Bohrkern zusammengesetzt wurden.

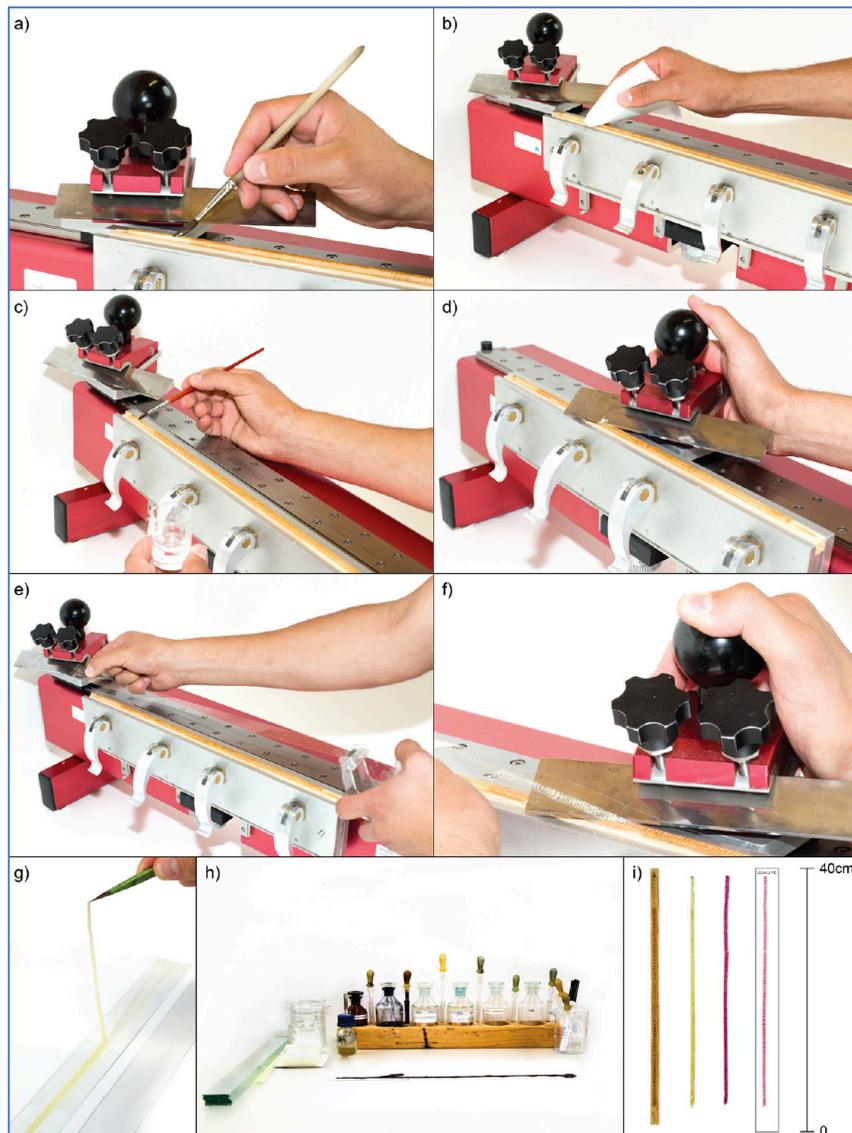


Abb. 21 Überblick über die einzelnen Schritte zur Erstellung von Dünnschnitten eines ganzen Bohrkerns. (a) Zuerst wird Maisstärke auf den Kern aufgetragen und anschliessend werden die Reste mit einem Tuch entfernt (b). (c) Danach wird das Mowiol auf den Kern aufgetragen und überschüssiges Mowiol nach dessen Trocknung mit der Klinge entfernt. (d) Der gekühlte Tesa-Kleber wird seitlich bündig auf die Probe aufgeklebt und, während das Ende nach oben gehalten wird, mit der Klinge geschnitten (f). (g) Der Klebestreifen wird eigeweicht und nach einiger Zeit kann der Dünnschnitt vom Kleber abgelöst werden. (h) Die verwendeten Materialien für das anschliessende Konservieren (links nach rechts: Glasträger, Wasser, Kanadabalsam, Astrablau, Safranin, Ethanol und Xylol). (i) Links nach rechts: Bohrkern mit glatter Oberfläche, Dünnschnitt des Kerns, gefärbter Dünnschnitt des Kerns und permanent fixierter Dünnschnitt des Kerns auf einem Glasträger (Gärtner et al., 2015).

4.3 Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgte mittels standardisierter Verfahren, die in diesem Abschnitt erklärt werden.

4.3.1 Jahrringbreitenmessung

Um sich auf dem Bohrkern besser orientieren zu können, wurde jeder Kern zu Beginn datiert und optisch gekennzeichnet. Dazu wurden die einzelnen Ringe von der Waldkante bis zum Mark rückwärts gezählt und einem Kalenderjahr zugeordnet. Die Dekaden (1980, 1990, ...) wurden mit einem Punkt markiert, die 50er Jahre (1850, 1950, ...) mit zwei Punkten und die Jahrhunderte (1900, 2000, ...) mit drei Punkten gekennzeichnet (Wilford et al., 2005). Um die Jahrringbreiten zu messen, wurden die Proben auf einem halbautomatischen «Lintab» Messtisch platziert und anschliessend mit dem Time Series Analysis Programm «TSAP» kombiniert gemessen, wozu ein Stereomikroskop (Leica Wild M8; 6x-50x) verwendet wurde. Die Messgenauigkeit lag bei dieser Variante bei 0.01 mm (Cherubini et al., 2002).



Abb. 22 (A) Bohrkern der Probe WT03, durchgebohrt. Links sind das dunkle Druckholz und die daraus resultierende Exzentrizität gut erkennbar. (B) Dünnschnitt der Probe Bu05 mit Reaktionsholz in der Mitte und im rechten Aussenbereich des Kerns.

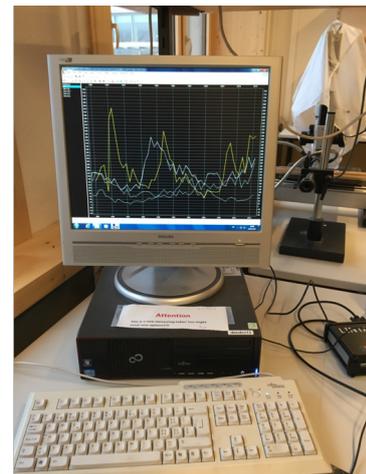


Abb. 23 Lintab-Messtisch (links) kombiniert mit der TSAP-Software (rechts).

4.3.2 Kreuzdatierung

Um festzustellen, ob die Proben korrekt gemessen und datiert wurden, müssen sie kreuzdatiert werden. Dazu wurden zuerst die zwei Proben eines Baumes auf ihre Synchronlage der Kurven überprüft (Maxwell et al., 2011). Dadurch können die Messungen auf ihre Qualität geprüft und fehlende Jahrringe eruiert werden (Phipps, 1985; Fritts, 1976). Diese Überprüfung wurde in dieser Arbeit mit der im Kapitel 0 beschriebenen Software «TSAP» gemacht. Wie bereits unter Kapitel 2.3 erwähnt, erkannte A. E. Douglas zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Bedeutung der exakten Datierung mit Hilfe der Dendrochronologie, indem er die Grafiken aus der Breitenmessung auf ihre Synchronlage überprüfte (Maxwell et al., 2011). Dadurch entwickelte sich die Kreuzdatierung zum fundamentalen Prinzip der Jahrringdatierung (Fritts, 1976; Cook & Kairiukstis, 1990). TSAP ermöglicht einerseits eine graphische Auswertung der Kurven, wobei sie gegeneinander verschoben werden können; und andererseits eine statistische Analyse mehrerer Messungen gleichzeitig (Rinn Tech, 2010). Dabei werden Werte wie die Gleichläufigkeit (GLK) oder der Cross Date Index (CDI) berechnet. GLK-Werte von 65 und höher sind geeignet, um verlässliche Aussagen über die Qualität machen zu können. Beim CDI sollten die Werte um 20 liegen.

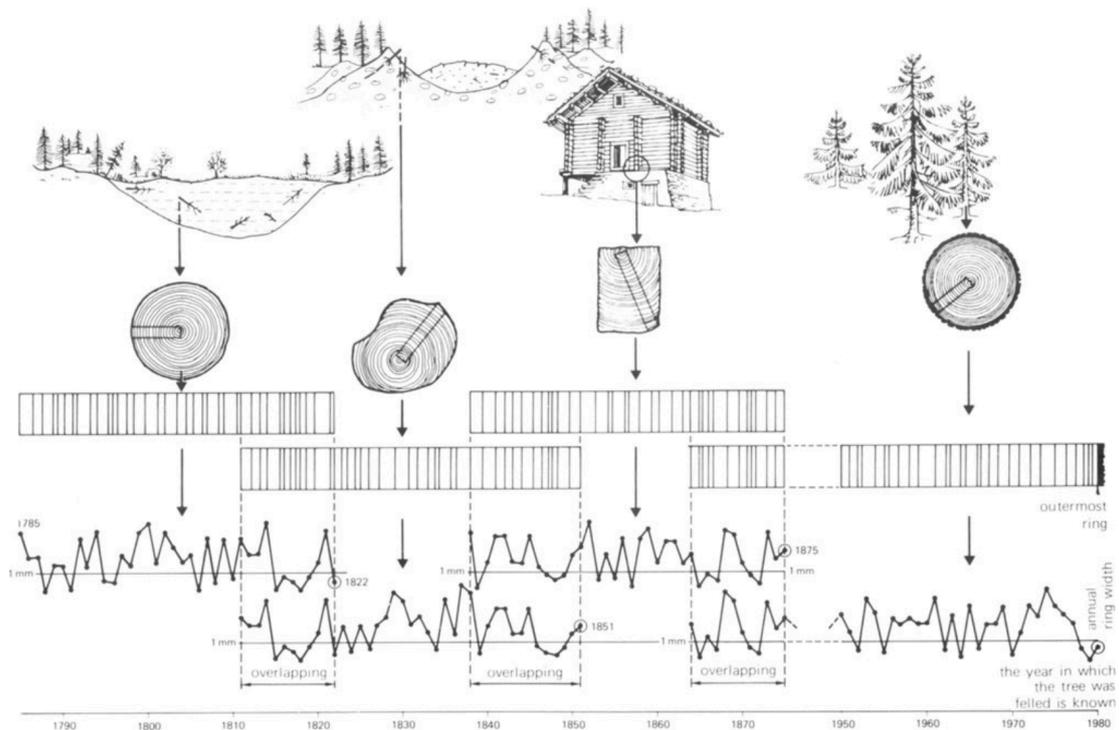


Abb. 24 Das Prinzip der Kreuzdatierung (Schweingruber, 1988: 51).

Die Gleichläufigkeit basiert darauf, wie gut zwei Messreihen zueinander passen. Verzeichnen beide Messreihen eine Zunahme oder eine Abnahme im Vergleich zum Vorjahr, ergibt dies einen Pluspunkt. Nimmt eine Messreihe zu und die andere ab, ergibt dies einen Minuspunkt. Die Summe dieser Punkte durch die Anzahl verglichener Jahre ergibt die GLK (Rinn Tech, 2010).

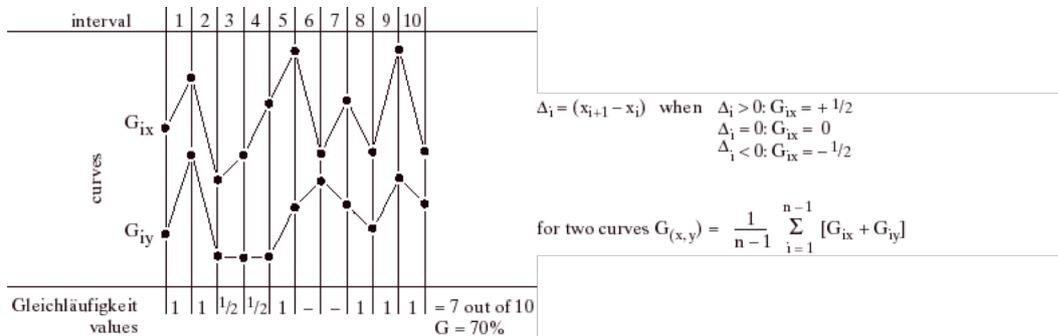


Abb. 25 Berechnung der Gleichläufigkeit (Schweingruber, 1988: 13).

4.3.3 Erstellung der Referenzchronologie

Um eindeutige Bewegungssignale zu erkennen, wurde eine lokale Referenzchronologie für *Abies alba* und *Fagus sylvatica* erstellt. Sie zeigt das lokale Wachstum der untersuchten Baumarten unter Normalbedingungen, das heisst, ohne Beeinflussung des Wachstums durch Bewegungen im Untergrund.

Dafür wurden Proben, welche auf dem Referenzstandort entnommen wurden, gegeneinander abgestimmt. Dies erfolgte durch die Kreuzdatierung der hangparallel gebohrten L- und R- Proben (L für links und R für rechts). Nach der erfolgreichen Kreuzdatierung wurde daraus die erste provisorische Mittelkurve erstellt. Alle diejenigen Bäume, die ein gleiches Wachstum aufwiesen, wurden fortlaufend zur provisorischen Mittelkurve hinzugefügt, so dass diese laufend neu berechnet wurde. Bäume, die ein unterschiedliches Wachstum und dadurch eine schlechte Übereinstimmung hatten, wurden nicht in die Mittelkurve integriert. Die Mindestanzahl der in die Mittelkurve der Referenzchronologie zu integrierenden Bäume wurde auf 15 festgelegt (Schweingruber, 1996). Aus diesem Grund wurden 20 Bäume beprobt, um etwas Spielraum zu haben, falls gewisse Bäume nicht hätten verwendet werden können.

Bei einzelnen Proben von *Abies alba*, die für die Erstellung der Referenzchronologie verwendet wurden, war optisch Teils exzentrisches Wachstum zu sehen. Aussagen über die Proben von *Fagus sylvatica* konnten makroskopisch nicht gemacht werden. Durch die Bildung einer Mittelkurve wurde der Einfluss leicht exzentrisch wachsender Referenzbäume jedoch abgeschwächt, was es erlaubte, auch diese Proben für die Referenzchronologie zu verwenden.

In der internationalen Jahrringdatenbank konnte in der näheren Umgebung keine bereits existierende Chronologie für *Abies alba* und *Fagus sylvatica* gefunden werden, weshalb nur die selbst erstellte Chronologie verwendet wurde.

Als letztes wurde die Referenzchronologie für die Kreuzdatierung verwendet. Somit konnten Messfehler eruiert werden. Um fehlende Jahrringe aufzuspüren, war der Abgleich mit der Chronologie ebenfalls notwendig.

4.4 Datenanalyse

Die Grundlage dieser Arbeit ist die Jahrringbreitenmessung und die daraus resultierende Analyse der Exzentrizität. Zusätzlich wurden die Proben unter dem Binokular visuell analysiert und Reaktionsholz, traumatische Harzkanalreihen und extreme Jahrringe – egal ob breit oder schmal – datiert. Es ist bereits jetzt zu erwähnen, dass traumatische Harzkanalreihen kaum gefunden wurden, weshalb nicht weiter auf ihre Bedeutung eingegangen wird. Harzkanalreihen werden bei einer Verletzung des Baumes gebildet, um diese möglichst schnell zu verschliessen (Stoffel & Bollschweiler, 2008). Um die gewonnenen Erkenntnisse quantitativ zu bestärken, wurde der Exzentrizitätsindex von Wistuba et al. (2013) angewandt. Ebenfalls wurden Klimadaten aus der Region in die Analyse miteinbezogen.

4.4.1 Reaktionsdatierung

Der Fokus dieser Arbeit lag, wie im Kapitel 4.4 beschrieben, auf der Analyse der Jahrringbreiten und der damit eingehenden Bestimmung von exzentrischen Breitenwachstum und einsetzendem Reaktionsholz.

Dazu wurden für jeden Baum beide Messreihen und die Mittelkurve der dazugehörigen Referenzchronologie zueinander in Excel geplottet. Divergieren die Kurven der «a» und «i» Probe, bedeutet dies das Ende des konzentrischen Breitenwachstums und signalisiert den Beginn des exzentrischen Breitenwachstums. Dies wiederum signalisiert die Anpassung durch eine Reaktion auf die Schrägstellung (Alestalo, 1971). Eine mögliche Fehldatierung kann entstehen, wenn sich das Ereignis bereits im Vorjahr ereignete und das einsetzende Reaktionsholz erst zu Beginn der neuen Vegetationsperiode ersichtlich wird. Deshalb wurde bei jeder Ereignisdatierung das Spätholz des Vorjahres genau analysiert, um festzustellen, ob bereits Anzeichen für Reaktionsholz zu entdecken sind.

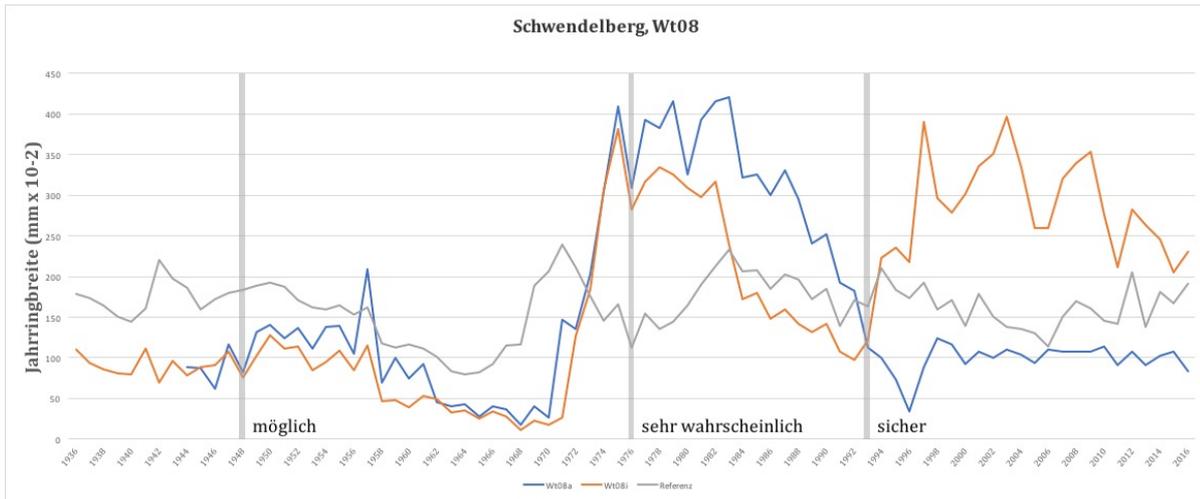


Abb. 26 Reaktionsdatierung anhand der Exzentrizität der Kurven.

Die Reaktionsdatierung wurde in einer Excel-Liste erstellt. Dabei wurden der Beginn des Ereignisses, die Exzentrizität, Wachstumseinbrüche, schmale- oder breite Jahrringe sowie die Ausprägtheit der Druckholzbildung registriert. Das Druckholz wurde in deutliches, eher starkes, eher schwaches und ungewisses Druckholz eingeteilt. Bei einer deutlichen Klassifikation ereignet sich daraus eine sichere Reaktion. War das Druckholz nur schwach zu erkennen, kombiniert mit einer schwachen Exzentrizität, ergab dies eine mögliche Reaktion.

Abrupte Wachstumseinbrüche sind auf der Wachstumskurve deutlich erkennbar. Kombiniert mit der Kurve der Referenzchronologie wird ersichtlich, ob es sich dabei um einen klimatisch bedingten Einbruch des Breitenwachstums handelt oder ob es das Resultat einer mechanischen Beanspruchung ist.

4.4.2 Exzentrizitätsindex

Für diese Arbeit wurde der von Wistuba et al. (2013) entwickelte Exzentrizitätsindex angewandt und getestet. Dieser wurde extra für die Analyse von Massenbewegungen, speziell für Rutschungen, entwickelt (Wistuba et al., 2013). Die Berechnung des Exzentrizitätsindex geschieht wie folgt:

$$(I) \quad E_x [\text{mm}] = U_x - D_x$$

$$(II) \quad \text{wenn } E_x [\text{mm}] > 0; \quad E_{i_x} [\%] = (E_x / D_x) 100\%$$

$$\text{wenn } E_x [\text{mm}] = 0; \quad E_{i_x} [\%] = E_x [\text{mm}] = 0$$

$$\text{wenn } E_x [\text{mm}] < 0; \quad E_{i_x} [\%] = (E_x / U_x) 100\%$$

$$(III) \quad \nu E_{i_x} [\%] = E_{i_x} - E_{i_{x-1}}$$

Durch die Subtraktion der hangunterseitigen Jahrringbreite (D_x) von der hangoberseitigen Breite (U_x) wird die Exzentrizität (E_x) berechnet. Daraus erfolgt die Berechnung des Exzentrizitätsindex (Ei_x). Das Vorzeichen definiert dabei die Prozessrichtung und der Index wird prozentual zum dünneren Jahrring berechnet. Dadurch kann die Hangbewegung rekonstruiert werden. Die tatsächliche Datierung eines Ereignisses geschieht durch die Berechnung des Exzentrizitätsindex im Vergleich zum Vorjahr (vEi_x). Dadurch, dass der Index in Prozent und nicht Millimeter angegeben wird, wird ermöglicht, dass Bäume verschiedener Arten und Untersuchungsgebieten verglichen werden können (Wistuba et al., 2013). Aus den Referenzmessreihen wird zum Abschluss der Schwellenwert berechnet. Er wird aus dem arithmetischen Mittel und der Standardabweichung zusammengesetzt und beinhaltet einen Wert für die positiven vEi_x sowie die negativen vEi_x . Jahre, die den bestimmten Grenzwert überschreiten, sind als Ereignisjahre zu deuten.

