

GEO 511 – Masterarbeit

**Einfluss von Vulkanausbrüchen auf das
Wachstum und die Physiologie von Birken
(*Betula pubescens*) in Island**

Betreuung:

Dr. Paolo Cherubini

WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf

paolo.cherubini@wsl.ch

Fakultätsvertretung Universität Zürich:

Prof. Dr. Markus Egli

Camille Eichmann

05 111 356

Zürich, 30. April 2014

Inhalt

1. Zusammenfassung	5
2. Einleitung	8
3. Ziel und Fragestellung.....	11
4. Vulkanismus in Island	14
4.1. Vulkanisch aktive Zone Islands.....	15
4.2. Hekla.....	16
4.2.1. Die Eruptionen der Hekla in den letzten 70 Jahren.....	17
4.3. Eyjafjallajökull	21
4.3.1. Die Eruption des Eyjafjallajökulls im Jahr 2010	22
5. Das Klima Islands	24
5.1. Klima am Standort Hekla	28
5.2. Klima am Standort Eyjafjallajökull.....	28
5.3. Klima am Standort Vatnshornsskogur.....	28
6. Historische Waldvegetation	29
7. Probenmaterial	30
7.1. Moor-Birke - <i>Betula pubescens</i>	30
7.2. Standortbeschreibung	31
7.2.1. Standort Hekla.....	32
7.2.2. Standort Eyjafjallajökull	33
7.2.3. Standort Vatnshornsskogur	33
7.3. Probennahme	35
8. Methoden.....	38
8.1. Dendrochronologische Analyse.....	38
8.1.1. Theoretische Grundlage – Baumwachstumsmodell.....	38
8.1.2. Temperatur – Limitierender Faktor.....	39
8.1.3. Datierung und Messung der Jahrringe	39

8.1.4.	Statistische Analyse mit COFECHA.....	40
8.1.5.	WEISER Jahre.....	42
8.1.6.	Statistische Analyse mit DENDROCLIM 2002.....	42
8.2.	Isotopenanalyse	43
8.2.1.	Probenaufbereitung	44
8.2.2.	Analyse am PSI.....	45
8.3.	Chemische Zusammensetzung des Holzes	45
8.4.	Klimatische Daten	45
8.4.1.	Meteorologische Station Hella	46
8.4.2.	Meteorologische Station Hæll.....	46
8.4.3.	Klimadiagramm für den Süden Islands	46
9.	Resultate.....	48
9.1.	Dendrochronologische Analyse.....	48
9.1.1.	Chronologie Standort Hekla.....	49
9.1.2.	Chronologie Standort Eyjafjallajökull	50
9.1.3.	Chronologie Standort Vatnshornsskogur	51
9.1.4.	Crossdating Parameter.....	51
9.1.5.	WEISER Jahre.....	53
9.1.6.	Fehlende Jahrringe – missing rings	54
9.2.	Klimatische Bedingungen – Analyse mit DENDROCLIM 2002	58
9.2.1.	Temperaturdiagramm	61
9.2.2.	Niederschlagsdiagramm	62
9.3.	Isotopenanalyse	62
9.3.1.	$\delta^{13}\text{C}$ Werte.....	63
9.3.2.	$\delta^{18}\text{O}$ Werte	64
9.4.	Chemisch Zusammensetzung des Holzes.....	65
10.	Diskussion	68

10.1.	Jahrringbreiten und klimatische Bedingungen.....	68
10.2.	Jahrringbreiten und die Eruptionen der Hekla und des Eyjafjallajökulls	73
10.3.	Isotopenanalyse.....	78
10.4.	Chemische Zusammensetzung des Holzes	79
11.	Synthese	81
12.	Schlussfolgerung	84
13.	Ausblick	85
14.	Danksagung	86
	Litteraturverzeichnis.....	88
	Abbildungsverzeichnis	95
	Tabellenverzeichnis.....	100
	Persönliche Erklärung	101
	Anhang	102

1. Zusammenfassung

Im Jahr 2010 brach der isländische Vulkan Eyjafjallajökull aus, was weitreichende Folgen für die Luftfahrt und somit für die Gesellschaft hatte. Dieses einschneidende Ereignis sollte zum Anlass genommen werden, die Auswirkungen solcher Vulkanausbrüche auf die Vegetation vor Ort zu untersuchen. Mit dendrochronologischen Untersuchungsansätzen wurden die Folgen der Eruptionen zweier Vulkane in Island (Hekla und Eyjafjallajökull) genauer erörtert. Dazu wurden Proben von Moor-Birken (*Betula pubescens*) in der Nähe der beiden Vulkane, sowie an einem Kontrollstandort (Vatnshornsskogur) genommen. Der Kontrollstandort sollte keiner direkten Beeinflussung durch vulkanische Aktivität ausgesetzt worden sein. Die beiden Standorte nahe den Vulkanen erfuhren eine direkte Beeinflussung durch die Eruption, da sie teilweise von einer Ascheschicht bedeckt wurden. Alle drei Standorte befinden sich im südwestlichen Teil Islands. Die Proben wurden Ende Mai 2013 genommen, unterstützt durch die Mitarbeiter des isländischen Waldforschungsinstitut Mógilsá, Reykjavik.

Das Ziel dieser Untersuchung ist es herauszufinden, ob die Eruptionen einen Einfluss auf das Wachstum der Vegetation gehabt haben. Wie wirken sich Vulkanausbrüche auf das Wachstum, beziehungsweise auf die Jahrringbreiten der Birken aus? Kann durch die Analysen der Isotopenverhältnisse von $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ auf eine Veränderung der Umweltbedingungen, aufgrund der Eruption, geschlossen werden (Battipaglia et al., 2007, Gu et al., 2003)? Lässt sich somit ein Signal für einen Vulkanausbruch in den Isotopenverhältnissen finden? Durch die Messung der chemischen Zusammensetzung des Holzes soll ebenfalls ein Signal für die Beeinflussung durch vulkanische Aktivität gefunden werden (Pearson et al., 2005).

Nach Cook und Briffa (1990) wird das Wachstum der Bäume durch verschiedene Einflussfaktoren (natürliche und anthropogene) bestimmt. Diese Umweltfaktoren führen zur unterschiedlichen Ausbildung der einzelnen Jahrringe, welche ein Produkt dieser Einflussfaktoren sind. Zu diesem Zweck wurden die Jahrringe der Birken mit einem Lintab – Messsystem (Rinntech, Deutschland) vermessen. Aufgrund dieser Messungen konnte eine Baumringchronologie für alle drei Standorte erstellt werden. Die Isotopenverhältnisse wurden am Paul Scherer Institut (PSI), mit einem Isotopenverhältnis Massenspektrometer (IRMS), bestimmt. Um die chemische Zusammensetzung des Birkenholzes zu ermitteln, wurden die Proben an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) mit einem *laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry* (LA-ICP-MS) analysiert. Damit der Einflussfaktor „Vul-

kanausbruch“ bestimmt werden kann, wurden die Jahrringbreiten mit klimatischen Daten (Niederschlag und Temperatur) abgeglichen.

Das Wachstum der Bäume in Island wird hauptsächlich durch die Temperatur während der Vegetationsphase (Juni – August) limitiert (Levanič & Eggertsson, 2008). Die Jahrringbreiten aller drei untersuchten Standorte korrelieren mit den Sommertemperaturen. In warmen Jahren wuchsen die Bäume mehr als in Jahren mit tieferen Sommertemperaturen. Eine Korrelation für die Niederschlagsmenge im Monat April mit den Baumringbreiten konnte ebenfalls festgestellt werden, ist aber nicht so ausgeprägt vorhanden, wie die Korrelation mit der Temperatur.

Die Vulkane haben keinen nachweisbaren Einfluss auf die klimatischen Bedingungen gehabt, so dass keine Auffälligkeiten in den Isotopenverhältnissen registriert werden konnte. Es kam also nicht wie von Battipaglia et al. (2007) festgestellten Abkühlung der klimatischen Bedingungen und somit zur Anreicherung des ^{13}C in den Pflanzen. Auch ein Anstieg des ^{13}C in den Pflanzen, aufgrund eines erhöhten Anteils der diffusen Strahlung und somit einer erhöhten Photosynthese Aktivität, wie es Gu et al. (2003) beschreiben, konnte nicht nachgewiesen werden. Im Vergleich zu mächtigen Vulkanausbrüchen, welche das Klima auf globaler Ebene zu beeinflussen vermögen (z. B. Tambora 1815, rund 300 km^3 ausgestossene Asche), handelt es sich bei den untersuchten Ereignissen geradezu um Winzlinge (Eyjafjallajökull 2010, rund 0.27 km^3 Asche). Die Eruptionen der Hekla (1947/48, 1970, 1980/81, 1991 und 2000) waren gar noch kleineren Ausmasses.