4.5 Abgleich mit Niederschlagsdaten

Die Entstehung von Rutschungen hängt von mehreren Faktoren ab. Einerseits spielt der Untergrund (Boden, Geologie, Hangneigung, Erosion und Vegetation) eine wichtige Rolle, andererseits ist der Wasserhaushalt von grosser Bedeutung (BAFU, 2015). Viel Niederschlag führt zur Reduktion der Scherfestigkeit und Erhöhung der Auflast bzw. des Eigengewichts des Materials, daher können Rutschungen durch Niederschlag ausgelöst werden. Wie das Bundesamt für Wasserwirtschaft (1998) feststellte, erhöhen Niederschlagsintensitäten von über 50 mm/h die Rutschungsaktivitäten. So wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen den Ereignissen und den Niederschlagsdaten zu erarbeiten, um zu sehen, ob eine Korrelation zwischen grossen Niederschlagsmengen und der Auslösung von Ereignissen besteht.

Als Grundlage dienen die Daten der MeteoSchweiz, welche über das Programm Climap bezogen werden konnten. Dafür wurde die Station, die dem Untersuchungsgebiet am nächsten ist, ausgewählt. Die Station in Luzern auf 454 m.ü.M. zeichnet die effektiven, monatlichen Niederschlagswerte (Summen) in Millimetern auf. Um den gesamten zeitlichen Rahmen abzudecken, wurden die Daten von 1950-2016 verwendet.

Um Aussagen über extreme Ereignisse zu machen, wurden Schwellenwerte definiert. Besonders niederschlagsarme sowie niederschlagsreiche Jahre wurden definiert und mit den datierten Ereignisjahren verglichen.

5. Resultate

Das folgende Kapitel (Kapitel 5) widmet sich der Darstellung und Erläuterung der erhobenen empirischen Daten. Nach der Ergebnispräsentation wird zunächst die Referenzchronologie skizziert, um sodann die Resultate des Exzentrizitätsindex sowie der visuellen Ereignisanalyse darzustellen.

5.1 Ergebnisse der Feldarbeit

Die durch die Feldarbeit entstandene Karte zeigt die Standorte der Bäume, die Richtung der Schrägstellung, Veränderungen der Infrastruktur und Geländeformen. Der Kartierung des gesamten Gebietes liegt der Massstab 1:1'500 zugrunde.

Modell	Jahr	Auflösung [m]	Projektion
SwissALTI3D	2015	2	CH1903 + LV95
PK 1:25'000	2007	1.25	CH1903 LV03
Orthophotos	2013	0.25	CH1903 LV03

Tab. 6 Übersicht über die verwendeten Modelle und ihr Alter.

Das Untersuchungsgebiet ist von zahlreichen Rissen durchzogen, anhand derer es sich in drei Stufen unterteilen lässt. Die erste Stufe reicht vom Wanderweg am östlichen Kartenende (Abb. 27) bis zum halbrunden, bedeckten Steilhang. Bis oberhalb des Steilhangs erreicht das Gelände eine Steigung von ca. 40°. Danach flacht das Terrain wieder ab, bis es knapp unterhalb der Anrisskante wieder steiler wird. Gegen Süden fällt das Gebiet tendenziell zum Bach ab. Grosse Böcke wurden durch die Bewegungen freigelegt und rotiert. Nördlich bildet der deutliche, scharfe Scherrand die Grenze. Aufgrund der Bewegungen sind viele kleine Stauchungswülste zu sehen, hinter welchen sich das Wasser aufstaut und sich Wasseransammlungen bilden (vgl. Anhang 1).

Der Wanderweg wurde mit Hilfe des digitalen Höhenmodells aus dem Jahr 2015 kartiert und ist auf dem DHM durch eine flache Linie ohne Wellen deutlich erkennbar. Vergleicht man den Verlauf des Wanderweges, wie er auf der Pixelkarte (PK25) im Jahre 2007 von der Swisstopo kartiert wurde, mit jener Kartierung, die auf der Grundlage des Höhenmodelles erstellt wurde, ist zu erkennen, dass die Linien nicht kongruent sind. Betrachtet man den kartierten Wanderweg ausserhalb des Untersuchungsgebietes, ist kein Versatz zwischen 2007 und 2015 erkennbar - der Untergrund muss sich in besagtem Zeitraum um diesen Versatz bewegt haben.

Basierend auf der Pixelkarte (zur Genauigkeit bzw. Auflösung der Karte vgl. Tab. 6) sowie des digitalen Höhenmodells lässt sich schlussfolgern, dass sich der Hang um ca. 15 Meter talwärts bewegt hat. Als Ergebnis ist der Wanderweg, der durch das Untersuchungsgebiet verläuft, seit mehreren Jahren nicht mehr begehbar.

Dagegen sind der am Hangfuss liegende Weg sowie die Schwendelbergstrasse durch stetige Korrekturen durch den Forstdienst der Gemeinde Hergiswil noch begeh- und befahrbar.

Ein weiteres Indiz für die Hangbewegungen liefert der Vergleich des Bachverlaufs zwischen der Pixelkarte von 2007 und des Luftbildes aus dem Jahr 2013. Dieser wurde ebenfalls um einige Meter versetzt. Die Anrisskante sowie die seitlichen Scherrisse sind über den betrachteten Zeitraum konstant geblieben.

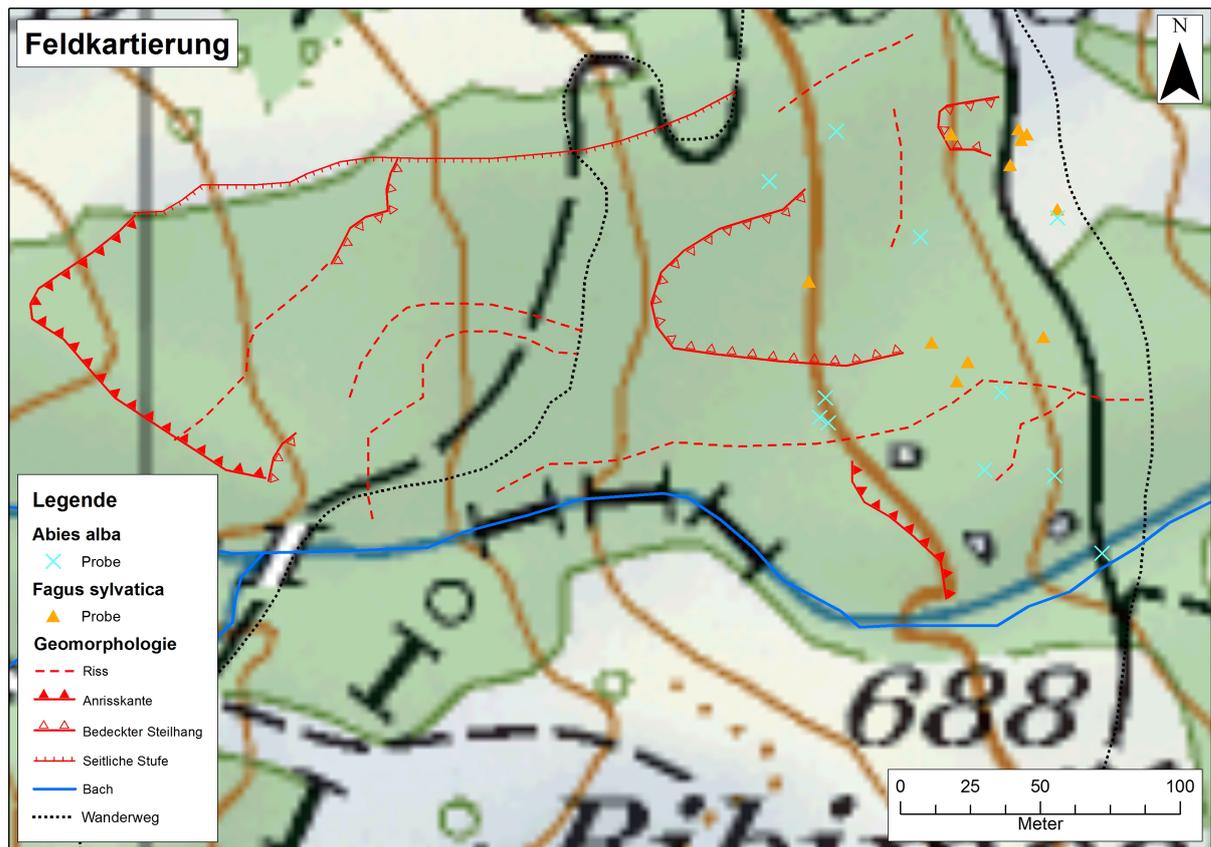


Abb. 27 Übersicht über die digitale Version der Feldkartierung (Hintergrund: Pixelkarte PK25, ©Swisstopo 2017).

Die Wachstumsreaktionen der auf der Rutschung beprobten Bäume reichten von Säbelwuchs über diverse Schrägstellungen bis hin zur Spaltung des Stammes durch die mechanische Beeinflussung. Bei vielen Bäumen wurde das Wurzelwerk freigelegt. Die detaillierte Übersicht der Bäume ist auf Abb. 28 dargestellt. Die Pfeile zeigen jeweils die Richtung der Schrägstellung der Bäume. Die Richtung der Schrägstellung kann meist durch die Hangneigung und die Bewegungen des Untergrundes erklärt werden. Die beprobten Buchen Bu01, Bu02, Bu03 und Bu04 liegen nahe beieinander unterhalb eines bedeckten Steilhanges und neigen, abgesehen von Bu04, entgegen der Richtung des Hanges. Die Probe Bu05 befindet sich an der Kante zum Steilhang und neigt hangabwärts. Auch die Probe Bu06, welche sich im Zentrum des Untersuchungsgebietes unterhalb eines bedeckten Steilhanges befindet, zeigt hangabwärts.

Die Proben Bu07, Bu08 und Bu09 sind in einem Halbkreis angeordnet und zeigen in die Richtung des vorherrschenden Gefälles. Die Probe Bu10, die sich etwas oberhalb des Wanderweges befindet, zeigt, wie die bereits erwähnten Proben Bu01, Bu02 und Bu03 ebenfalls Richtung Hang. Bu11, die sich orographisch links von WT11 befindet, ist wiederum hangabwärts gerichtet.

Bei den Proben von *Abies alba* sind die Bäume Wt01, Wt02, Wt03, Wt05 und Wt06 ebenfalls hangabwärts ausgerichtet. Die Bäume Wt07 und Wt09 zeigen in Richtung Norden, während Wt10 in südliche Richtung geneigt ist. Zum Hang zeigen die Tannen Wt04 und Wt08.

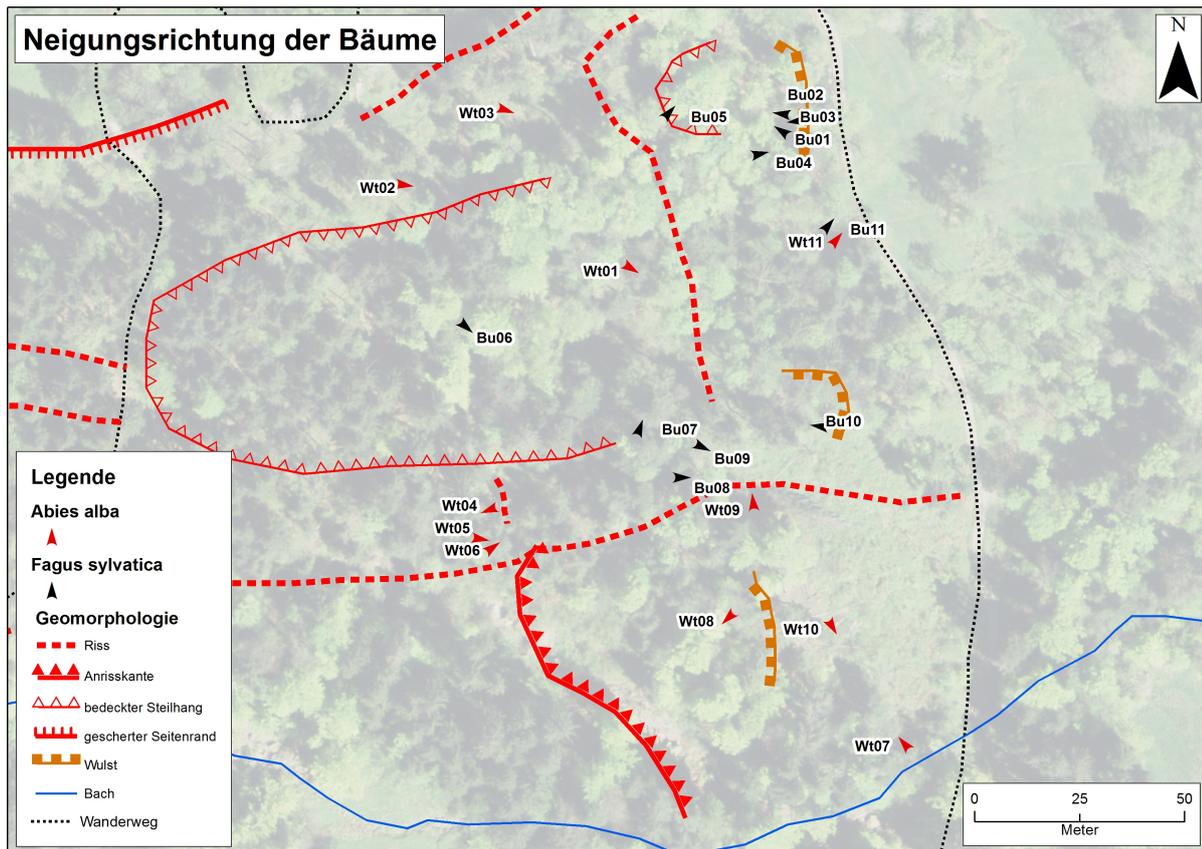


Abb. 28 Die Karte zeigt die Position und Neigungsrichtung (Pfeilrichtung) der einzelnen Proben (Hintergrund: Swisssimage, ©Swisstopo 2017).

5.2 Ergebnisse der Referenzchronologie

Beide Referenzchronologien (Tanne und Buche) decken den Zeitraum von 1917 bis 2016 ab. Während die Referenzchronologie für die Tanne vor 1938 weniger als 5 Individuen beinhaltet und daher nur unter Vorbehalt verwendet werden sollte, stützt sich die Chronologie der Buche bereits ab 1925 auf fünf Individuen (Abb. 29 & Abb. 30). Die Chronologie von *Abies alba* (Abb. 29) basiert auf 37 Proben, sprich 18 Bäumen, von welchen jeweils zwei Proben in die Chronologie eingefügt wurden, plus die Probe RWt14L, welche ohne die dazugehörige Probe RWt14R kreuzdatiert wurde, da sie verloren ging.

Da der Baum RWt08 nicht in die Chronologie eingegliedert werden konnte, wurde er nicht weiter berücksichtigt. Die Bäume beider Chronologien zeigen mehrheitlich konzentrisches Wachstum und keine Anzeichen für Schrägstellung. Hinzu kommt, dass das Alter der für die Referenzchronologie analysierten Bäume höher ist, als das der gestörten Bäume.

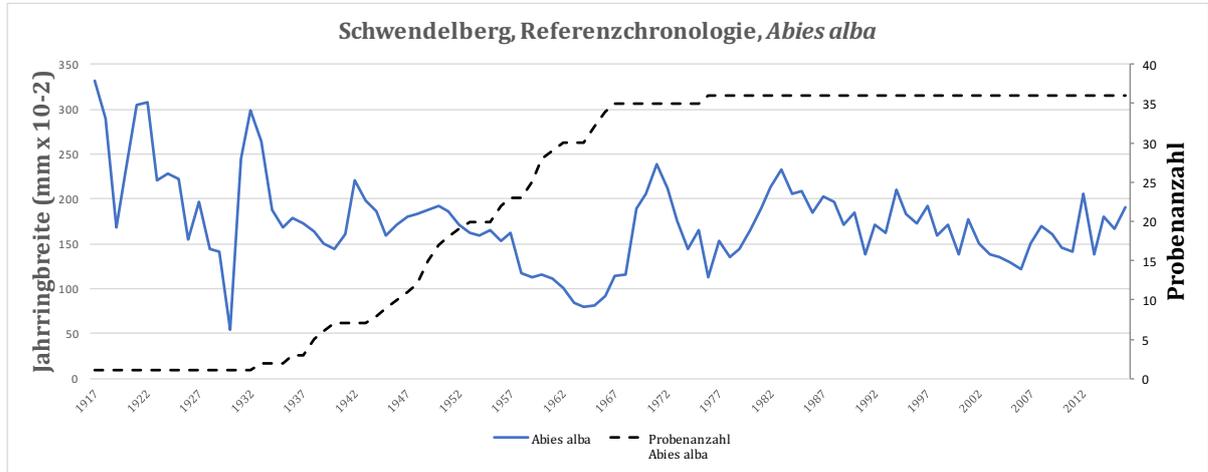


Abb. 29 Die Referenzchronologie für *Abies alba* (blau) und die Probenanzahl (schwarz).

Für *Abies alba* wurden die Jahre 1930, 1963, 1964, 1965 und 1976 als negative Weiserjahre bestimmt. Die Jahre 1932 und 1971 dagegen wurden als positive Weiserjahre determiniert. Für *Fagus sylvatica* wurden die Jahre 1940, 1962, 1963 und 1976 als negative, 1982, 1985 und 1988 als positive Weiserjahre bestimmt. Für beide Baumarten gelten folglich die Jahre 1963 und 1976 gemeinsam als negative Weiserjahre.

Einen Wachstumseinbruch über beinahe 10 Jahre in der Referenzchronologie von *Abies alba* ist in den Jahren 1957-1967 zu erkennen. In diesen Jahren wurden viele junge Bäume der Chronologie hinzugefügt.

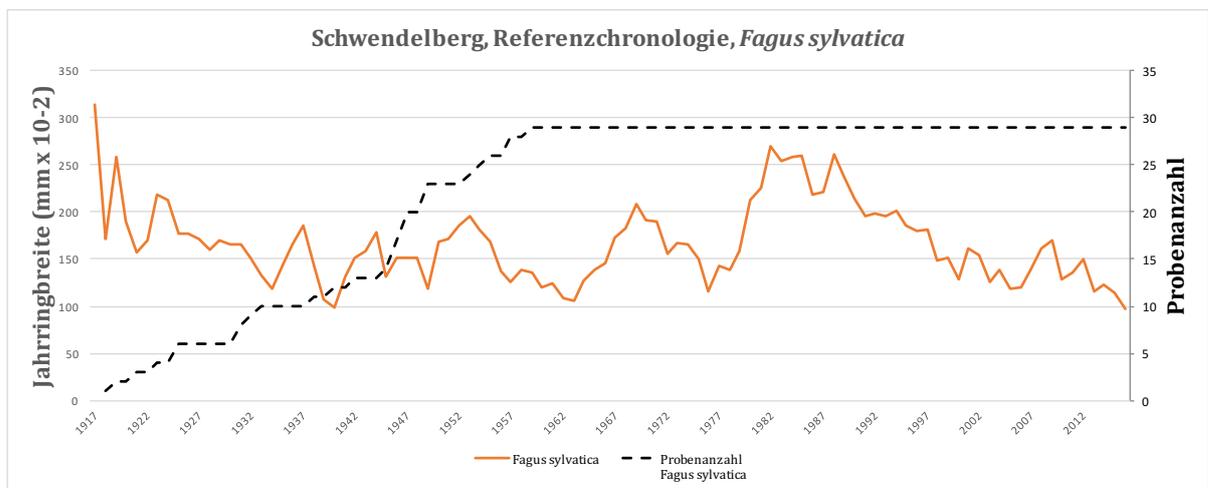


Abb. 30 Die Referenzchronologie für *Fagus sylvatica* (orange) und die Probenanzahl (schwarz).

In der *Fagus sylvatica* Chronologie (Abb. 30) wurden insgesamt 29 Proben, das heisst 14 Bäume, und die Probe RBU03L integriert. Auch hier erlitt eine Probe im Präparationsprozess irreparable Schäden. Angesichts der stringenten Gleichläufigkeit wurde die Probe RBU03L einzeln am Schluss hinzugefügt. Die Chronologie der Buchen stützt sich auf 14 Bäume, was unter dem von Schweingruber (1996) vorgeschlagenen Minimum liegt. Da die Kreuzdatierung jedoch stimmige Werte ergab, wurde, auch aus forschungspragmatischen Gründen auf eine weitere Beprobung im Feld verzichtet. Die Jahrringgrenzen zu erkennen entpuppte sich oftmals als sehr knifflig, weswegen die Mehrheit der Proben multipel nachgemessen wurden.