Auch zeigen die Messungen der chemischen Bestandteile zeigten ebenfalls keine signifikanten Änderungen für das Eruptionsjahr 2010. Keines der gemessenen Elemente (^{13}C , ^{27}Al , ^{57}Fe , ^{62}Ni , 63 , ^{65}Cu , ^{66}Zn , ^{88}Sr und ^{137}Ba) wurde vermehrt ins Holz der Birken eingebaut. Somit konnte kein Signal für einen Vulkanausbruch nachgewiesen werden, wie dies Pearson et al. (2005) gelungen ist.

Die von Battipaglia et al. (2007) aufgestellte Hypothese, dass es durch die Aerosole und Aschepartikel in der Atmosphäre zu einer Abkühlung kommt, was sich wachstumshemmend auf die Vegetation auswirkt, konnte in einem Fall (Heklaeruption 1947/48) nachvollzogen werden. Reduziertes Wachstum konnte in den Jahren gefunden werden, in welchen die Birken von einer Ascheschicht bedeckt worden sind. Dies behinderte die Photosynthese und Stomata Aktivität der Bäume, was sich in vermindertem Wachstum manifestiert (Arnalds, 2013). Zudem kann Vulkanasche (Tephra) eine verschlechterte Durchlüftung des Bodens bewirken, was die Atmung der Wurzeln negativ beeinträchtigt (Biondi et al., 2003). Es hat sich auch gezeigt,

dass der Zeitpunkt der Eruption ebenfalls ein entscheidender Faktor spielt. Die negative Beeinflussung des Wachstums der Bäume durch einen Vulkanausbruch kommt dann zu tragen, wenn die Eruption in der Vegetationsphase von statten geht (Hotes et al., 2004). Eine wichtige Rolle kommt auch der vorherrschenden Windrichtung zu, da der Wind die Aschewolke vor sich hertreibt und es somit nicht zwingend zu Sedimentation der der Asche im Untersuchungsgebiet kommt.

2. Einleitung

Vulkane haben schon seit jeher das Leben auf der Erde beeinflusst. Schon in der biblischen Erzählung über das Schicksal von Sodom und Gomor-rha wird ein Vulkanausbruch als Zeichen Gottes gedeutet, der Schwefel und Feuer regnen liess. Auch die Azteken betrachteten den Ausbruch des Popocatepetls im Jahr 1520 als Strafe der Götter und in der griechischen Mythologie wird von erzürnten Göttern berichtet, welche Steine und Feuer auf die Menschen schleuderten. Vulkanausbrüche werden also immer wieder mit bedeutenden gesellschaftlichen Ereignissen in Verbindung gebracht (Luig und Schultz, 2001). In der heutigen Zeit werden den Vulkanausbrüchen zwar keine göttlichen Zeichen mehr zugeschrieben, die Auswirkungen auf die Natur und die Gesellschaft bleiben aber bedeutend. So fielen in Nordeuropa im Frühjahr 2010, während der Eruption des Eyjafjallajökulls, unzählige Flüge aus und der Luftraum musste, aufgrund der Asche in der Luft, während mehreren Tagen geschlossen bleiben. Die Folgen waren gravierend: Über 7 Millionen Flugpassagiere konnten nicht wie geplant ihre Reise antreten und laut dem Luftfahrt – Dachverband IATA betragen die geschätzten Einnahmeausfälle der Fluggesellschaften rund 1.85 Milliarden Schweizer Franken (NZZ.ch, 01.04.2014).



Abbildung 1: Aschewolke während der Eruption des Eyjafjallajökull 2010 (Foto: Ragnar Th. Sigurðsson).

Der Ausbruch des Eyjafjallajökulls beeinträchtigte aber auch die lokal ansässige Bevölkerung, so mussten rund 800 Personen aus dem Gebiet der Þórsmörk („Wald des nordischen Gottes Thor“, mündliche Mitteilung von Aðalsteinn Sigurgeirsson, 2013) evakuiert werden (Gudmundsson et al., 2010). Die Þórsmörk war nach der Eruption 2010 von einer Ascheschicht bedeckt, weshalb das ganze Gebiet für Tiere und Menschen gesperrt wurde. Dies, da sich eine dichte Staubwolke in der Þórsmörk installiert hatte, welche die Gesundheit von Mensch und Tier nachträglich zu schädigen drohte (mündliche Mitteilung von Hreinn Óskarsson, 2013).

Die Auswirkungen der Eruption auf die Vegetation soll in dieser Masterarbeit erörtert werden. Das Ausstossen von grossen Mengen an Vulkanasche, rund 0.27 km^3 (Gudmundsson et al. 2012), hatte einen Einfluss auf die isländische Vegetation. Bis heute wird im Gebiet rund um den Vulkan Eyjafjallajökull Asche durch die Luft gewirbelt (letzter Besuch der Þórsmörk von mir im November 2013). In Island kommt es immer wieder zu Vulkanausbrüchen, die in grösserem oder kleinerem Ausmass die Flora und Fauna Islands beeinflussen.

Das Wachstum von Bäumen wird durch verschiedene Einflussfaktoren bestimmt. Nach Schweingruber (1996) haben Licht, Temperatur, Wasser, Nährstoffversorgung, Wind, mechanische Beschädigung der Krone, der Wurzeln und des Stammes, sowie Verunreinigungen der Luft und des Bodens Einfluss auf das Baumwachstum. Somit sind die Jahrringe von Bäumen eigentliche Umweltarchive, die Aussagen über die jeweiligen ökologischen Bedingungen zur Zeit der Bildung der einzelnen Jahrringe zulassen. Die Jahrringbreite ist folglich ein Merkmal dafür, mit welcher Geschwindigkeit ein Baum gewachsen ist, sprich was für Umweltbedingungen zum Zeitpunkt der Bildung geherrscht haben.

Sehr grosse Vulkanausbrüche, wie beispielsweise die Tambora Eruption in Indonesien aus dem Jahr 1815, wird in der Literatur als Grund für das „Jahr ohne Sommer“ beschrieben (Auchmann et al., 2012). Eine Eruption dieser Grösse hat einen Einfluss auf das globale Klima und somit auf das Wachstum der Bäume (Schweingruber, 1996). Kleinräumigere Auswirkungen von Vulkanausbrüchen, wie es die Untersuchungen am Vesuvio (Italien) zeigen, führen zu verminderten Wachstumsraten der Bäume, beziehungsweise weniger breit ausgebildeten Jahrringen (Battipaglia et al. 2007). Für die Forschungsarbeit von Battipaglia et al. (2007) wurden Bäume analysiert, welche nicht in unmittelbarer Nähe zum Vulkan wachsen, sondern in einer Entfernung von 50 – 100 km. Gu et al. (2003) stellten erhöhte Wachstumsraten fest, aufgrund der durch den Vulkan Pinatubo (Philippinen) ausgestossenen Aerosole. Das verbesserte Wachstum wird durch die effizientere Nutzung der vermehrt auftretenden diffusen Strahlung begründet. Andere Forschungsarbeiten kommen zum Schluss, dass die Vegetation hauptsächlich durch eine allfällige Ascheschicht negativ beeinträchtigt wird (Biondi et al.,

2003, Seymour et al., 1983, Tognetti et al., 2012). Zudem scheint der Zeitpunkt der Eruption von entscheidender Bedeutung zu sein (Hotes et al., 2004).