5.3 Ergebnisse des Exzentrizitätsindex

Die Berechnungen für den Exzentrizitätsindex von Wistuba et al. (2013) wurden auf alle beprobten Bäume angewandt. Der Index zeigt prozentual die relative Veränderung der Werte im Vergleich zum Vorjahr. Die Kalkulation der Schwellenwerte für *Abies alba* ergab talseitig -73.02% und bergseitig 48.29%. Da *Fagus sylvatica* nicht Druckholz, sondern Zugholz bildet, sind die Vorzeichen umzukehren. Der talseitige Schwellenwert beträgt folglich 34.53%, während der bergseitige Schwellenwert bei -43.11% liegt. Übersteigt vE_{ix} die zuvor berechneten Schwellenwerte, ist in jenem Jahr eine Schrägstellung eingetreten. Abb. 31 zeigt die graphische Darstellung des Exzentrizitätsindexes am Beispiel der Buche Bu05. Insgesamt sind 10 Ereignisse auszumachen, bei welchen vE_{ix} den dazugehörigen Schwellenwert übersteigt.

Ein erster Vergleich mit der visuellen Ereignisdatierung zeigte, dass die mit dem Exzentrizitätsindex datierten Ereignisse in der Zahl klar überwiegen. Verglichen wurden hierfür die datierten Reaktionen pro Baum, d.h. wie viele Reaktionen zeigt ein Baum, basierend auf dem Exzentrizitätsindex, über den analysierten Zeitraum und wie viele Reaktionen zeigt er durch die visuelle Reaktionsdatierung. Diese Gegenüberstellung wurde zudem für alle Reaktionen der 11 beprobten Bäume pro Jahr vollzogen.

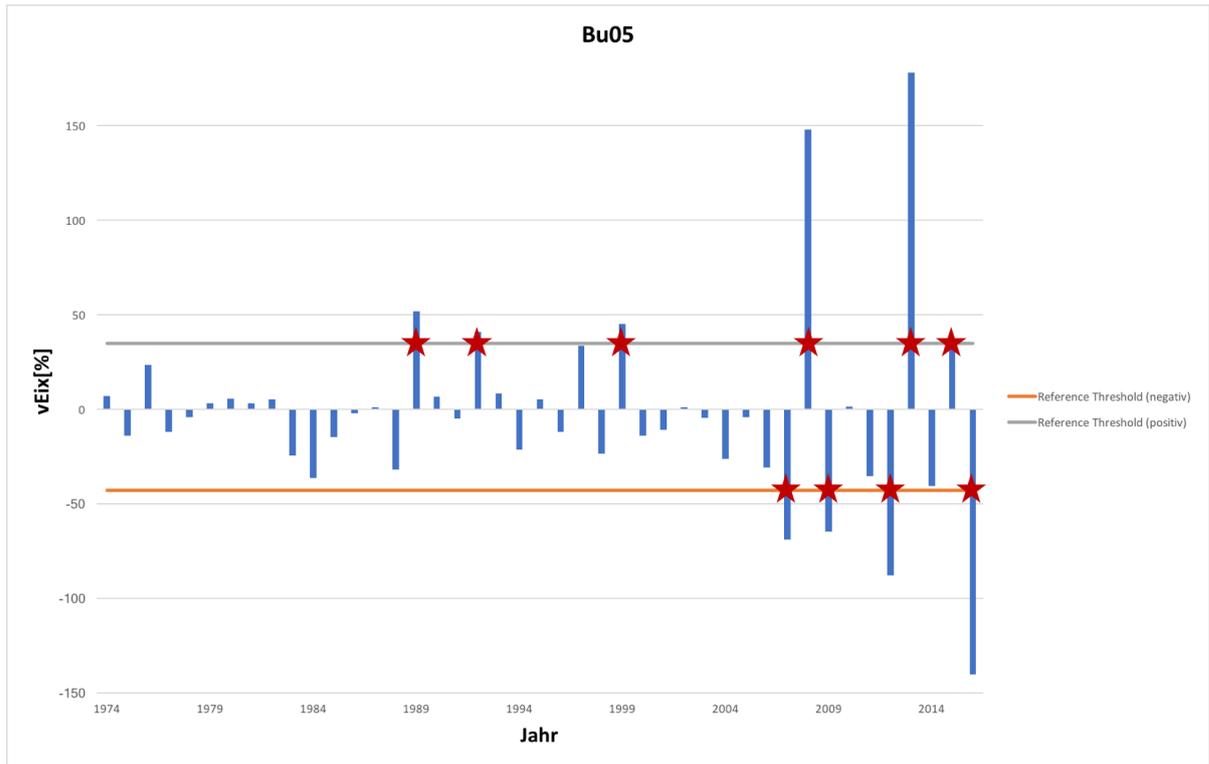


Abb. 31 Das Resultat des Exzentritätsindex am Beispiel der Probe Bu05. Insgesamt überschritten 10 Jahre den Schwellenwert (rote Sterne).

Pro Baum wurden durch die Berechnungen der *Abies alba* Proben mit dem Exzentritätsindex durchschnittlich 10 Reaktionen datiert (Abb. 32, links). Die Werte der Probe Wt04 erreichen die berechneten Schwellenwerte nicht, daher ist keine Reaktion nachzuweisen. Die vEi_x -Werte sind wegen nur kleiner Änderungen zum jeweiligen Vorjahr niedrig. Ebenfalls unter dem Durchschnitt liegen die Werte der Proben Wt01, Wt05 und Wt07. Überdurchschnittlich fielen die Probenwerte der Bäume Wt02, Wt03, Wt08, Wt,09, Wt10 und Wt11 aus.

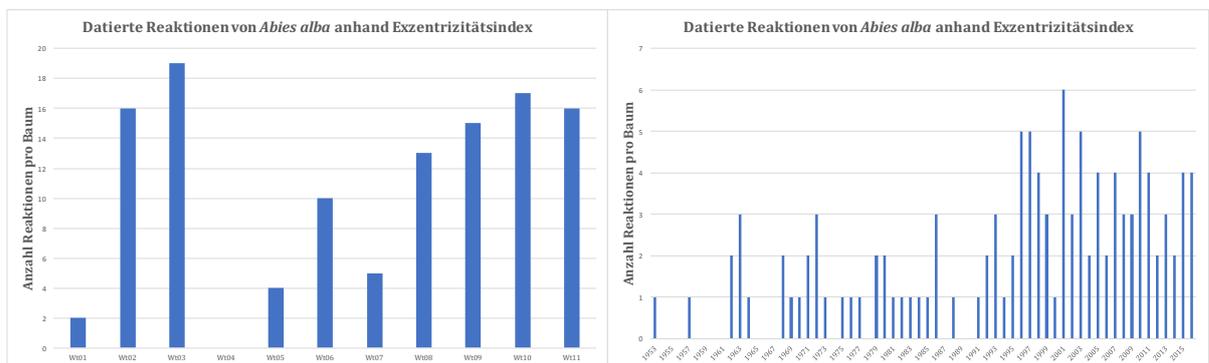


Abb. 32 Die datierten Reaktionen pro Baum (links) und pro Jahr (rechts) von *Abies alba* anhand des Exzentritätsindex.

Die datierten Ereignisse pro Jahr der *Abies alba* Proben (Abb. 32, rechts) nehmen tendenziell über die Zeit zu und weisen in den Jahren 1996, 1997, 2001, 2003 und 2010 die meisten Reaktionen auf. Hier sind Parallelen mit der Reaktionsdatierung zwischen 1994 - 1997 erkennbar. Allgemein ist eine Zunahme der Ereignisse ab 1990 ersichtlich.

Bei den *Fagus sylvatica* Proben wurden pro Baum (Abb. 33, links) durchschnittlich 19 Ereignisse durch die Berechnung mit dem Exzentrizitätsindex datiert. Die Proben Bu01, Bu04, Bu05, Bu06 und Bu07 liegen unter dem berechneten Durchschnitt, während die Proben Bu02, Bu08, Bu09 sowie Bu10 über dem arithmetischen Mittel liegen. Die Probe Bu03 weist 19 Reaktionen auf und widerspiegelt somit den Mittelwert. Bei den *Fagus sylvatica* Proben ist ebenfalls eine tendenzielle Zunahme der datierten Ereignisse mittels des Exzentrizitätsindex erkennbar (Abb. 33, rechts). Eine Häufung der Ereignisse ist in den Jahren 1976, 1996, 1997, 1998, 1999, 2001 und 2004 sowie 2007 festzustellen. Eine Zunahme der Ereignisse ist ab dem Jahr 1990 ersichtlich.

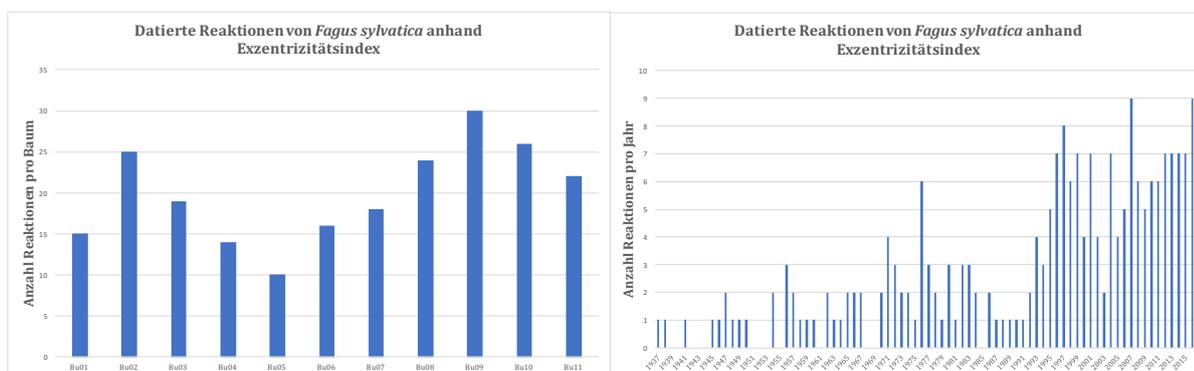


Abb. 33 Die datierten Reaktionen pro Baum (links) und pro Jahr (rechts) von *Fagus sylvatica* anhand des Exzentrizitätsindex.

Bei einer direkten Gegenüberstellung der beiden untersuchten Baumarten (Abb. 34) erkennt man eine durchschnittlich höhere Anzahl an Reaktionen bei den *Fagus sylvatica* Proben. Diese ist auf eine Häufung von Reaktionen im Jahr 1976 zurückzuführen, da nach 1995 eine Reaktionszunahme für beide Arten festzustellen ist.

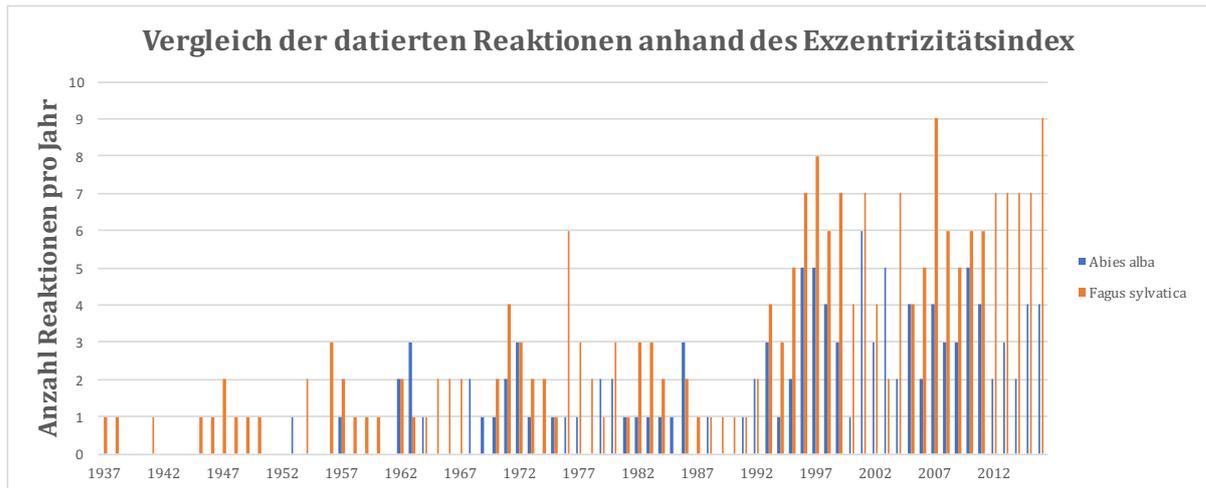


Abb. 34 Die anhand des Exzentrizitätsindex datierten Reaktionen im Vergleich zwischen *Abies alba* und *Fagus sylvatica*. Aus dem Diagramm geht eine Häufung der Prozesse um 1972 und ab 1992 hervor.

5.4 Ergebnisse der visuellen Ereignisanalyse

In den 22 analysierten Bäumen wurden 43 Ereignisse durch die Analyse der Reaktionsholzbildung datiert. Als Startpunkt eines Ereignisses, d.h. als Reaktion auf eine mechanische Störung, wurde die beginnende Exzentrizität in Kombination mit auftretendem Druckholz festgelegt. Auffallend schmale oder breite Jahrringe, Wachstumseinbrüche oder Wachstumsschübe wurden ebenfalls in die Ereignisdatierung eingefügt und gekennzeichnet. Der Beginn sowie das Ende der Messreihe sind durch Pfeile gekennzeichnet, dabei widerspiegelt der Beginn der Messreihe nicht zwingend das Alter des Baumes wieder. Nicht alle Bohrungen trafen das Mark. Die älteste Reaktion der Proben wurde in der Buche Bu09i im Jahr 1950 entdeckt. Eine deutliche Häufung der Ereignisse ist zwischen 1990 und 2000 zu beobachten. Anschliessend kommt es im Jahr 2006 noch einmal zu einem Anstieg. Wie bereits in Kapitel 5.3 erwähnt, wurden, verglichen mit den Resultaten des Exzentrizitätsindex, durch die visuelle und graphische Ereignisdatierung weniger Ereignisse festgestellt. Die detaillierte, visuelle Ereignisdatierung ist im Anhang 3 als Falblatt zu finden. Sowohl Beginn als auch Ende der Messreihe sind mit Pfeilen markiert.

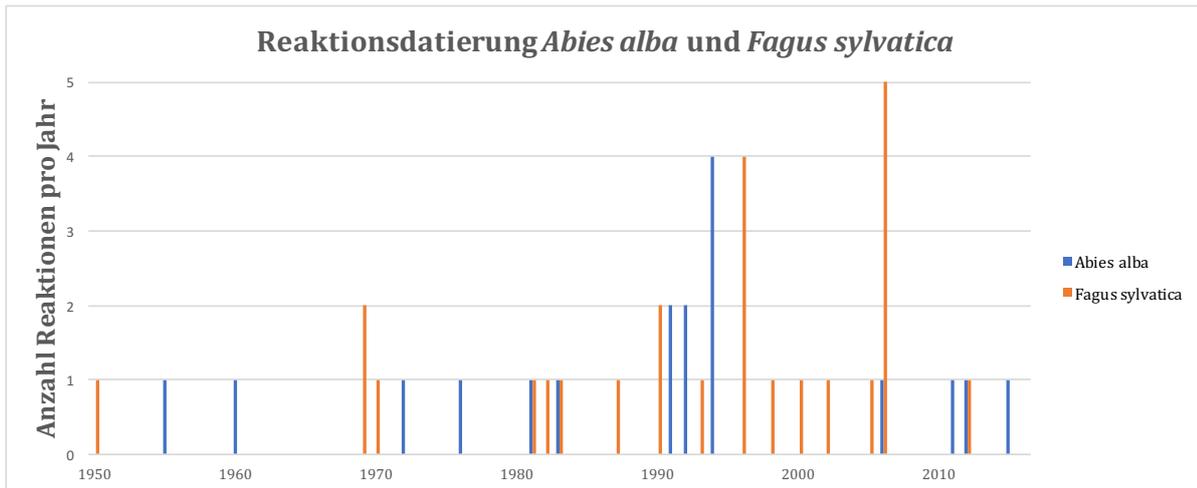


Abb. 35 Der Vergleich der Anzahl Reaktionen pro Jahr zwischen *Abies alba* und *Fagus sylvatica*.

Bei den Tannen Proben wurden maximal drei Reaktionen pro Baum (Wt06) entdeckt und datiert (Abb. 36, links). In den Tannen Wt02, Wt03, Wt04, Wt05 und Wt10 wurde jeweils nur ein Ereignis in den Bohrkernen identifiziert. In den Bohrkernen der Tannen Wt01, Wt07, Wt08, Wt09 und Wt11 wurden jeweils zwei Ereignisse datiert. 1991, 1992 und 1994 waren die Jahre mit der höchsten Anzahl an Bäumen, die feststellbare Reaktionen gezeigt haben. 1991 und 1992 wurde jeweils in zwei Bäumen eine Reaktion im selben Jahr festgestellt, während eine Reaktion im Jahr 1994 in vier Bäumen datiert wurde. Total wurden in den 11 untersuchten Bäumen 18 Reaktionen erkannt, die als sicher eingestuft werden können.

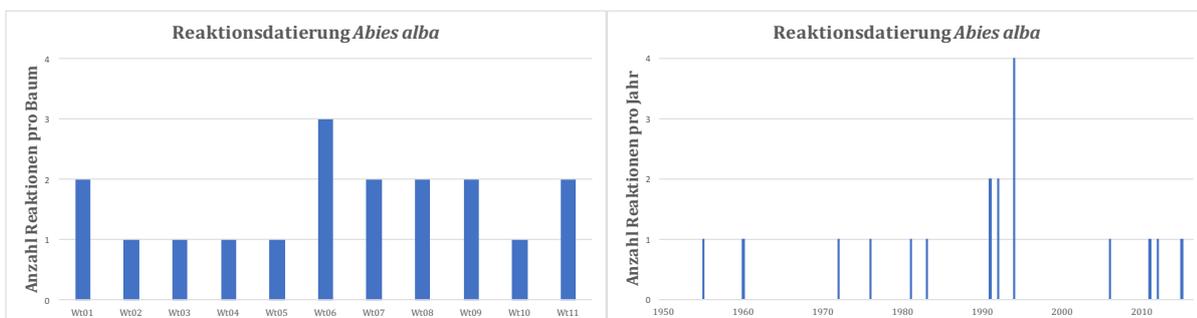


Abb. 36 Die datierten Reaktionen pro Baum (links) und pro Jahr (rechts) von *Abies alba*.

In den Buchen Proben wurde eine bis fünf Reaktionen pro Jahr datiert. Während die Buche Bu07 nur eine Reaktion auf ein Ereignis zeigt, wurden in den Bäumen Bu03, Bu04, Bu05, Bu06, Bu08 und Bu09 jeweils zwei Ereignisse festgestellt. Die Bohrkern der Buchen Bu01, Bu02, Bu10 und Bu11 zeigten drei Ereignisse (Abb. 37, links). Die Auswertung zeigt, dass in den Jahren 1996 und 2006 Ereignisse in mehr Bäumen nachweisbar sind, als in anderen Jahren (Reaktionen in vier bzw. fünf Bohrkernen).

Vorgreifend ist zu erwähnen, dass nach der Dünnschnittanalyse vier Ereignisse, die auf 2007 datiert waren, korrigiert werden mussten (vgl. Kapitel 5.6). Auch bei der visuellen Ereignisdatierung zeigen die Buchen häufiger Reaktionen als die Tannen. Total wurden in den 11 Proben 25 Ereignisse datiert.

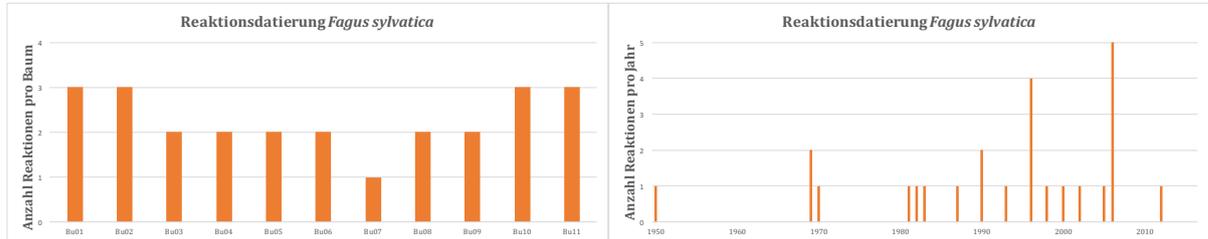


Abb. 37 Die datierten Reaktionen pro Baum (links) und pro Jahr (rechts) von *Fagus sylvatica*.

Um die sicheren Ereignisjahre zu datieren, wurden die Jahre, in welchen mindestens zwei Bäume eine Reaktion im selben Jahr zeigten, hervorgehoben. Die daraus resultierende Karte (Abb. 38) zeigt einerseits den Standort der Tannen (Kreuze), andererseits den Standort der Buchen (Punkt) auf der Rutschung. Die farbigen Pfeile zeigen erstens an, in welchem Jahr eine Reaktion datiert wurde, und zweitens die Richtung der Schrägstellung. Daraus geht hervor, dass in den Jahren 1969, 1981, 1983, 1990, 1991, 1992 und 2012 eine Reaktion in zwei Bohrkernen gefunden wurde. 1994, 1996 und 2006 wurde in vier bzw. sechs Bohrkernen Reaktionsholz datiert. Der folgende Abschnitt dient der Ereignisrekonstruktion im Untersuchungsgebiet für die einzelnen Dekaden, beginnend um 1950 bis einschliesslich 2016.