Bei der vorliegenden Masterarbeit soll die kleinräumige Auswirkung von Vulkanausbrüchen in Island untersucht werden. Dafür wurde vor Ort, in unmittelbarer Nähe zum Eruptionsherd des Eyjafjallajökulls (ca. 7 km entfernt), ein Untersuchungsgebiet definiert. Ein weiteres Untersuchungsgebiet befindet sich am Fusse der Hekla (ca. 11 km entfernt), welche in neuerer Zeit periodisch alle 10 Jahre ausbricht (Rose et al., 2003). Es ist von speziellem Interesse, inwiefern sich die räumliche Distanz zum Vulkan auf die Wachstumsraten der Bäume auswirkt. Noch nie wurden so nahe an einem Vulkan Bäume auf das Reaktionsverhalten nach einer Eruption untersucht. Die regelmässig auftretenden Vulkanausbrüche, sowohl die mediale und wirtschaftliche Bedeutung der Eyjafjallajökull Eruption 2010 sind die Beweggründe, weshalb die Standorte in Island für diese Forschungsarbeit ausgesucht wurden.

3. Ziel und Fragestellung

Die vorliegende Masterarbeit soll Antworten auf die folgenden Thesen und Fragestellungen geben:

T1: Wie beeinflusst die räumliche Distanz zum Vulkan ein allfälliges Signal im Wachstum des Baumes?

Bei den betrachteten Vulkanausbrüchen des Hekla und des Eyjafjallajökulls handelt es sich um kleinere Eruptionen, schaut man sich die ausgestossenen Volumina an Tephramaterial an. Um den Wirkungsbereich zu beschreiben wurden drei Untersuchungsstandorte mit unterschiedlicher Distanz zum Eruptionsherd gewählt. Verglichen mit anderen, bedeutenderen Vulkanausbrüchen, welche das globale Klima zu beeinflussen vermögen, haben die untersuchten Ereignisse womöglich nur einen lokal begrenzten Einfluss. Als Beispiel sei hier der Vulkanausbruch des Tambora 1815 in Indonesien genannt, welcher in der Literatur als Grund für das „Jahr ohne Sommer“ genannt wird (Press & Siever, 2003).

T2: Trifft eine der beiden Hypothesen von Battipaglia et al. (2007) und Gu et al. (2003) treffen auf Island zu?

Battipaglia et al. (2007) stellen in der Forschungsarbeit „Volcanic explosive eruptions of the Vesuvio decrease tree-ring growth but not photosynthetic rates in the surrounding forests“ zwei grundlegende Reaktionsmöglichkeiten der Vegetation vor:

(1) Durch die vom Vulkan ausgestossenen Aerosole und Aschepartikel verändert sich die Strahlungsbilanz, ein Teil der Sonnenstrahlung wird absorbiert. Diese Absorption kühlt die Atmosphäre ab, was zu einer Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit führt, dies wiederum bewirkt eine Reaktion im Wachstum der Bäume (Battipaglia et al., 2007). Ein sichtbares Zeichen an den Bäumen würde eine Abnahme der Jahrringbreite sein (Briffa et al., 1988, 1998; Jones & Bradley, 1992). Die Erhöhung der relativen Feuchtigkeit führt zu einer erhöhten Stomata Leitfähigkeit in den Bäumen. Diese Veränderung wiederum führt zu tieferen $\delta^{18}\text{O}$ Werten in der organischen Substanz. In diesem Szenario werden auch tiefere Werte für $\delta^{13}\text{C}$ erwartet, aufgrund der hohen Stomata Leitfähigkeit.

(2) Im zweiten denkbaren Fall kommt es, durch die Vulkanasche und die Aerosole in der Atmosphäre, zu einer Erhöhung der diffusen Strahlung. Nach Gu et al. (2003) bewirkt eine Zu-

nahme der Diffusionsstrahlung eine Erhöhung der Photosynthese Aktivität, was sich in verstärktem Pflanzenwachstum manifestiert. In diesem Fall werden breitere Jahrringe mit erhöhten $\delta^{13}\text{C}$ Werten erwartet. Die Werte des $\delta^{18}\text{O}$ – Isotops dürften sich in diesem Fall kaum ändern (Battipaglia et al., 2007).

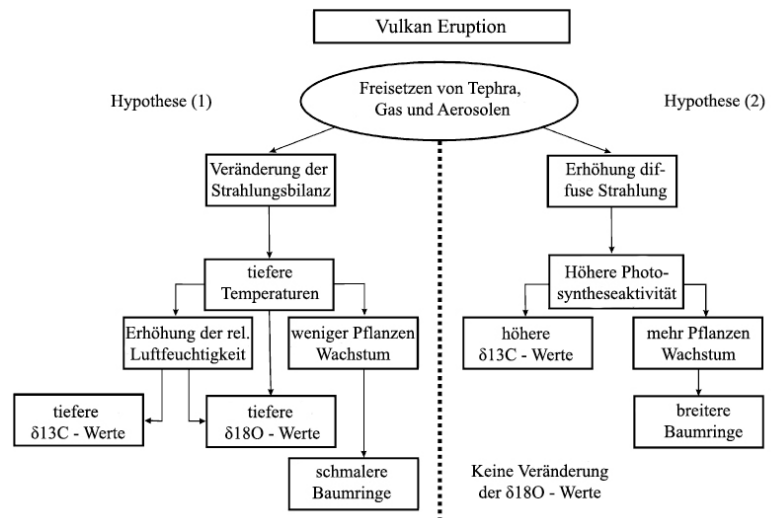


Abbildung 2: Die zwei grundlegenden Szenarien nach einem Vulkanausbruch. Hypothese (1) zeigt eine Abkühlung aufgrund der Asche und Aerosole, was zu einem verringerten Pflanzenwachstum und höherer rel. Luftfeuchtigkeit führt. Tiefere Werte für $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ in den Jahrringen der Bäume sind die Folge. Hypothese (2) führt zu verstärkter Photosynthese Aktivität und somit grösserem Pflanzenwachstum, da Pflanzen diffuse Lichtstrahlung effizienter nutzen können. Es werden tiefere Werte für $\delta^{13}\text{C}$ erwartet und keine Veränderung für $\delta^{18}\text{O}$ – Werte (Quelle: Battipaglia et al., 2007, modifiziert).

T3: Kann in den Isotopenverhältnissen ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) ein Signal für die Eruption des Eyjafjallajökull im Jahr 2010 gefunden werden?

Durch die Messung der Isotopenverhältnisse von $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$, soll ein Signal für einen Vulkanausbruch und dessen Folgen für die Vegetation gefunden werden, wie dies Battipaglia et al. (2007) oder Gu et al. (2003) gelungen ist. Für den Fall, dass es möglich ist, dass ein sogenannter *marker* für Ausbruchsjahre gefunden werden kann, könnte ein solches Signal auch in anderen dendrochronologischen Arbeiten überprüft und angewandt werden.

T4: Veränderte sich die chemische Zusammensetzung des Birkenholzes nach dem Ausbruch des Eyjafjallajökull im Jahr 2010?

Pearson et al. (2005) konnten durch chemischen Analyse von Holz aufzeigen, dass die Bäume im Jahr der Tambora Eruption 1815 vermehrt Aluminium, Zink und Kupfer aufgenommen haben. Diese Veränderung der Zusammensetzung des Holzes konnte mit der LA-ICP-MS (*laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*) Methode gemessen und nachgewiesen werden. Es ist nun von Interesse, ob eine solche oder ähnliche Veränderung in der chemischen Zusammensetzung des Probenmaterials aus Island ebenfalls gefunden werden kann.