1950 bis 1959

In der Periode von 1950 bis 1959 wurden zwei Ereignisse datiert. Das früheste Ereignis der gesamten Untersuchung wurde in der Buche Bu09 auf das Jahre 1950 datiert. Die unmittelbar benachbarten Bäume Bu07 und Bu08 zeigten im gleichen Jahr keine Reaktionen. Die Buche Bu09 steht auf einem kleinen Rücken, wobei die umliegenden Bäume jeweils in eine andere Richtung schräggestellt wurden. Die zweite Reaktion wurde 1955 in der Tanne Wt08a datiert, wobei die Druckholzbildung bis 1992 anhält. Die Tanne steht unterhalb der südlich liegenden Anrisskante und wird durch die dahinterliegende Stauchwulst, hinter welcher der Hang wieder steiler abfällt, beeinflusst.

1960 bis 1969

Zwischen 1960 und 1969 wurden zwei Ereignisse datiert. Das erste Ereignis im Jahr 1960 stellte die Buche Wt09 in nördlicher Richtung schräg. Das darauffolgende Ereignis von 1969 wurde in den Bäumen Bu02 und Bu11 datiert. Letzteres ist das erste Ereignis der Untersuchung, bei welchem das Einsetzen von Reaktionsholz mit zwei Bäumen datiert werden konnte. Die benachbarten Bäume, die zu der Buchengruppe (Bu01, Bu03 und Bu04) rund um Bu02 gehören, reagierten in diesem Jahr nicht mit der Bildung von Zugholz. Ebenso wenig Anzeichen auf eine Schrägstellung zeigt die Tanne Wt11, die kaum einen Meter neben der Buche Bu11 steht. Es ist nur sehr undeutliches Druckholz im Bohrkern der Tanne Wt11 zu finden. Diese hat erst drei Jahre später, 1972, deutliches Druckholz als Reaktion auf ein Ereignis gebildet. Beide Bäume stehen auf einer leicht erhöhten Stufe, die zum Wanderweg abfällt und in dessen Richtung die Bäume auch schräggestellt wurden.

1970 bis 1979

In dieser Dekade wurde in drei Bäumen Reaktionsholz entdeckt, wodurch drei verschiedene Ereignisse datiert wurden. Das erste Ereignis 1970 wurde in der Buche Bu10 durch das Einsetzen von Druckholz und exzentrischem Wachstum identifiziert, wodurch sich die Buche in westliche Richtung zum Hang schrägstellte. Talseitig dieses Baumes verläuft eine Stauchwulst und Residualblöcke befinden sich in unmittelbarer Umgebung. Für das Jahr 1972 konnte – wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben – Reaktionsholz in der Tanne Wt11 nachgewiesen werden. Dabei wurde die Tanne, wie die Buche Bu11 drei Jahre zuvor, in östliche Richtung hin zum Wanderweg schiefgestellt. Das letzte Ereignis dieses Jahrzehnts ereignete sich 1976 und wurde in den Proben der Tanne Wt07 gefunden. Die Tanne steht unterhalb der südlichen Anrisskante inmitten grosser, aus der Erde gehobener Steine.

1980 bis 1989

1981 konnte ein weiteres Ereignis mit zwei Bäumen, der Buche Bu08 und der Tanne Wt06, belegt werden. Die zwei Bäume stehen direkt nördlich des Risses, welcher von West nach Ost verläuft, und wurden in östliche Richtung schräggestellt. Auftretendes Reaktionsholz im Jahr 1982 wurde in der Buche Bu06 datiert, die in der Mitte des Untersuchungsgebietes steht und in südöstliche Richtung schiefgestellt wurde. 1983 reagierte die Tanne Wt01, die sich unterhalb eines markanten Risses befindet, auf ein Ereignis durch Bildung von Druckholz. Dasselbe Ereignis wurde in den Proben der Buche Bu05 ebenfalls datiert, die an der oberen Kante des Steilhanges westlich der Buchengruppe steht. Nach vier Jahren geriet der Hang erneut in Bewegung, was in der Buche Bu01 die Bildung von Zugholz hervorrief.

1990 bis 1999

38% der datierten Ereignisse fanden in der Dekade von 1990 bis 1999 statt, wobei bis auf zwei Ausnahmen alle Reaktionen in zwei oder mehr Bäumen nachgewiesen wurden. Die beiden Buchen Bu02 und Bu10, die ca. 75m voneinander entfernt stehen, reagierten 1990 beide mit der Bildung von Zugholz auf ein Ereignis. Ein Jahr später wurde ein Ereignis in den Tannen Wt02 und Wt04 datiert. Sie stehen ausserhalb des bedeckten Steilhanges, der die Mitte des Untersuchungsgebiets charakterisiert. Dabei wurde die Tanne Wt02 in östliche und die Tanne Wt04 in westliche Richtung schiefgestellt. Das nächste Ereignis im Jahr 1992 führte zur Bildung von Reaktionsholz in den Tannen Wt06 und Wt09, die entlang des langen Risses stehen und in die Richtung des Gefälles geneigt wurden.

Nordöstlich davon steht die Buche Bu07, am Rande des bedeckten Steilhanges, und reagierte 1993 mit Zugholzbildung auf ein Ereignis. Das nächste Ereignis wurde in den vier Tannen Wt03, Wt05, Wt08 und Wt10 auf das Jahre 1994 datiert. Ebenfalls in vier Bohrkernen (Bu03, Bu06, Bu08 und Bu11) wurde ein Ereignis 1996 entdeckt. Diese Bäume stehen alle oberhalb des langen Risses auf dem nördlichen Teil der Rutschung. Zwei Jahre später, 1998, wurde das letzte Ereignis dieser Dekade datiert. Es führte zur Bildung von Zugholz in der Buche Bu04.

2000 bis 2009

Im Jahr 2000 reagierte die Buche Bu01 zum zweiten Mal mit der Bildung von Zugholz auf ein Ereignis. 2002 wurde in der Buche Bu09 ebenfalls zum zweiten Mal, 52 Jahre nach dem ersten Ereignis, Zugholz datiert. Auch in der Buche Bu05 wurde im Jahr 2005 ein zweites Ereignis datiert. Das nächste Ereignis im Jahr 2006 wurde in sechs Bäumen, fünf Buchen (Bu01, Bu02, Bu03, Bu04 und Bu11) und eine Tanne (Wt11), identifiziert. Räumlich betrachtet wurde folglich die ganze Buchengruppe von derselben Bewegung erfasst, sowie die zwei etwas oberhalb des Wanderweges stehenden Bäume Bu11 und Wt11, die bis anhin noch nie im selben Jahr Reaktionen auf ein Ereignis gezeigt haben.

2010 bis 2016

2011 ereignete sich eine Bewegung der Hangpartie nahe des langen Risses, wobei der Baum Wt06 in nordöstliche Richtung schräggestellt wurde und mit der Bildung von Druckholz auf diese Schrägstellung reagierte. Dieses Signal ist in den unmittelbar benachbarten Tannen (Wt04 & Wt05) nicht zu finden. 2012 wurden sowohl die Tanne Wt07 als auch die Buche Bu10 zum Hang hin gekippt. 2015 wurde die letzte datierte Reaktion in der Tanne Wt01 gefunden. Sie steht oberhalb der Bäume, die 2012 in ihrem Wachstum beeinflusst wurden.

Zusammenfassend und mit Vorgriff auf die nachfolgende Diskussion (vgl. Kapitel 6) lassen sich bzgl. der hier beschriebenen Ereignisse, exklusive einer Ausnahme, weder zeitliche noch räumliche Muster erkennen. Eine räumliche Gruppierung ist ausschliesslich für das 2006 (hellgrüne Pfeile) erkennbar. Der südliche Teil der Rutschung, der in Richtung Bach abfällt, zeigt erst ab 1994 Ereignisse. In diesem Bereich ist das Gebiet unterhalb der Anrisskante mit Rissen durchzogen und grosse Gesteinsblöcke wurden durch die Kippbewegung aus dem Boden gehoben. Ansonsten sind die Bewegungen nur schwer in Zonen einzuteilen. Insgesamt acht der 22 Bäume sind in Richtung des Hanges schräggestellt worden. Zu diesen Bäumen gehören Bu01, Bu02, Bu03, Bu10, Wt04, Wt07, Wt08 und Wt10.

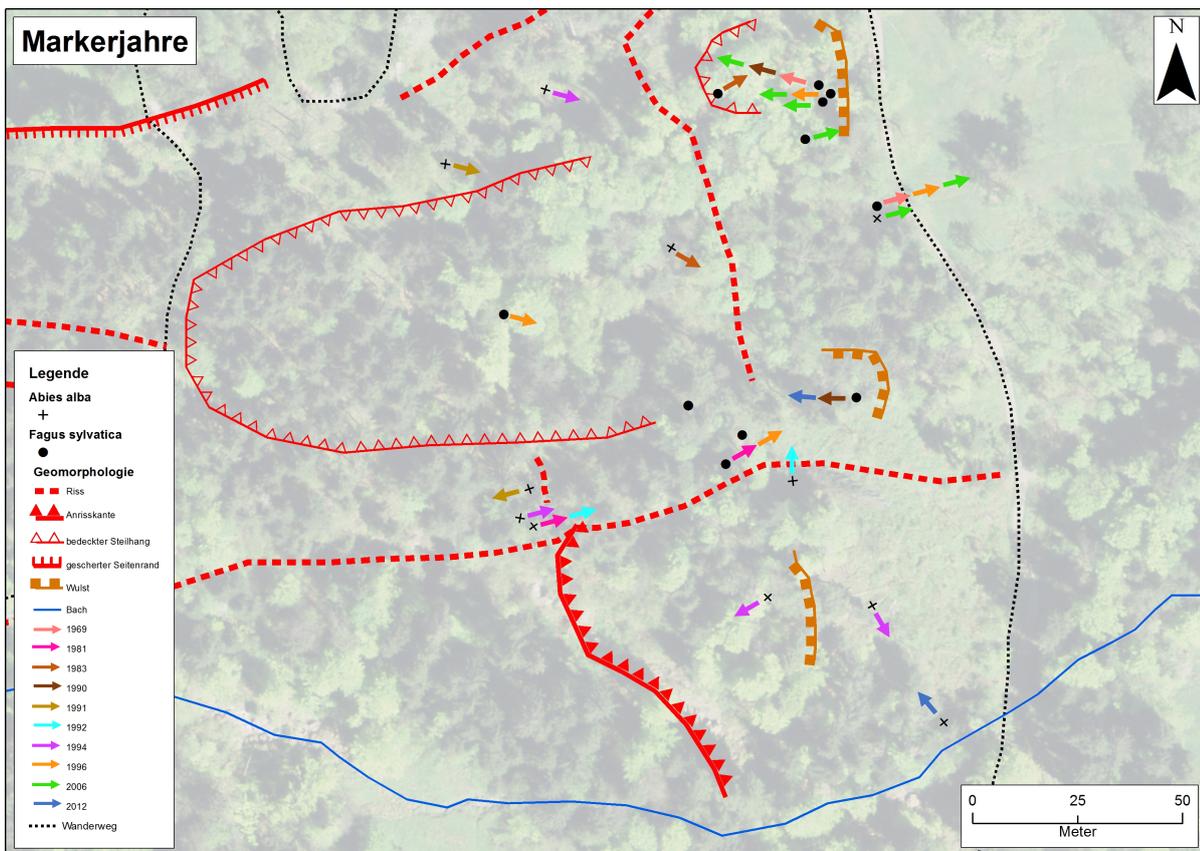


Abb. 38 Die Karte der Feldkartierung zeigt, in welchen Jahren ein Ereignis in den Bohrkernen aufgezeichnet wurde. Dabei werden nur diejenigen Ereignisse dargestellt, die in zwei oder mehr Bohrkernen zu beobachten waren. 1994, 1996 und 2006 wurde in jeweils vier bzw. sechs Bohrkernen Ereignisse entdeckt (Hintergrund: Swissimage, ©Swisstopo 2017).

Vergleicht man die oben datierten Ereignisjahre, die mit mindestens zwei Bäumen datiert wurden, mit der summierten Jahresniederschlagsmenge von 1950-2016 der Station Luzern, stellt man fest, dass in sieben der 10 Ereignisjahre durchschnittlich bis überdurchschnittlich viel Jahresniederschlag verzeichnet wurde. In drei Jahren (1969, 1983 und 1991) fiel unterdurchschnittlich viel Jahresniederschlag, zwei Ereignisjahre (1996 und 2006) hingegen weisen durchschnittliche Jahresniederschläge auf. (Abb. 39).

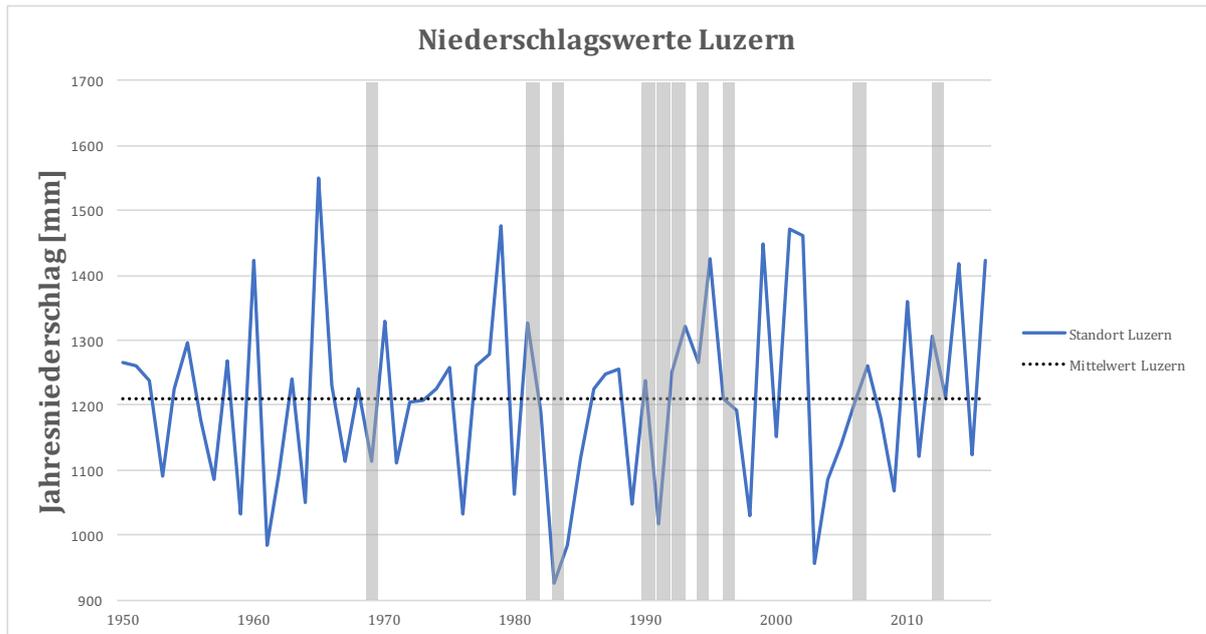


Abb. 39 Die Abbildung zeigt die summierten Jahresniederschlagswerte der Station Luzern (blaue Linie) mit dem Durchschnittswert (schwarze Linie). Die grauen Balken zeigen die Ereignisjahre.

5.5 Vergleich Reaktionsdatierung und Exzentrizitätsindex

Vergleicht man die Ergebnisse der visuellen Reaktionsdatierung von *Fagus sylvatica* mit denjenigen des Exzentrizitätsindex, ist zu erkennen, dass der Exzentrizitätsindex deutlich mehr Ereignisse datiert, als mit der visuellen Reaktionsdatierung entdeckt wurden. Während mit der visuellen Reaktionsdatierung maximal drei Ereignisse pro Baum nachgewiesen wurden, zeigten die indexbasierten Resultate zwischen 10 und 30 Ereignisse über den selben Zeitraum. Wie beim Exzentrizitätsindex ist auch bei der visuellen Reaktionsdatierung eine Zunahme der registrierten Ereignisse pro Jahr in den Jahren 1996 und 2006 erkennbar. 1969 zeigt die visuelle Reaktionsdatierung in zwei Bohrkernen Zugholz, während der Exzentrizitätsindex kein Ereignis registrierte. Somit ist 1969 das einzige Jahr, in welchem mit der Reaktionsdatierung ein Ereignis identifiziert wurde, welches vom Exzentrizitätsindex nicht erfasst werden konnte. Ebenfalls auffällig ist das Jahr 1990, in welchem mit der visuellen Reaktionsdatierung in zwei Bäumen Reaktionsholz gefunden wurde, während der Exzentrizitätsindex lediglich in einem Baum ein Ergebnis zeitigte. In allen anderen Fällen übersteigt die Anzahl der Ereignisse, welche mit dem Exzentrizitätsindex datiert wurden, diejenigen, die mit Hilfe der visuellen Reaktionsdatierung erfasst werden konnten.

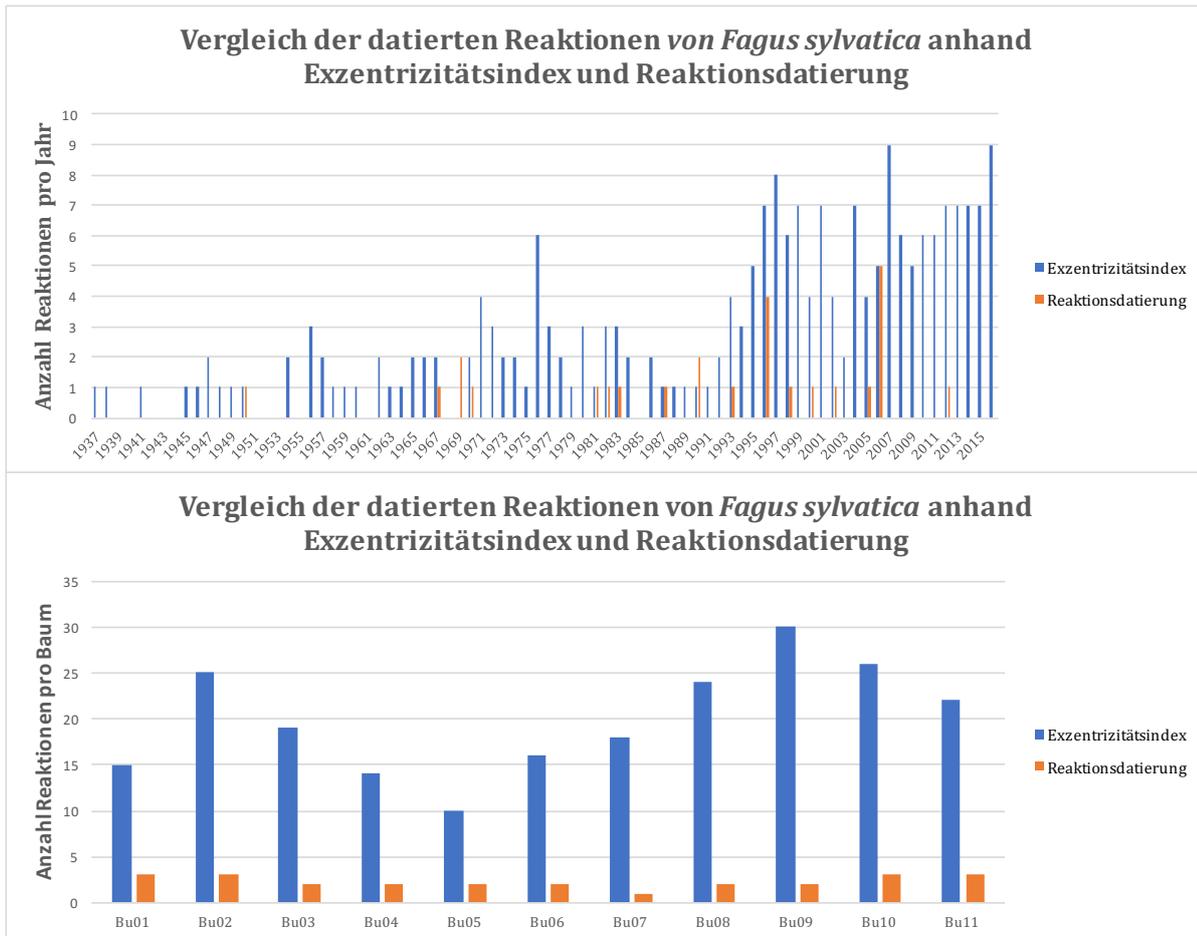


Abb. 40 Vergleich der datierten Reaktionen von *Fagus sylvatica* anhand des Exzentrizitätsindex und der Reaktionsdatierung. Der Vergleich wurde einerseits mit der Anzahl der Reaktionen pro Jahr (oben) und andererseits mit der Anzahl Reaktionen pro Baum (unten) gemacht.

Der Vergleich der Resultate zwischen der visuellen Reaktionsdatierung und des Exzentrizitätsindexes von *Abies alba* ergibt ein ähnliches Muster. Maximal wurden drei Ereignisse pro Baum mit der visuellen Reaktionsdatierung datiert. Der Exzentrizitätsindex registrierte maximal 19 Reaktionen und mindestens zwei Ereignisse pro Baum. Eine Ausnahme stellt die Tanne Wt04 dar, bei welcher mit dem Exzentrizitätsindex kein Ereignis aufgezeichnet wurde. Mit der visuellen Reaktionsdatierung wurde ein Ereignis 1994 in vier Bäumen datiert. Diese Häufung im Jahr 1994 ist mit dem Exzentrizitätsindex, welcher nur eine Reaktion aufzeichnete, nicht erkennbar. Auch 1991 konnte durch die visuelle Reaktionsdatierung in zwei Bohrkernen ein Ereignis nachgewiesen werden, während der Exzentrizitätsindex nur eine Reaktion erkennt. 1955 und 1960 sind die einzigen Jahre, in welchen der Exzentrizitätsindex keine Reaktionen erkennen konnte, mit Hilfe der Reaktionsdatierung jedoch in jeweils einem Bohrkern Druckholz gefunden wurde.

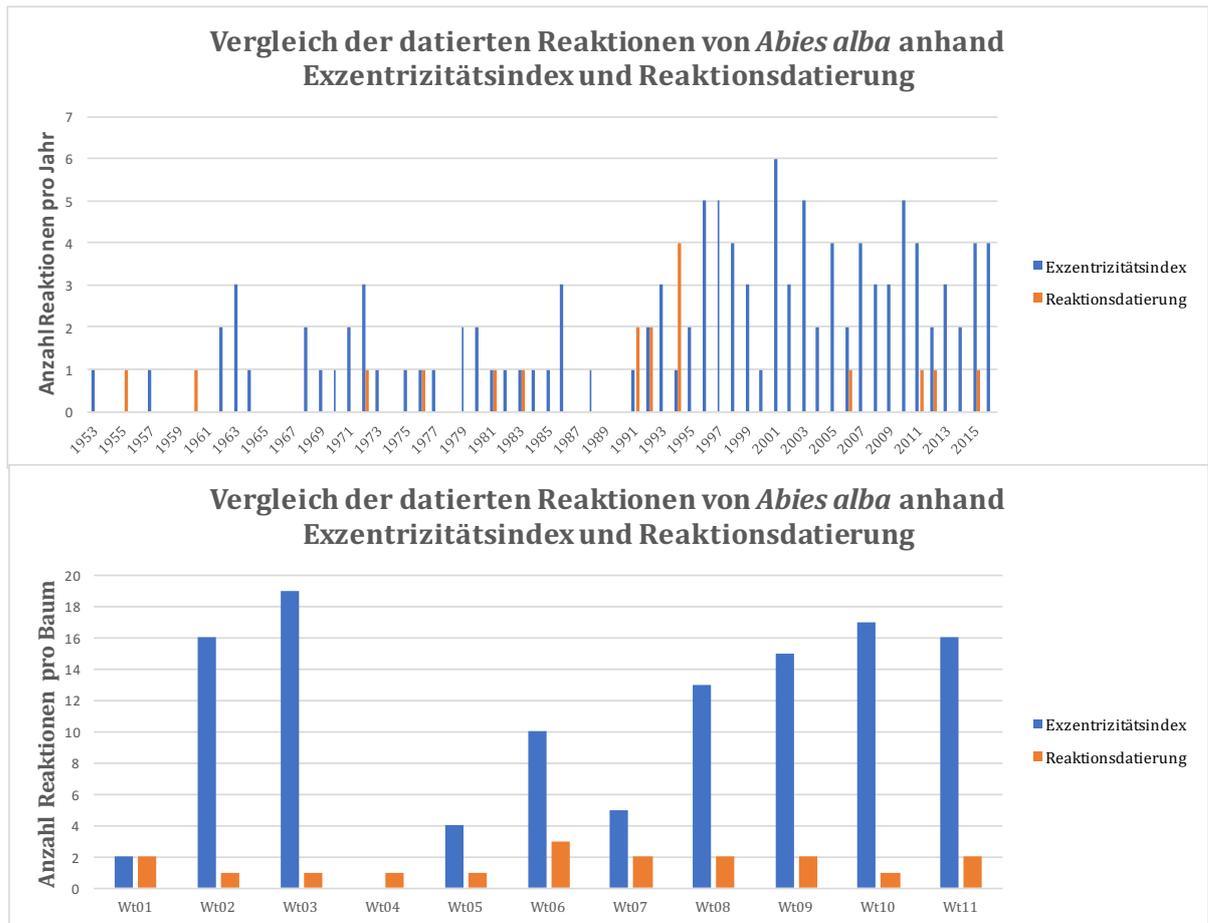


Abb. 41 Vergleich der datierten Reaktionen von *Abies alba* anhand des Exzentrizitätsindex und der Reaktionsdatierung. Der Vergleich wurde einerseits mit der Anzahl der Reaktionen pro Jahr (oben) und andererseits mit der Anzahl Reaktionen pro Baum (unten) gemacht.

5.6 Ergebnisse der Holzanatomie

Um die Resultate der visuellen Reaktionsdatierung zu überprüfen, wurden von den Bohrkernen der Buchen Bu01a, Bu02a, Bu03a, Bu03i, Bu04i, Bu06i und Bu08i Dünnschnitte von jenen Bereichen angefertigt, in welchen anhand der Exzentrizität eine Reaktion bestimmt worden war. Die ca. 15µm dicken Schnitte wurden anschliessend mit 4- und 40fachem Zoom fotografiert, analysiert und ausgewertet. Dabei wurde überprüft, ob die einsetzende Exzentrizität mit dem Einsetzen von Zugholzzellen übereinstimmt. Durch die Analyse der Exzentrizität der Buche Bu01 wurde ein Ereignis im Jahr 2007 datiert. Weil in der Analyse der dazugehörigen Dünnschnittaufnahmen Zugholz in den Spätholzzellen des Jahres 2006 gefunden wurde, musste die Datierung korrigiert werden. In den darauffolgenden Jahren sind breite Jahrringe mit Zugholzzellen deutlich durch die markante, dunkelrote Verfärbung erkennbar (Abb. 42).

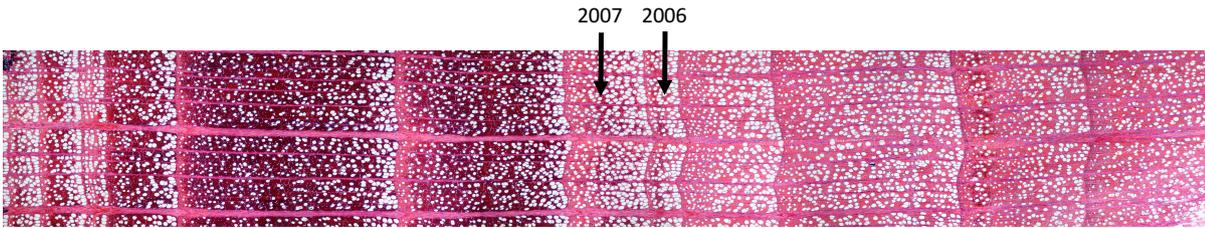


Abb. 42 Dünnschnitt der Probe Bu01i. Die datierte Reaktion wurde auf 2007 festgelegt, bei genauerer Betrachtung ist jedoch Zugholz im Spätholz von 2006 erkennbar.

Dasselbe war auch in den Buchen Bu02a, Bu03a und Bu04i zu beobachten. Die dort identifizierten Ereignisse mussten zunächst durch die visuelle Reaktionsdatierung ebenfalls auf das Jahr 2007 datiert und durch die Dünnschnitte korrigiert. In den Buchen B03i, Bu06i und Bu08i stimmt die Datierung (1996) der visuellen Reaktionsdatierung mit der Analyse der Dünnschnitte überein.

6. Diskussion

Ziel dieser Masterarbeit war es, die Rutschung „Bruust-Haltiwald“ mit Hilfe von dendrogeomorphologischen Analysen zu untersuchen, deren zeitliche und räumliche Ausdehnung sowie ihr Alter zu bestimmen. Zusätzlich wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen den Rutscher Ereignissen und der Niederschlagsmenge im Untersuchungsgebiet besteht. Durch die Datierung der Ereignisse mit Hilfe der Wachstumsreaktionen im Kern konnten die nötigen Informationen zusammengetragen werden, um die Fragestellungen zu beantworten.

Auf Basis der gewonnenen Resultate (siehe Kapitel 5) kann zusammengefasst werden, dass in allen untersuchten Bäumen Reaktionsholz gefunden wurde und somit eindeutig belegt werden kann, dass das Untersuchungsgebiet in Bewegung ist. Ein eindeutiges Bewegungsmuster und somit eine Einteilung des Untersuchungsgebietes in verschiedene Rutschungssektoren konnte jedoch nicht vollzogen werden. Ebenso wenig konnte das genaue Alter der Rutschung bestimmt werden, da das Alter der beprobten Bäume nicht unbegrenzt weit in die Vergangenheit zurückreicht. Die erste datierte Reaktion im Jahr 1950 stellt mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht den Beginn der Rutschung dar. Die zeitliche Datierung der Ereignisse ist dank der Überprüfung mit holzanatomischen Untersuchungen sehr genau. So konnte mit Hilfe der Holzanatomie ein Ereignis einem relativen Zeitpunkt in der Vegetationsperiode zugeteilt werden. Die überdurchschnittlichen Niederschlagssummen in den Jahren, in welchen die Ereignisse auftraten, sind für eine Auslösung sicherlich mitverantwortlich.

6.1 Diskussion der Feldarbeit

Durch die Begehung und die intensive Feldarbeit, welche die Kartierung, die Vermessung mit Hilfe des GPS-Gerätes, die Distanz-Messungen sowie die Beprobung der Bäume beinhaltet, konnte davon ausgegangen werden, dass sich das Untersuchungsgebiet „Bruust-Haltiwald“ noch immer aktiv bewegt. Die vollständige geographische Ausdehnung konnte durch die Kartierung während der Feldarbeit definiert werden, weshalb die Feldarbeit massgeblich für das Verständnis der Schrägstellungen und das Verhalten der Bäume beitrug. Durch die Abgrenzung des Untersuchungsperimeters mit Hilfe von ArcMap auf Basis des hochaufgelösten, digitalen Höhenmodells „SwissALTI3D“ konnte gezeigt werden, dass Wachstumsstörungen der beprobten Bäume auf die Hangbewegungen zurückzuführen sind. Bereits im Gelände konnte der Typ der Rutschung anhand der Schrägstellungen der Bäume sowie der Morphologie des Bodens (Stauchwülste, Querrisse, Längsrisse und Wasseransammlungen) bestimmt werden. Es handelt sich bei der Rutschung „Bruust-Haltiwald“ um eine mittelgründige Rotationsrutschung, deren Gleitfläche in neun Metern Tiefe liegt (Louis, 1999).

Auch durch die Kartierung des Geländes in ArcMap konnte festgestellt werden, dass das Gebiet innerhalb des festgelegten Untersuchungsperimeters in Bewegung ist. Durch den Vergleich der Pixelkarte 1: 25'000 und der Orthophotos aus dem Jahre 2015 konnte eine Verschiebung der zwei Wanderwege festgestellt werden. Schliesst man die Ungenauigkeit der Daten aus, kann man von einer absoluten Bewegung von 10-15m im Zeitraum 2007 bis 2015 ausgehen.

Aus Kontrollmessungen zwischen dem 24.03.2014 und 26.03.2015 der Gemeinde Horw (siehe Abb. 43) geht eine maximale Bewegung von 241cm innerhalb dieses Jahres im Punkt 2 hervor. Die Geschwindigkeit nahm im Herbst 2014 deutlich zu, was mit hohen Niederschlagsmengen im Juli (276.8mm) zu erklären ist. Dabei ist deutlich erkennbar, dass sich der Messpunkt „P2“ am schnellsten bewegt. Messpunkt 3, der oberhalb des zweiten Messpunktes liegt, bewegte sich mit 132cm knapp halb so schnell wie Messpunkt 2. Der Messpunkt 1, der nahe der Schwendelbergstrasse liegt, rutschte 157cm innerhalb dieses Messjahres. Die deutlich grösseren Geschwindigkeiten von Punkt 2 könnten auf höhere Ton- und Mergelgehalte im Boden zurückzuführen sein, was jedoch mit einer geologischen Untersuchung bestätigt werden müsste.

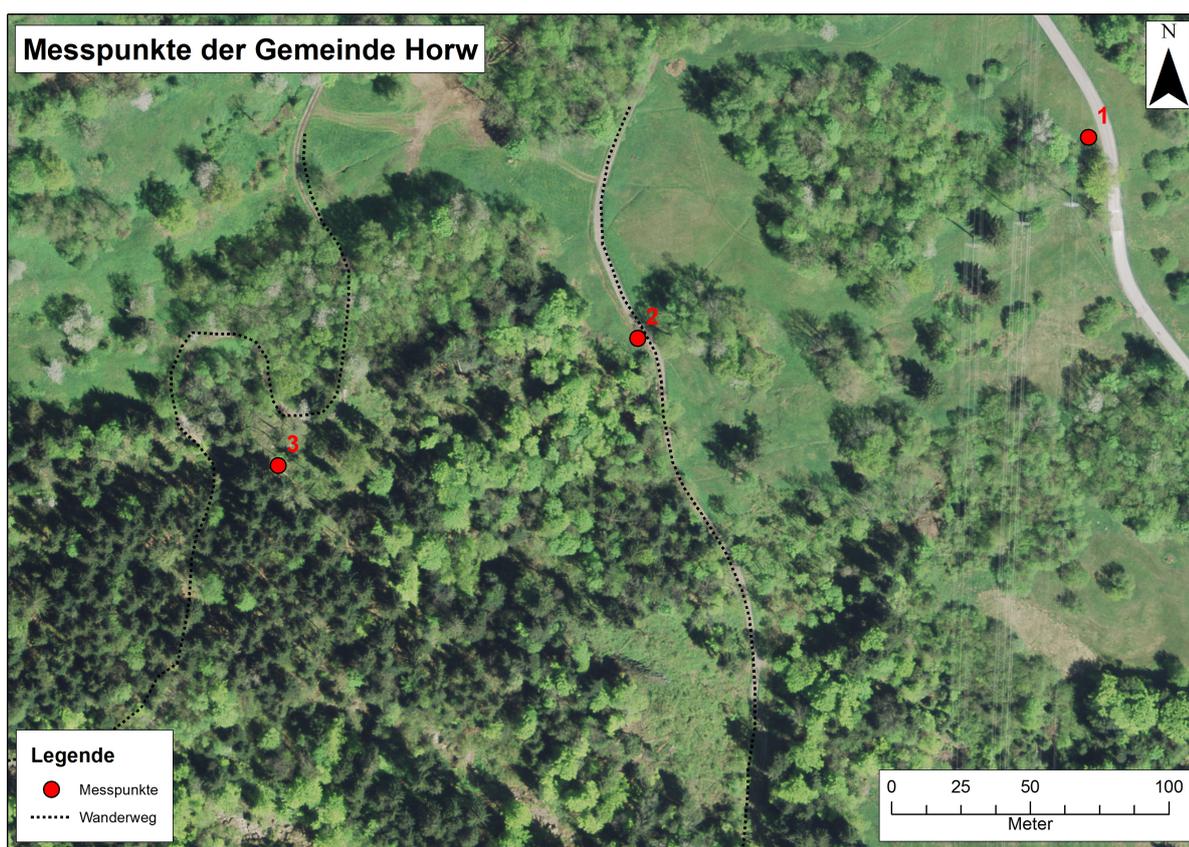


Abb. 43 Messpunkte der Gemeinde Horw entlang einer Linie auf der Rutschung (Hintergrund: Swissimage, ©Swisstopo 2017).

Datum	Messpunkt 1 in cm	Messpunkt 2 in cm	Messpunkt 3 in cm
24.03.14	0	0	0
15.05.14	Total 13cm	Total 12cm	Total 12cm
25.07.14	Total 67cm	Total 68cm	Total 62cm
18.09.14	Total 69cm	Total 128cm	Total 72cm
12.01.15	Total 142cm	Total 214cm	Total 119cm
26.03.15	Total 157cm	Total 241cm	Total 132cm

Tab. 7 Kontrollmessungen der Gemeinde Horw der Rutschung „Bruust-Haltiwald“.

Ausserhalb des zuvor bestimmtem Rutschungsperimeters sind keine Bewegungen erkennbar, woraus gefolgert werden kann, dass der Perimeter richtig gewählt wurde.

6.2 Diskussion Referenzchronologie

Das Erarbeiten einer für das Untersuchungsgebiet relevanten Referenzchronologie im stabilen Gelände erwies sich aufgrund verschiedener Faktoren als schwierig. Der gesamte Hang gehört zur Nach-Eiszeitlichen Rutschung „Rotflue“, weshalb davon ausgegangen wurde, dass sich dieser Teil momentan nicht in Bewegung befindet. Des Weiteren sind keine Anzeichen auf Bewegungen ausserhalb des Untersuchungsgebietes festgestellt worden. Die notwendige Anzahl Bäume, die für eine Referenzchronologie als notwendig beschrieben wird, war in dem vorgegebenen Perimeter nicht zu finden. Es war darauf zu achten, keine Bäume zu beproben, die für spätere wirtschaftliche Zwecke und als Z-Baum (Zukunftsbaum) dienen. Auffälliges, exzentrisches Wachstum konnte in den Bäumen der Referenzchronologie nicht festgestellt werden, jedoch war in den Tannen vereinzelt Anzeichen auf Druckholz zu finden. Durch die penible Auswahl der ungestörten Bäume und das hangparallele Beprobieren konnte die Wahrscheinlichkeit, nicht-klimatische Störungen in den Kernen einzugliedern, minimiert werden. Das Zusammenführen der einzelnen Proben zu einer Mittelkurve, aus welcher nicht passende Individuen ausgeschlossen wurden, erhöhte die Genauigkeit der Kurve. Die genaue Übereinstimmung der Individuen stellt die Verwendung der Mittelkurve als Grundlage für die Kreuzdatierung sicher. Zusätzlich wurden einzelne Bohrkerne der Buchen nachgemessen, um eventuelle Ungenauigkeiten zu eliminieren. Nicht in die Chronologie mit einbezogen wurden wegen zu grosser Ungenauigkeiten die Bäume RB06, RBu07, RBu08 und RBu09. Die Kreuzdatierung und die Jahrringmessung waren bei *Fagus sylvatica* erheblich schwieriger als bei *Abies alba*, was einen erhöhten zeitlichen Datierungsaufwand nach sich zog.

Der Wachstumseinbruch von *Abies alba* in den Jahren 1947 bis 1957 ist damit zu erklären, dass junge Bäume generell ein grösseres Breitenwachstum aufweisen und sensitiver auf Umweltveränderungen reagieren als ihre älteren Artgenossen (Schweingruber, 1996). Die negativen Weiserjahre mit auffallend schmalen Jahrringen, die für beide Arten durch diese Forschungsarbeit festgelegt wurden (1963 und 1976), sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Trockenjahre zurückzuführen. Vergleicht man die Mittelkurve mit den Niederschlagswerten, geht hervor, dass in den genannten Jahren jeweils wenig Niederschlag gefallen ist. Besonders markant ist dies im Jahr 1976, einem der trockensten Jahre des letzten Jahrhunderts im gesamten Alpenraum (Babst et al., 2012).

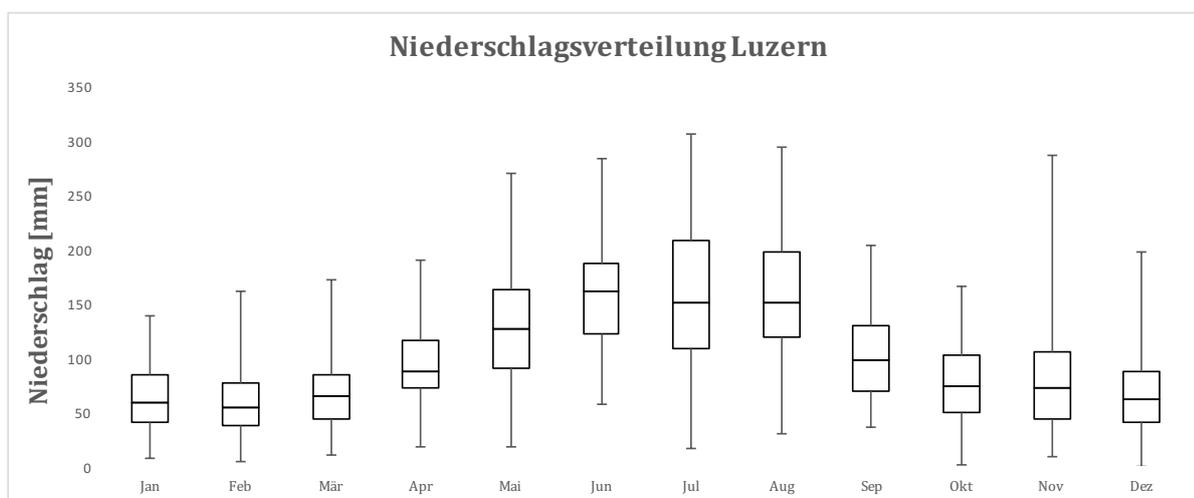


Abb. 44 Monatliche Niederschlagsverteilung in Luzern von 1950 bis 2016. Der kontinentale Niederschlagscharakter ist im Sommer erkennbar. Besonders gross sind die Streuungen in den Monaten Mai, Juli und November. Die Station befindet sich auf einer Höhe von 454 m.ü.M.

6.3 Diskussion des Exzentrizitätsindex

Obwohl für den Exzentrizitätsindex dieselben Daten verwendet wurden wie für die Reaktionsdatierung, stimmen die Ergebnisse (siehe Kapitel 5.5) nicht überein. Aus diesem Grund konnte keine quantitative Bestätigung der Resultate mittels des Exzentrizitätsindexes bewerkstelligt werden.

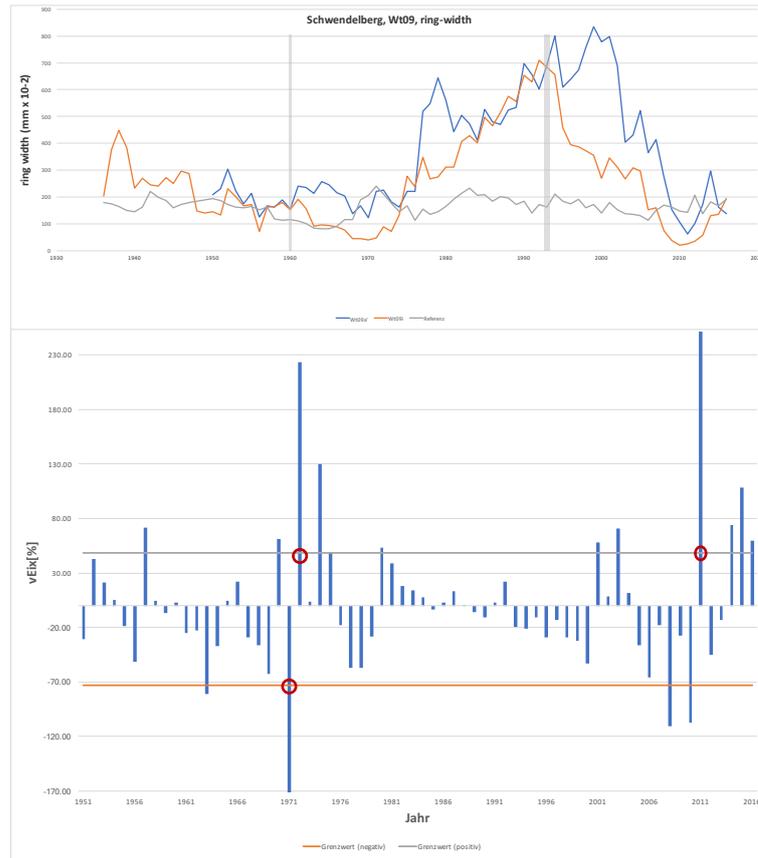


Abb. 45 Datierte Reaktionen aus der Reaktionsdatierung (oben) und dem Exzentrizitätsindex (unten). Die grauen Balken markieren die mit der Reaktionsdatierung datierten Ereignisjahre (1960 und 1994). Diese Jahre werden mit dem Exzentrizitätsindex nicht als Ereignisjahre erkannt. Die roten Kreise zeigen die anscheinend offensichtlichsten Ereignisse.

Beim Vergleich des Exzentrizitätsindexes mit der Reaktionsdatierung fällt auf, dass die Ereignisjahre, die mit der Reaktionsdatierung als sicher klassifiziert wurden, beim Exzentrizitätsindex den gesetzten Schwellenwert bei weitem nicht erreichen. Am Beispiel der Probe Wt09 wurden die Jahre 1960 und 1994 als sicher klassifiziert. Das vom Index interpretierte Signal im Jahre 1960 mit dem Wert $\langle vEi_x \rangle = 3.01$ erreicht den gesetzten Schwellenwert von 48.29 nicht. Dasselbe Muster ist 1994 zu sehen, in welchem $\langle vEi_x \rangle = -20.7$ beträgt, während der Schwellenwert bei -73.02 gesetzt ist. Es ist offensichtlich, dass der Index keine Folgejahre in seiner Berechnung berücksichtigt. Die Interpretation des Indexes, welche zulässt, dass nach einem initialen Ereignis die Folgejahre ebenfalls den Schwellenwert übersteigen und somit als Auslöserjahre definiert werden, wird für das Untersuchungsgebiet „Bruust-Haltwald“ als nicht anwendbar gesehen. Daher ist anzunehmen, dass die berechneten Schwellenwerte für das Untersuchungsgebiet nicht geeignet sind und somit auch nicht angewandt werden können. Obwohl die Voraussetzungen von Wistuba et al. (2013) für eine Anwendung des Indexes gegeben sind, nämlich, dass die geomorphologischen Störungen das Wachstum der untersuchten Bäume beeinflussen, konnte der Index die Reaktionsdatierung nicht ergänzen, geschweige denn ersetzen.

Da die Werte von «vEi_x» häufig weit hinter den Schwellenwerten zurückbleiben, würde eine Anpassung der Schwellenwerte ebenso wenig den gewünschten Effekt erzielen. Selten stimmen die Jahre der Reaktionsdatierung mit einem indexbasierten Jahr überein, woraus gefolgert werden kann, dass der Exzentrizitätsindex von Wistuba et al. (2013) nicht im Untersuchungsgebiet angewendet werden kann. Laut Wistuba et al. (2013) ist der Index in Gebieten anwendbar, welche nur durch ein Ereignis beeinflusst werden.

In einem geomorphologisch aktiven Gebiet, in dem es mehrfach zu Bewegungen des Untergrundes kommen kann, ist es denkbar, dass ein zweites Ereignis stattfindet, während der Baum noch immer die Schrägstellung des ersten Ereignisses kompensiert. Eine solche Reaktion wird nur durch die Divergenz in der Wachstumskurve und durch die visuelle Analyse des Bohrkerns erkennbar sein, nicht aber durch einen erneuten Anstieg des Exzentrizitätswertes «vEi_x». Weiter sollte berücksichtigt werden, dass der Anstieg von «vEi_x» durch plötzlich auftretende Exzentrizität zwar ein Ereignis erkennen kann, der Index jedoch nicht im Stande ist, den genauen Zeitpunkt eines Ereignisses zu bestimmen. Wenn ein Ereignis gegen Ende der Vegetationsperiode stattfindet, wird der Index nicht in der Lage sein, dieses zu erkennen, da das exzentrische Wachstum erst im nächsten Jahr erkennbar sein wird. Diese Überprüfung ist bei einer visuellen Reaktionsdatierung leichter und kann direkt während der Analyse unter dem Mikroskop vorgenommen werden.

6.4 Diskussion der Ereignisanalyse

Die Diskussion der Ereignisse wird in die entsprechenden Ereignisjahre aufgeteilt. Signale, die in mindestens zwei Bohrkernen gefunden wurden, werden aufgezeigt. Durch die dendrogeomorphologische Analyse von 44 Bohrkernen, die aus 22 Bäumen entnommen wurden, konnten 43 Signale datiert werden.

1950 bis 1959

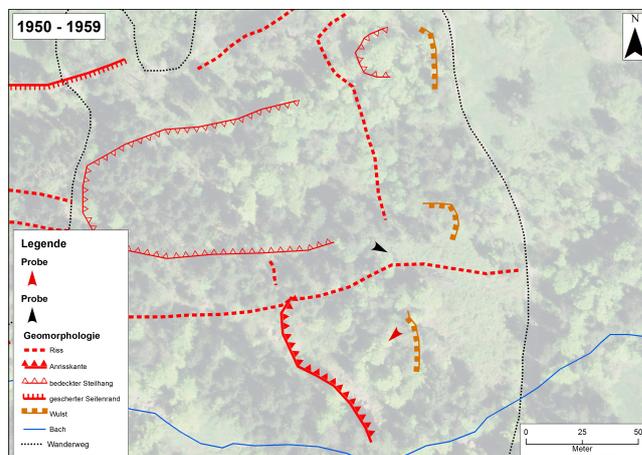


Abb. 46 Ereignisanalyse von 1950 bis 1959 (Hintergrund: Swisimage, ©Swisstopo 2017).

In diesem ruhigen Jahrzehnt registrieren nur zwei Bäume Bewegungen im Untergrund. Sie befinden sich beide in der Nähe des von West nach Ost verlaufenden Risses im südlichen Teil der Rutschung. Die Bewegungsrichtung der Rutschung ist daher auf die orographisch rechte Seite beschränkt.

1960 bis 1969

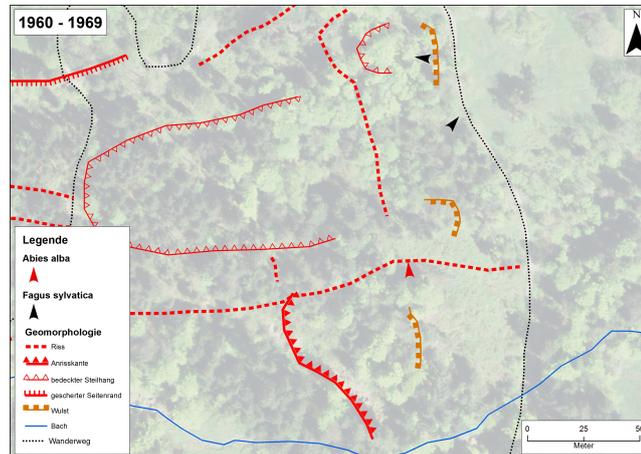


Abb. 47 Ereignisanalyse von 1960 bis 1969 (Hintergrund: Swissimage, ©Swisstopo 2017).

In den 10 darauffolgenden Jahren gerät der nördliche Teil ins Rutschen und es werden Bewegungen in drei Bäumen registriert. Die Hangbewegungen sind nun auch auf der orographisch linken Seite des Untersuchungsgebietes zu erkennen. Die Probe Bu11 registriert im Jahr 1969 die erste Bewegung und reagiert mit Zugholz. Der Baum Wt11, welcher direkt neben Bu11 steht, registriert diese Bewegung erst drei Jahre später, nämlich 1972 und beginnt in diesem Jahr mit der Bildung von Druckholz. Warum der jüngere Baum erst drei Jahre später auf das Ereignis reagiert, ist aus den erhobenen Daten nicht ersichtlich. Zur Klärung dieses Sachverhaltes wären weitere Analysen und die Untersuchung der Stammscheiben erforderlich.

1970 bis 1979

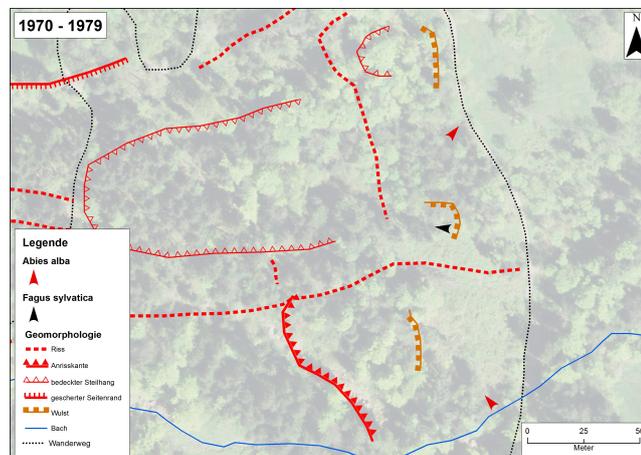


Abb. 48 Ereignisanalyse von 1970 bis 1979 (Hintergrund: Swissimage, ©Swisstopo 2017).

Von 1970 bis 1979 wurden ebenfalls drei Signale in den Bäumen entdeckt. Aufgrund der Beschaffenheit des Untergrundes kippen Bu10 und Wt07 in Richtung des Hanges und bilden Reaktionsholz. Daraus lässt sich eine rotierende Bewegung des Untergrundes ableiten, was im Feld ebenfalls deutlich sichtbar ist. Grosse Residualblöcke wurden im Bereich der unteren Anrisskante durch die Bewegungen aus der Erde gehoben. Die Bewegungen erfolgen nun über die gesamte Breite des Hanges.

Eine mögliche Erklärung für die Verzögerung der Schrägstellung der Tanne Wt11 ist, dass sie ausserhalb der 1969 initiierten Bewegung steht und deshalb erst drei Jahre später, als der Hang sich nun etwas südlicher bewegte, schrägstellte. Diese Theorie wird durch die Schrägstellung von Wt07 im Jahre 1976 unterstützt. Auch dieser Baum liegt südlich von Bu11, was heisst, dass in den 70er-Jahren nur Bäume südlich von Bu11 Bewegungen zeigten. Es scheint, als ob diese Bewegungen durch den südlichen Anriss initiiert wurden.

1980 bis 1989

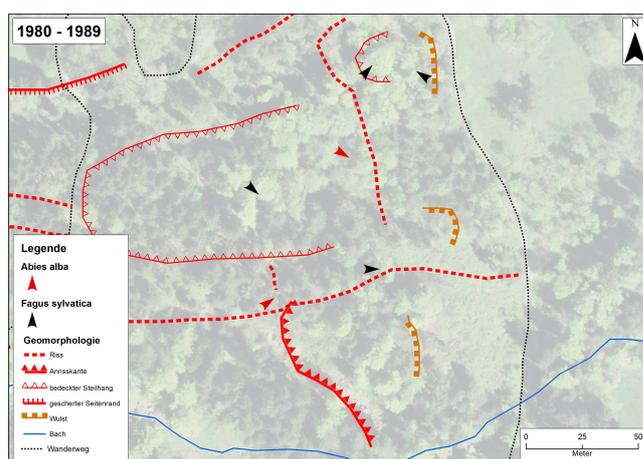


Abb. 49 Ereignisanalyse von 1980 bis 1989 (Hintergrund: Swisimage, ©Swisstopo 2017).

Die Ausdehnung der Bewegung begrenzt sich zwischen 1980 und 1989 auf den nördlichen Teil des von West nach Ost verlaufenden Risses. Die Bewegung erfolgt im Bereich unterhalb der grossen Anrisskante des Untersuchungsgebietes. Zuerst von der Bewegung erfasst wurden die Proben Bu08 und Wt06 im Jahr 1981, direkt neben dem Riss. Danach breitete sich die Bewegung weiter in Richtung Norden aus und wurde 1982, ein Jahr später, vom Baum Bu06 registriert, der in der Mitte des Steilhanges steht. Anschliessend wurden, wiederum ein Jahr später, 1983 die Bäume Bu05 und Wt01 schräggestellt, ebenfalls in die Richtung der Hangneigung. Vier Jahre später wurde der Baum Bu01, der vor der Stauchwulst steht, entgegen der Hangrichtung gekippt und zeigt somit ebenfalls die rotierende Bewegung des Untergrundes an. Es ist anzunehmen, dass sich die Bewegungen von der oberen Anrisskante in zwei Richtungen fortpflanzen.

1990 bis 1999

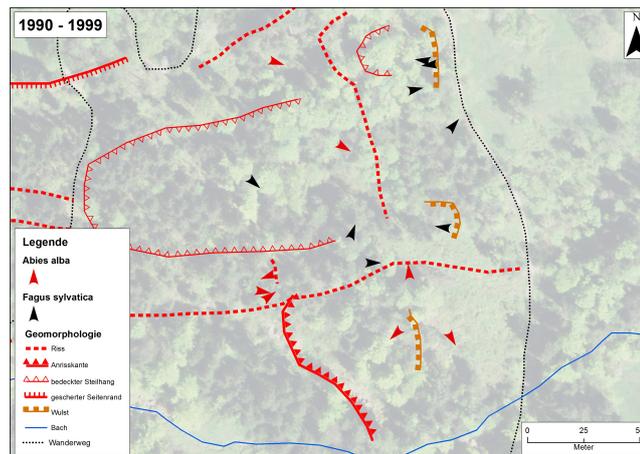


Abb. 50 Ereignisanalyse von 1990 bis 1999 (Hintergrund: Swissimage, ©Swisstopo 2017).

In den 90er Jahren wurden die meisten Bewegungssignale datiert. Es wurden insgesamt 16 Signale datiert und analysiert. Die ersten Bewegungen wurden 1990 in den Bäumen Bu02 und Bu10, folglich im unteren Bereich des Hangs nördlich des langen Risses, registriert. Anschliessend wurden 1991 die Bäume Wt02 und Wt04 schräggestellt, worauf auf einen erneuten Bewegungsimpuls von der oberen Anrisskante geschlossen werden kann. Wt06 und Wt09 wurden im Jahr darauf, 1992, von der Bewegung erfasst und in Richtung der Hangneigung schräggestellt. Diese Bewegung wurde von der benachbarten *Fagus sylvatica* Probe Bu07 1993 registriert, die ebenfalls mit einer Schrägstellung reagierte. Darauf folgten die ganz deutlichen Markerjahre, die von vier Bäumen registriert wurden. So wurden 1994 die Bäume Wt03, Wt05, Wt08 und Wt10 schräggestellt, woraus hervorgeht, dass sich die Bewegung beinahe über die ganze Breite des Hanges erstreckt. Auch 1994 wurde Reaktionsholz kombiniert mit exzentrischem Wachstum in vier Bäumen entdeckt, nämlich in Bu02, Bu06, Bu08 und Bu11, wobei sich hier die Bewegung auf den Teil nördlich des Risses beschränkt. Hier wurde wieder zuerst der Baum Bu11 schräggestellt, bevor der benachbarte Baum Wt11 rund 11 Jahre später Druckholz zeigte. 1998 reagierte der Baum Bu04, der am Rande der nördlich liegenden Buchengruppe steht, mit Schrägstellung.

2000 bis 2009

In der Zeit von 2000 bis 2009 beschränken sich die Hangbewegungen wieder auf den linken Bereich der Rutschung (orographisch). Zuerst wurde der Baum Bu01 zum Hang schräggestellt und erfuhr eine rotierende Untergrundbewegung im Jahre 2007. 2002 erfasste die Bewegung den Baum Bu09 und drei Jahre später auch Bu05, der oberhalb der Buchengruppe steht und in nordöstliche Richtung schräggestellt wurde. 2006 wurde in sechs Bäumen Reaktionsholz gefunden, was wiederum eindeutig auf ein sicheres Ereignis schliessen lässt.

Registriert wurde dieses von den Bäumen der gesamten Buchengruppe (Bu01, Bu02, Bu03, Bu04) und zusätzlich von der Baumgruppe, die zum ersten Mal zusammen auf ein Ereignis reagierte (Wt11 und Bu11). Erstaunlich ist die eher geringe Niederschlagsmenge in diesem Jahr, die keine Korrelation zulässt.

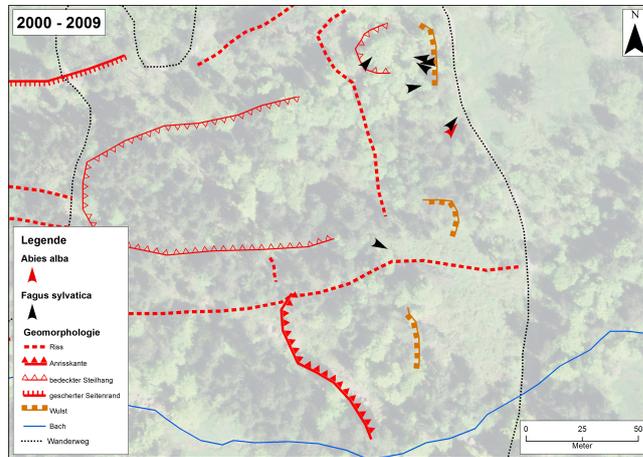


Abb. 51 Ereignisanalyse von 2000 bis 2009 (Hintergrund: Swisimage, ©Swisstopo 2017).

2010 bis 2016

2011 wurde der Baum Wt06 ein zweites Mal von der Hangbewegung erfasst und in Richtung der Hangneigung schräggestellt, wobei die Druckholzbildung bis heute anhält. Wt07 und Bu10 wurden 2012 schräggestellt. Die Bäume befinden sich unterhalb von Wt06, woraus sich eine Fortpflanzung der Hangabwärtsbewegung deduzieren lässt. Die letzte datierte Reaktion ereignete sich im Jahr 2015, in welchem der Baum Wt01 exzentrisches Wachstum und Druckholzbildung zeigte. Dieser Baum steht nördlicher als die in diesem Jahrzehnt bewegten Bäume und ist hangabwärts schräggestellt.

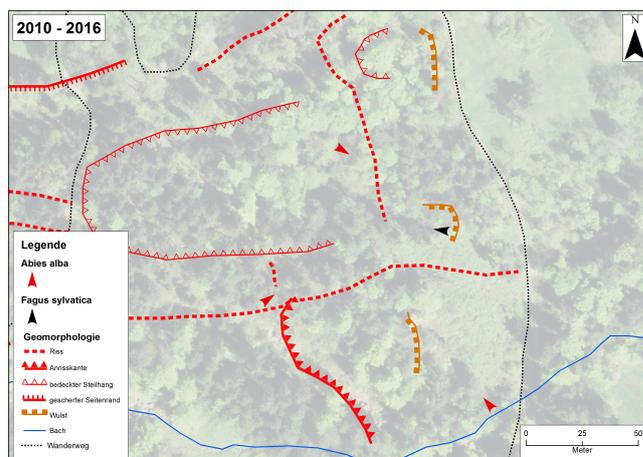


Abb. 52 Ereignisanalyse von 2010 bis 2016 (Hintergrund: Swisimage, ©Swisstopo 2017).

Abschliessend ist zu sagen, dass die zeitliche Auflösung genau bestimmt werden konnte, während über die räumliche Auflösung nur vage Aussagen gemacht werden konnten, da sich die Bewegung meist lokal und nicht nachvollziehbar ereigneten. Die Bewegungen sind oft nicht zusammenhängend, scheinen sich jedoch in zwei Bahnen zu ereignen. Aufgrund der registrierten Schrägstellungen konnte folgende Karte (Abb. 53) erstellt werden, welche die Bewegungen der Rutschung darzustellen versucht. Die Tannen und Buchen reagieren unabhängig ihres Standorts auf die Ereignisse. Eine Einteilung in einen nördlichen sowie südlichen Teil der Rutschung kann gemacht werden, da die Bewegungen am häufigsten in jeweils einer dieser Zonen aufgezeichnet wurden. Ein Bewegungsmuster innerhalb dieser Zonen wurde nicht erkannt. Die Bewegungen des südlichen Teils der Rutschung werden von der ebenfalls äusserst mächtigen Anrisskante direkt oberhalb der Tanne Wt08 ausgelöst. Ob die Bewegungen des nördlichen und südlichen Teils zusammenhängen, konnte nicht festgestellt werden. Das einzige Ereignis, welches sich räumlich klar abgrenzen lässt, ist jenes von 2006, welches in sechs Bäumen aufgezeichnet wurde. Aufgrund der Kippbewegung der Bäume und der Stauchwulst unterhalb geht hervor, dass es sich um eine rotierende Bewegung des Untergrundes handelt. Dies unterstützt erneut die Aussage, dass es sich um eine Rotationsrutschung handelt. Das Gebiet anhand der Bewegungen in Bereiche aufzuteilen scheint hier wenig sinnvoll, weshalb die Analyse nach Ereignisjahren abgehandelt wurde.

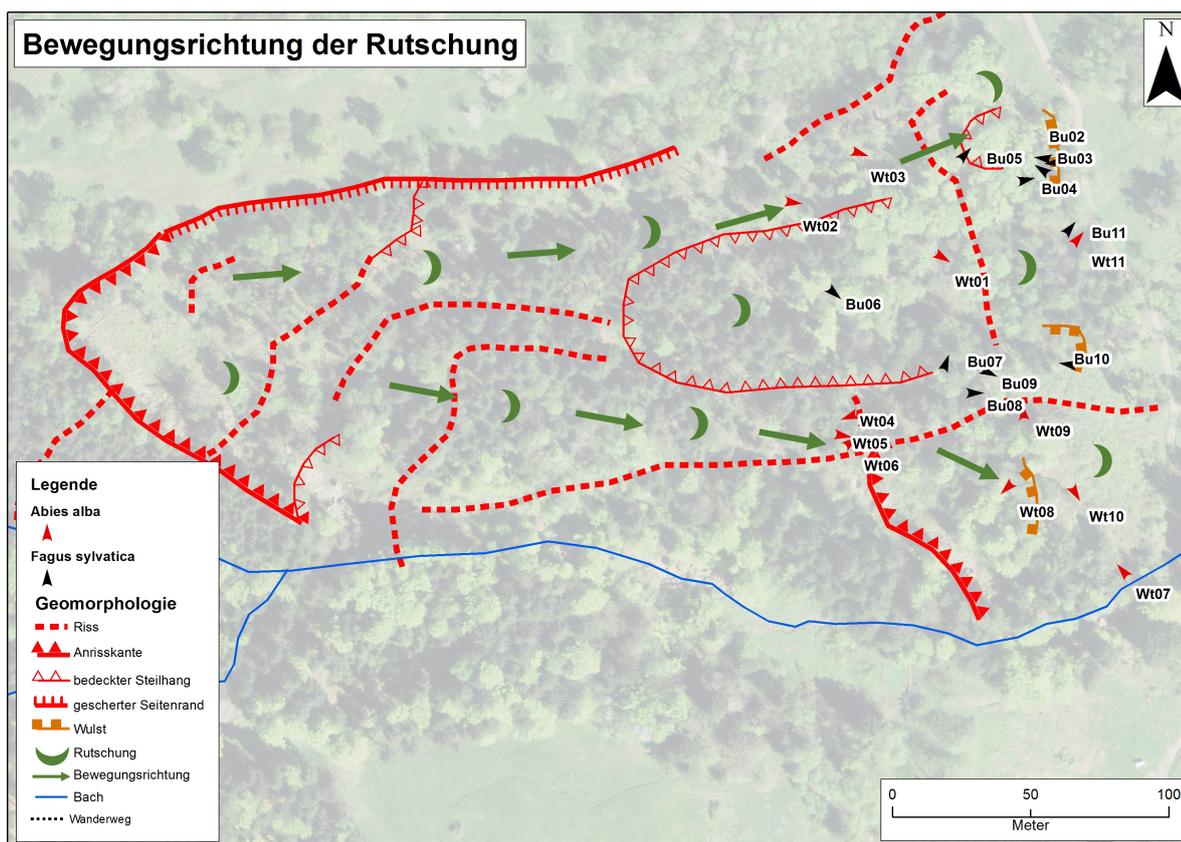


Abb. 53 Aufteilung des Untersuchungsgebietes anhand der Bewegungsrichtung der Rutschung (Hintergrund: Swisssimage, ©Swisstopo 2017).

Eine mögliche Erklärung für das fehlende Muster liefern Shroder (1980) und Carrara & O'Neill (2003), die besagen, dass Reaktionen auf ein Ereignis auch erst ein oder sogar mehrere Jahre danach in den Jahrringen auftreten können. Auch die Grösse des Datensatzes mit 22 Individuen befindet sich am unteren Ende der vorgeschlagenen Anzahl. Nach Corona et al. (2014) werden Datensätze mit bis zu 50 Individuen als klein und Datensätze um 100 Individuen als optimal erachtet. Laut Denneler & Schweingruber (1993) ist es einfacher, einmalige, deutliche Ereignisse zu datieren, als weniger deutliche, wiederkehrende Ereignisse. Deshalb ist anzunehmen, dass nicht alle Reaktionen im definierten Untersuchungsgebiet entdeckt und datiert werden konnten.

Eine weitere Fehlerquelle geht aus der Analyse der Dünnschnitte hervor, die von sieben Proben angefertigt wurden. Bei vier der sieben Proben musste die Datierung angepasst werden, da bereits im Spätholz des Vorjahres Druckholz zu finden war. Šilhán & Stoffel (2015) beschreiben eine Fehlerquote beim Vergleich von Exzentrizität und der makroskopischen Analyse angefertigter Dünnschnitte. Diese Tatsache stellt bei der jahrgenaue Datierung ein erhebliches Problem dar. Um die Genauigkeit in der jahrgenaue Datierung von Rutschereignissen zu gewährleisten, ist es folglich unerlässlich, nebst der Analyse der Exzentrizität auch Dünnschnitte zu konsultieren.

Grundlage dafür ist das Bohrkernmikrotom, welches Dünnschnitte über den ganzen Kern und somit über eine lang Zeitreihe ermöglicht. Laut Heinrich & Gärtner (2008) ist dies nützlich, um die Datierungen mit zusätzlichen Informationen abzustützen oder sogar zu verbessern.

7. Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Gebiet „Bruust-Haltiwald“ mittels dendrogeomorphologischer Analysen auf Hangbewegungen untersucht. Die jahrgenaue Auflösung der Ereignisse reicht bis in die 1950er-Jahre zurück, wobei die möglichen Fehlerquellen im Kapitel 6 aufgezeigt wurden.

Grundlage dieser Arbeit waren die genaue Prozessbestimmung und Kartierung im Feld, die in Kombination mit der Jahrringanalyse exakte Aussagen über die Hangbewegungen ermöglichten. Die Jahrringanalyse alleine vermag lediglich Aussagen über Wachstumsstörungen zu machen, wenn das Untersuchungsgebiet durch vorhergehende Feldarbeiten untersucht wurde. Dadurch konnte festgestellt werden, dass es sich bei den Hangbewegungen, die für die Wachstumsstörungen verantwortlich sind, um eine mittelgründige Rotationsrutschung (siehe Kapitel 2.2.1) handelt.

Insgesamt wurden 27 Rutschphasen zwischen 1950 und 2015 datiert. Um die Qualität zu erhöhen, wurden neben der klassischen Exzentrizitäts-Analyse zusätzlich Dünnschnitte von ausgewählten Proben hergestellt, wodurch datierte Ereignisse teilweise korrigiert werden mussten. Da von dem Gebiet keine historischen Daten über Ereignisse vorhanden sind, konnte kein Abgleich mit bekannten Ereignissen gemacht werden. Es wurde jedoch deutlich gezeigt, dass das Gebiet seit den 1950er-Jahren immer wieder in Bewegung geraten ist und eine Abnahme der Bewegungen nicht zu erwarten ist. Eine genaue und zusammenhängende Auflösung dieser Bewegungen zeigte sich aufgrund vieler einzelner und nicht zusammenhängender Ereignisse als äusserst schwierig. Aus den analysierten Niederschlagsdaten geht hervor, dass in Jahren mit überdurchschnittlichen Niederschlägen häufig Rutschungen ausgelöst wurden, woraus sich schliessen lässt, dass der Auslösemechanismus mit dem Niederschlag korreliert.

Die holzanatomische Analyse diente im Rahmen dieser Arbeit der Überprüfung der jahrgenaue Datierung von Ereignissen. Daraus ging hervor, dass diese Technik zwar sehr aufwändig ist, jedoch viele wichtige Zusatzinformationen liefert. Lediglich die technische Bearbeitung der Bohrkerns und die Datenverarbeitung stellten ein Problem dar, weshalb von nur ausgewählten Kernen Dünnschnitte angefertigt wurden.

Die Resultate des Exzentrizitätsindex von Wistuba et al. (2013) wurden in der Diskussion nicht berücksichtigt, da der Vergleich mit der Reaktionsdatierung keine Übereinstimmung ergab. Eine Überprüfung des Indexes auf weitere Untersuchungsgebiete wird durch die Autoren als sinnvoll und notwendig erachtet.

Limitierende Faktoren dieser dendrogeomorphologischen Rekonstruktion sind einerseits die Grösse des Datensatzes und andererseits das Alter der beprobten Bäume. Auch die räumliche Begrenzung der beprobten Bäume im Untersuchungsgebiet sollte bei einer weitergehenden Analyse überdacht werden. Laut Louise (1999) befindet sich die Rutschung „Rotflue“ noch immer in Bewegung, weshalb eine Arbeit entlang eines Transekts entlang des ganzen Hanges unterhalb der „Rotflue“ wichtig wäre, um die Bewegungen im Untersuchungsgebiet besser nachzuvollziehen.

8. Literaturverzeichnis

- Ahnert, F. (2009): Einführung in die Geomorphologie. 4. Auflage. Eugen Ulmer KG, Stuttgart.
- Babst, F., Carrer, M., Poulter, B., Urbinati, C., Neuwirth, B. & Frank, D. (2012): 500 years of regional forest growth variability and links to climatic extreme events in Europe. *Environ. Res. Lett.* 7, 045705 (11pp).
- Bamber, R. K. (2001): A general theory for the origin of growth stresses in reaction wood: how trees stay upright. *IAWA Journal* 22, 205-212.
- Becker, B. (1992): The history of dendrochronology and radiocarbon calibration. In: Taylor, R. E., Long, A., Kra, R. S. (Eds.): *Radiocarbon after Four Decades: An Interdisciplinary Perspective*. Springer Verlag, Heidelberg, 34-49.
- Bucher, H. U. & Sieber, M. (2000): Die grössten Bäume Europas sind Weisstannen. *Faktenblätter zur Weisstanne (Abies alba)*. Fachstelle für Gebirgswaldpflege (GWP).
- BAFU (Bundesamt für Umwelt), (2014): *Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren*. Umwelt-Vollzug. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt), (2015): *Rutschungen, Faktenblätter Gefahrenprozesse. Abteilung Gefahrenprävention*. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BUWAL, BWW, BRP, (1997): *Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bern. In: Heinemann, H. R., Hollenstein, K., Kienholz, H., Krummenacher, B. & Mani, P. (1998): *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren*. Umwelt Materialien, Nr. 85. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft), (1998): *Ereignisdokumentation Sachseln – Unwetter vom 15. August 1997*. Studienbericht Nr. 8 / 1998, 48.
- Carrara, P. E. & O'Neill, J. M. (2003): Tree-ring dated landslide movements and their relationship to seismic events in southwestern Montana, USA. *Quaternary Research* 59, 25-35.
- Casale, R. & Margottini, C. (Eds.) (1999): *Floods and Landslides*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- Chen, R., Rosen, E. & Masson P. H. (1999): Gravitropism in higher plants. *Plant Physiology* 120, 343-350.

- Cherubini, P., Fontana, G., Rigling, D., Dobbertin, M., Brang, P. & Ines, J. (2002): Tree-life history prior to death. Two fungal root pathogens affect tree-ring growth differently. *Journal of Ecology*, Vol. 90, 839-850.
- Climate-Data (2017): Klima und Wetter in Horw. «<https://de.climate-data.org/location/22124/>», (Zugriff: 11.07.2017).
- Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A. (1990): *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer, Dordrecht, Boston, London.
- Corona, C., Lopez Saez, J. & Stoffel, M. (2014): Defining optimal sample size, sampling design and thresholds for dendrogeomorphic landslide reconstruction. *Quaternary Geochronology* 22, 72-84.
- Coutand, C., Jeronimidis, G., Chanson, B. & Loup, C. (2004): Comparison of mechanical properties of tension and opposite wood in *Populus*. *Wood Science and Technology* 38, 11-24.
- Cruden, D. M. (1991): A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 43, Number 1, 27-29.
- Cruden, D. M. & Varnes, D. J. (1996): *Landslide Types and Processes*. In: Turner, A. K. & Schuster, R. S. (Eds.): *Landslide Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247. National Academy of Science, Washington D. C.
- Denneler, B. & Schweingruber, F. H. (1993): Slow mass movement. A dendrogeomorphological study in Gams, Swiss Rhine Valley. *Dendrochronologia* 11, 55-67.
- Du, S. & Yamamoto, F. (2007): An overview of the biology of reaction wood formation. *Journal of Integrative Plant Biology* 49, 131-143.
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (2007): *Glossary of Dendrochronology*. Gleichläufigkeit. «http://www.wsl.ch/dienstleistungen/produkte/glossare/dendro_glossary/viewImage_EN?id=130», (Zugriff: 18.07.2017).
- Erdwissen (2016): Ein Ausflug auf einen der nördlichsten Ausläufer der Alpen. «<http://www.erdwissen.ch/2016/10/ein-ausflug-auf-den-noerdlichsten-auslaeufer-der-alpen/>», (Zugriff: 13.09.2017).
- ETH Zürich (1995): *Fagus sylvatica L.* Professur für Waldbau und Professur für Forstschutz & Dendrologie.
- Evans, D. J. A. & Kirkby, M. (2004): *Geomorphology: critical concepts in geography*. Hillslope geomorphology, Vol. 2. London.
- Fritts, H. C. (1976): *Tree Rings and Climate*. London, New York and San Francisco. Academic Press.

- Fritts, H. C. & Setnam, T. W. (1989): Dendroecology: A Tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments. *Advances in Ecological Research* 19, 111-189.
- Gärtner, H. & Heinrich, I. (2009): The formation of traumatic rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* (Pinaceae) as a result of wounding experiments in the dormant season. *IAWA Journal* 30, 199-215.
- Gärtner, H. & Heinrich, I. (2010): Anatomie des cernes annuels chez les arbres et les arbustes. Chapter 2 in: Payette, S. et L. Fillon (éds.), *La Dendroécologie: Principes, méthodes et applications*. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 33-60.
- Gärtner, H. & Heinrich, I. (2013): Glacial Landforms, Tree Rings. *Dendrogeomorphology*. *Encyclopedia of Quaternary Science*, Vol. 2, 91-103.
- Gärtner, H. & Nievergelt, D. (2010): The core-microtome: A new tool for surface preparation on cores and time series analysis of varying cell parameters. *Dendrochronologia*, Vol. 28, Issue 2, 85-92.
- Gärtner, H. & Schweingruber, F. H. (2013): *Microscopic Preparation Techniques for Plant Stem Analysis*. Verlag, Dr. Kessel.
- Gärtner, H., Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D., Grichting, M. & Monbaron, M. (2003): Debris-flow frequency derived from tree-ring analyses and geomorphic mapping, Valais, Switzerland. In: Rickenmann, D. & Chen, Ch. (Eds.) (2003): *Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. Vol. 1, 207-217.
- Gärtner, H., Banzer, L., Schneider, L., Schweingruber, F. H. & Bast, A. (2015): Preparing micro sections of entire (dry) conifer increment cores for wood anatomical time-series analyses. *Dendrochronologia*, Vol. 34, 19-23.
- Gemeinde Horw (2017): *Unsere Gemeinde. Zahlen und Fakten*. Geographie. «<http://www.horw.ch/de/portrait/portraitzahlen/zahlengео/>», (Zugriff: 11.07.2017).
- Goudie, A. S. (1995): *The changing earth: rates of geomorphological processes*. The natural environment. Oxford.
- Goudie, A. S. (2006): *Encyclopedia of Geomorphology*. Vol. 2. J-Z. Routledge, New York.
- Heinimann, H. R., Hollenstein, K., Kienholz, H., Krummenacher, B. & Mani, P. (1998): *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren*. Umwelt Materialien, Nr. 85. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- Heinrich, I. & Gärtner, H. (2008): Rekonstruktion von Massenbewegungen mithilfe der Holz Anatomie. *Schweiz. Z. Forstwes.* 159, 58-65.

- Hufschmidt, G., Crozier, M. & Glade, T. (2005): Evolution of natural risk: research framework and perspectives. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 375-387.
- Hupp, C. R., Osterkamp, W. R. & Thornton, J. L. (1987): Dendrogeomorphic evidence and dating of recent debris flows on Mount Shasta, northern California. U. S. Geological survey professional paper, 1396 (B), 1-34.
- IPCC, (2014): Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (Eds.)] IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp.
- Klein, P. & Eckstein, D. (1988): Die Dendrochronologie und ihre Anwendung. *Spektrum der Wissenschaft* 1, 56-68.
- Kogelnig-Mayer, B., Stoffel, M. & Schneuwly-Bollschweiler, M. (2013): Four-dimensional growth response of mature *Larix decidua* to stem burial under natural conditions. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Kopp, J. (1961): Nationalstrasse N2. Teilstück Ennethorw-Kantonsgrenze. Geologische Detailkarte 1: 1'000. Geologische Dokumentationsstelle SCD Nr. 2462.
- Krummenacher, B. & Tobler, D. (2009): Teil B: Anwendung des Risikokonzepts: Prozess spontane Rutschung/ Hangmuren. Risikokzept für Naturgefahren – Leitfaden. Schweizerische Eidgenossenschaft. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT.
- Kubler, H. (1991): Function of spiral grain in trees. *Trees. Structure and Function*. Vol. 3, Issue 5, 125-135.
- Lateltin, O. (1997): Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Technical Report, Bundesamt für Raumplanung BRP, Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- LFI (Landesforstinventar), (2017a): Buche (*Fagus sylvatica* L.). «<https://www.lfi.ch/resultate/daten/trees/buche1.php>», (Zugriff: 10.07.2017).
- LFI (Landesforstinventar), (2017b): Tanne (*Abies alba* Mill., *A. pectinata* DC.). «<https://www.lfi.ch/resultate/daten/trees/tanne1.php>», (Zugriff: 10.07.2017).
- Louis, K. (1999). Gefahren-/ Risikoanalyse zur Sicherheitsplanung im Gefahrengebiet Bruust/Haltiwald der Gemeinden Horw/ LU und Hergiswil/ NW. Untersuchungsbericht mit 10 Beilagen.
- Lundström, T., Heiz, U., Stoffel, M. & Stöckli, V. (2007): Fresh-wood bending: linking the mechanic and growth properties of a Norway spruce stem. *Tree Physiol.*, 27, 1229-1241.

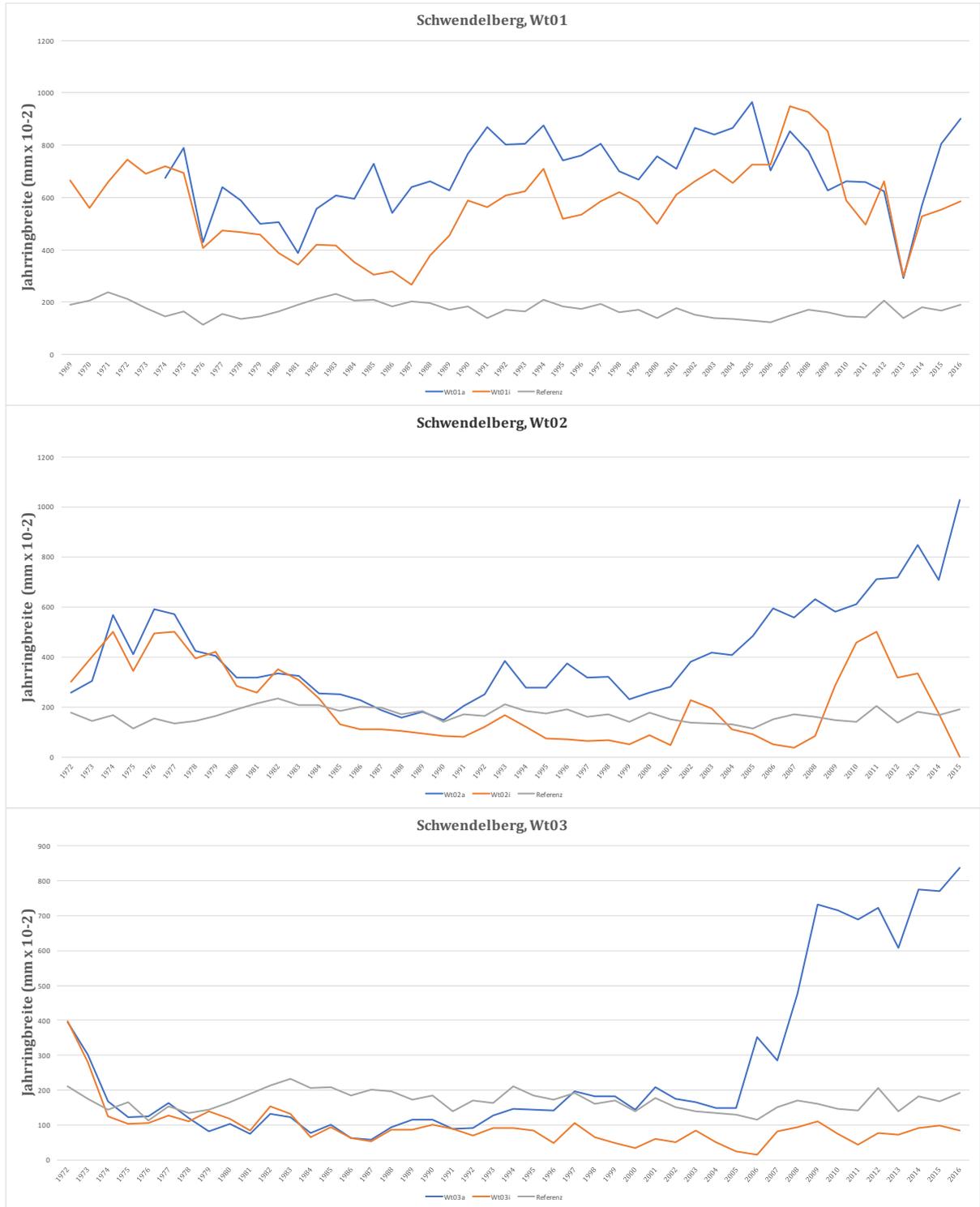
- Mattheck, C. (1993): Design in der Natur. Reihe Ökologie 1: Rombach Wissenschaft.
- Maxwell, R. S., Wixom, J. A. & Hessler, A. E. (2011): A comparison of two techniques for measuring and crossdating tree rings. *Dendrochronologia* 29, 237-243.
- Mengis, R. & Schmidt, R. (1975): Geländerutschungen an der Autobahn A2 bei Ennethorw, Halmwald. Geotechnisches Gutachten Nr. 74248, 24.2.1975.
- Phipps, R. L. (1985): Collecting, preparing, crossdating, and measuring tree increment cores. U. S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 85-4145. 1-48.
- Pilate, G., Chabbert, B., Cathala, B., Yoshinaga, A., Leple, J. C., Laurans, F., Lapierre, C. & Ruel, K. (2004): Lignification and tension wood. *Comptes Rendus Biologies* 327, 889-901.
- Rinntech (2010): TSAP-WIN: Time Series Analysis and Presentation Dendrochronology and Related Applications.
- Ritter, D. F., Kochel, R. C. & Miller, J. R. (2011): Process Geomorphology. Fifth Edition. Waveland Press, USA.
- Röthlisberger, G. (1991): Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Nr. 330.
- Ruelle, J. (2010): «Morphology, Anatomy and Ultrastructure of Reaction Wood», in: Gardiner, B., Sarapää, P., & Grill, J. (Hrsg.): *The Biology of Reaction Wood*. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 13-35.
- Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F. H. & Kienast, F. (2004): Wood anatomy of central European Species. «<http://www.woodanatomy.ch/>», (Zugriff: 24.07.2017).
- Schweingruber, F. H. (1988): *Tree Rings - Basics and Applications of Dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers.
- Schweingruber, F. H. (1993): *Trees and Wood in Dendrochronology. Morphological, Anatomical, and Tree-Ring Analytical Characteristics of Trees Frequently Used in Dendrochronology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Schweingruber, F. H. (1996): *Tree rings and environment. Dendroecology*. Bern, Stuttgart, Wien: Paul Haupt.
- Schweingruber, F. H. (2007): *Wood Structure and Environment*. Springer Series in Wood Science. Heidelberg: Springer.
- Shroder, J. F. (1980): Dendrogeomorphology: review and techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4, 161-188.

- Šilhán, K. & Stoffel, M. (2015): Impacts of age-dependent tree sensitivity and dating approaches on dendrogeomorphic time series of landslides. *Geomorphology* 236, 34-43.
- Skatter, S. & Kučera, B. (1997): Spiral grain – An adaptation of trees to withstand stem breakage caused by wind-induced torsion. *European Journal of Wood and Wood Products*. Vol. 55, Issue 2-4, 207-213.
- Skempton, A. W. & Hutchinson, J. (1969): Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations. – State of the art report. Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. (Mexico) State of the Art Volume, 291-340).
- Stock, M. (Hrsg.), (2005): KLARA – Klimawandel-Auswirkungen, Risiken, Anpassungen. PIK-Summary Report No. 99. Institut für Klimaforschung, Potsdam.
- Stoffel, M. (2005): Spatio-temporal analysis of rockfall activity into forests – results from tree-ring and tree analyses, PhD thesis, Faculty of Science, University of Fribourg, *GeoFocus*, 12, 1-188.
- Stoffel, M. & Bollschweiler, M. (2008): Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 187-202.
- Stoffel, M. & Bollschweiler, M. (2009): What Tree Rings Can Tell About Earth-Surface Processes: Teaching the Principles of Dendrogeomorphology. *Geography Compass* 3/3. 1013-1037.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D., Grichting, M. A., Raetzo, H., Gärtner H. & Monbaron, M. (2005): 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 37, 387-395.
- Stoffel, M., Tiranti, D. & Huggel, C. (2014): Climate change impacts on mass movements – Case studies from the European Alps. *Science of the Total Environment*, Vol. 493, 1255-1266.
- Timell, T. E. (1986a): *Compression Wood in Gymnosperms*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Timell, T. E. (1986b): *Compression Wood in Gymnosperms 2*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Vanoni, M., Bugman, H., Nötzli, M. & Bigler, C. (2016): Quantifying the effects of drought on abrupt growth decreases of major tree species in Switzerland. *Ecology and Evolution*, Vol. 6, Issue 11, 3555-3570.
- Varnes, D. J. (1978): Slope Movements: Types and Processes. In: Schuster, R. L. & Krizek, R. J. (Eds.): *Landslide Analysis and Control*. Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Science, Washington D. C.

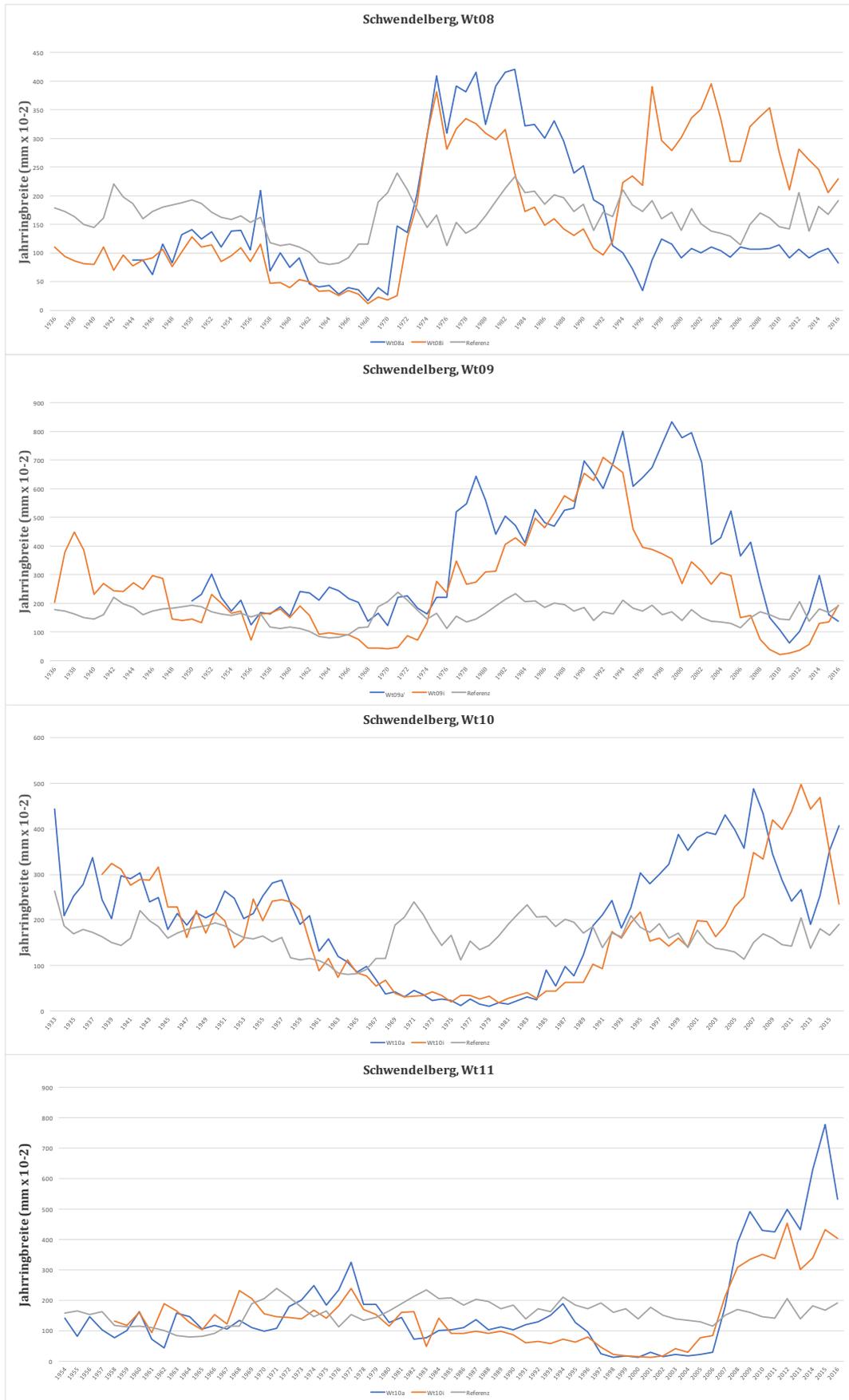
- Wardrop, A. B. (1964): Reaction anatomy of arborescent angiosperms. In: Zimmermann, M. H. (Eds.), Formation of Wood in Forest Trees, 405-456, Academic Press, New York.
- Wilford, G. F., Cherubini, P. & Sakals, M. (2005): Dendroecology: a guide for using trees to date geomorphic and hydrologic events. In: M. o. Forests (Eds.), Land management handbook. Forest Science Program, Victoria British Columbia.
- Zepp, H. (2004): Geomorphologie. Eine Einführung. Ferdinand Schöningh, Paderborn.

9. Anhang

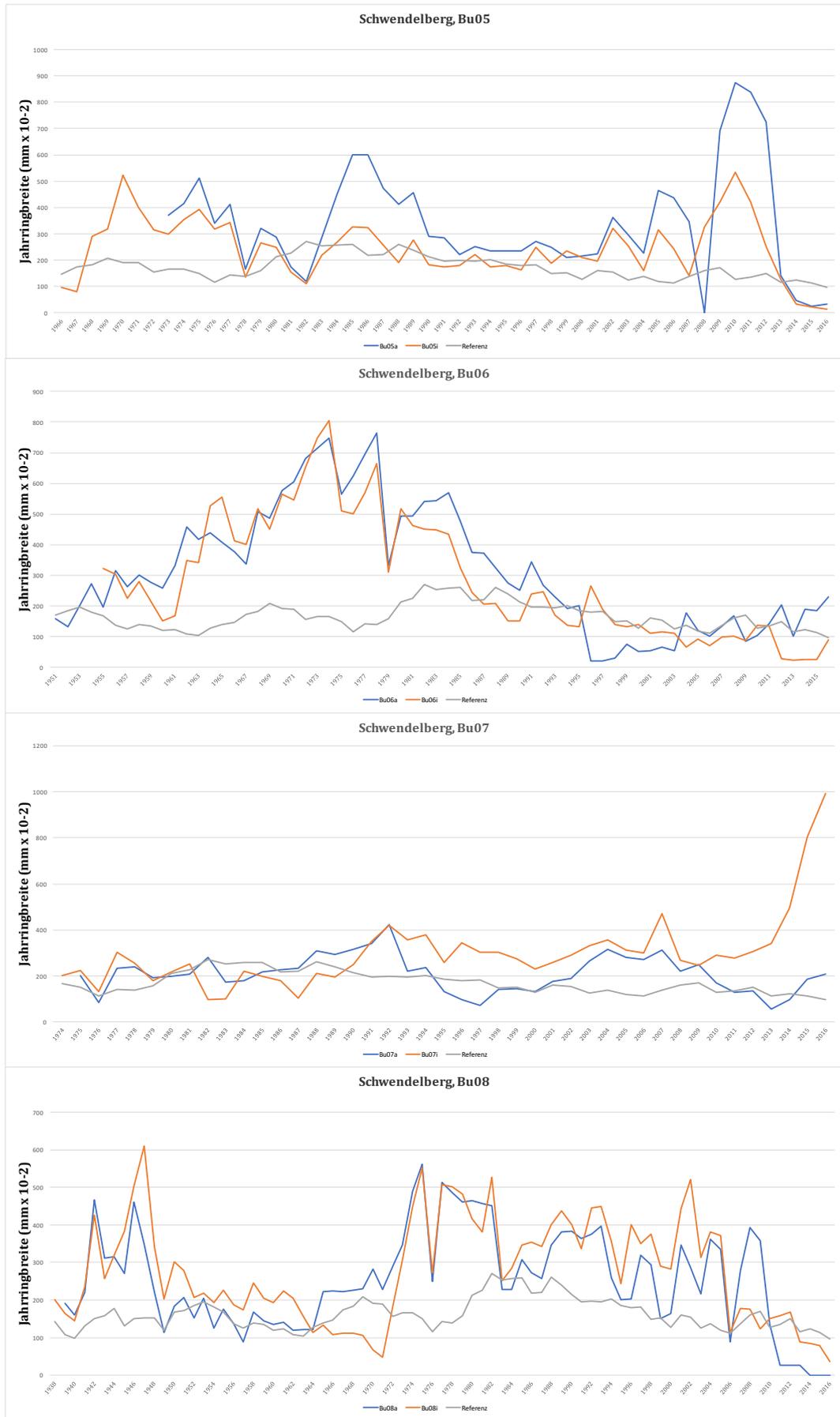
Anhang 1

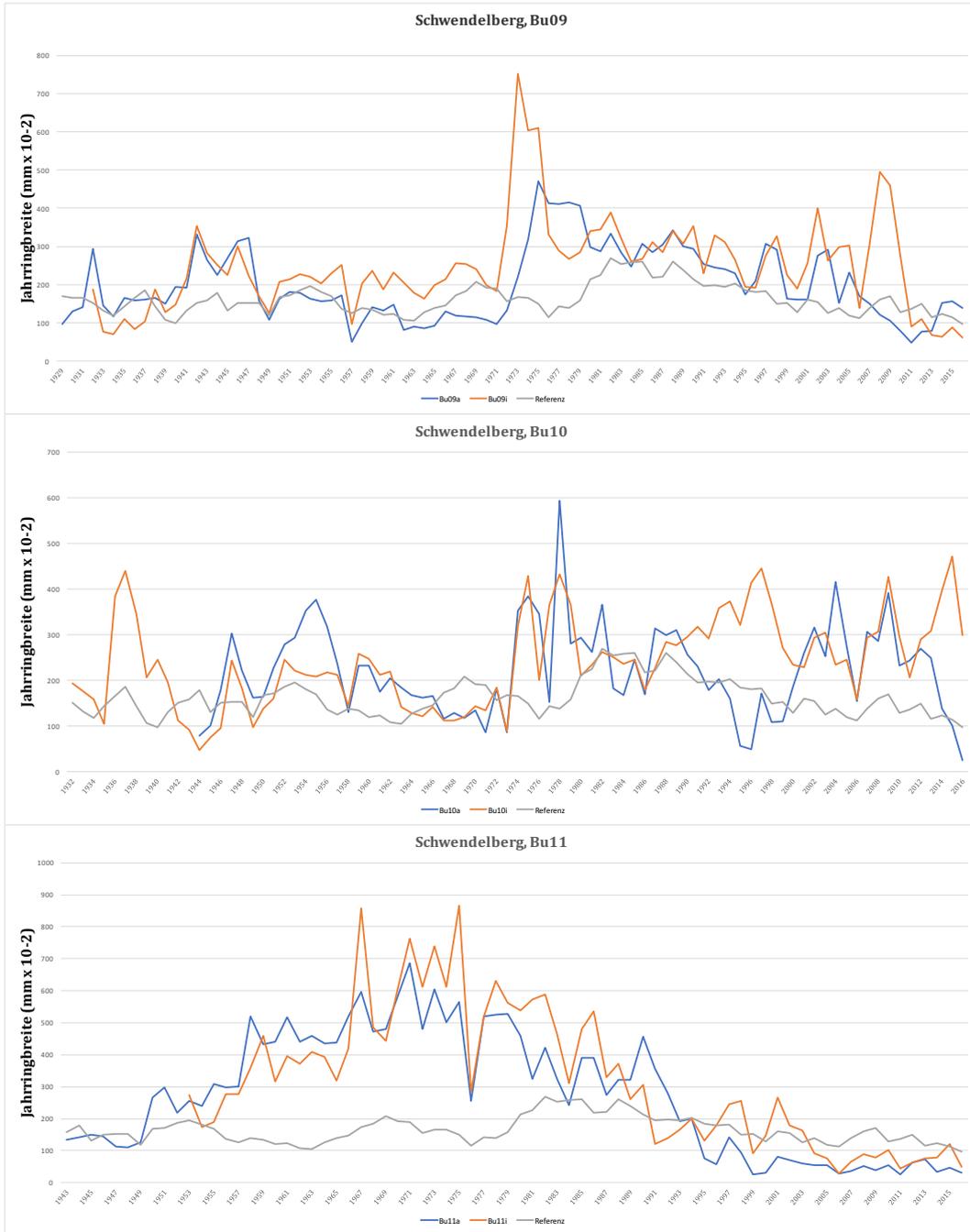




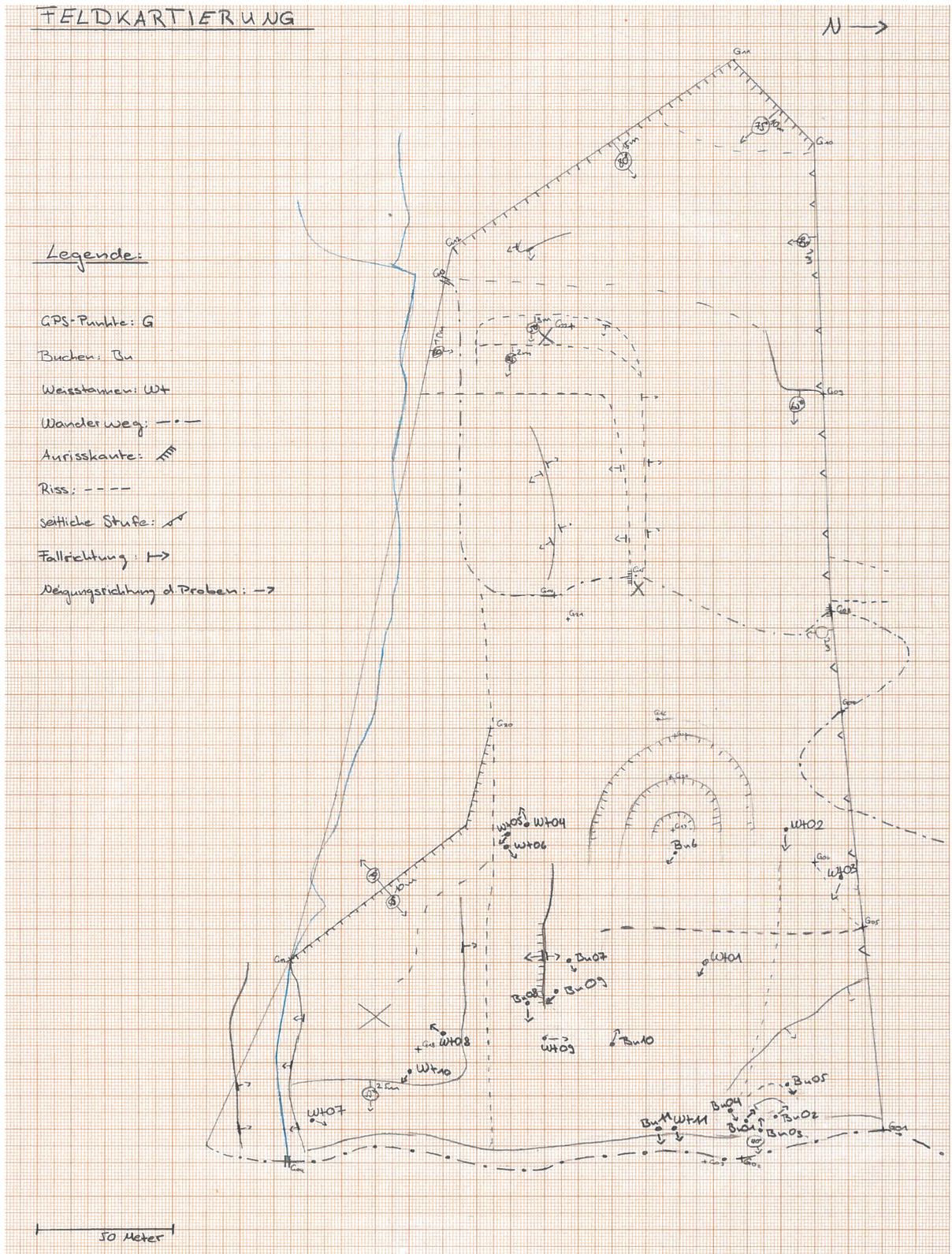








Anhang 2



10. Persönliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Luzern, 29. September 2017

Philippe Burkhalter

.....