4. Vulkanismus in Island

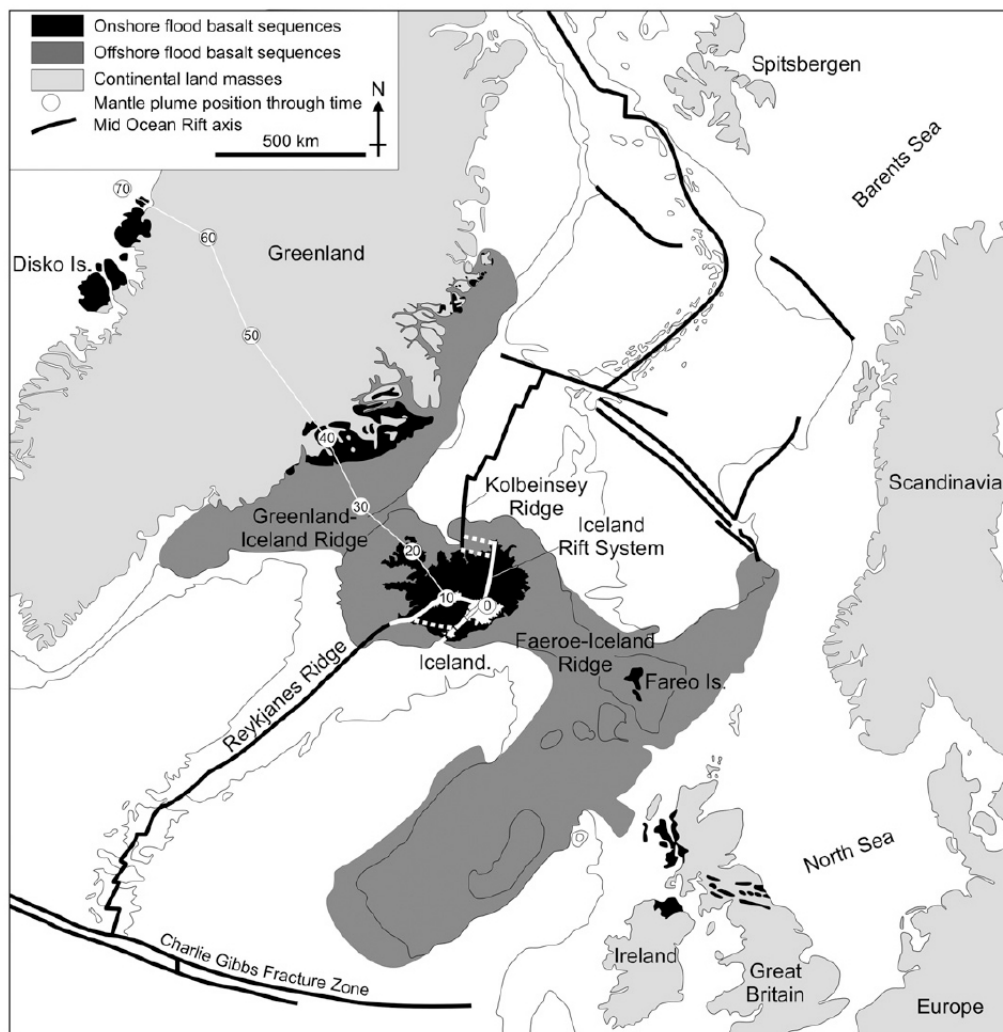


Abbildung 3: Verlauf der Rift Zone im Atlantik (Quelle: Thordarson & Larsen, 2007).

Das isländische Basalt Plateau liegt auf der Rift Zone zweier grosser, submarin physiographischer Strukturen: dem Mittelozeanischen Rücken (MOR) und Grönland-Island-Faeroe Rücken. Es bedeckt eine Gesamtfläche von 350000 km^2 , wovon 30% (ca. 103000 km^2) oberhalb des Meeresspiegels liegen. Das Plateau erhebt sich mehr als 3000 m über den Meeresboden, wo die Erdkruste zwischen 10 – 40 km mächtig ist. Das isländische Basalt Plateau kommt durch das Zusammenwirken auseinander driftender Plattengrenzen und einem Mantel – Plume zustande. Entlang der durch die Plattenbewegung entstandenen Risse in der Kruste dringt flüssiges Mantelmaterial an die Oberfläche. Dies führt zu teilweise grossen Eruptionen auf dem Festland, als auch am Meeresgrund. Es wird davon ausgegangen, dass die Bildung Islands vor rund 24 Mio. Jahren ihren Anfang nahm, wobei das Alter der ältesten Gesteine Is-

lands auf rund 16 Mio. Jahre datiert wurden. Der Mantel – Plume unterhalb Islands war für die letzten 65 Mio. Jahre aktiv und bildete die ca. 2000 km lange *North Atlantic Igneous Province (NAIP)*, wobei Island der letzte aktive Teil ist (Thordarson & Larsen, 2007).

4.1. Vulkanisch aktive Zone Islands

Die vulkanisch aktive Zone in Island verläuft entlang des MOR und bedeckt mit 30000 km² rund $\frac{1}{3}$ der Fläche Islands. Es können mehrere vulkanisch aktive Zonen in Island gefunden werden. Die für diese Arbeit relevanten Vulkane (Eyjafjallajökull und Hekla) liegen beide in der *East Volcanic Zone (EVZ)*. Diese Zone verläuft im südlichen Teil Islands in NO – SW Richtung (Thordarson & Larsen, 2007).

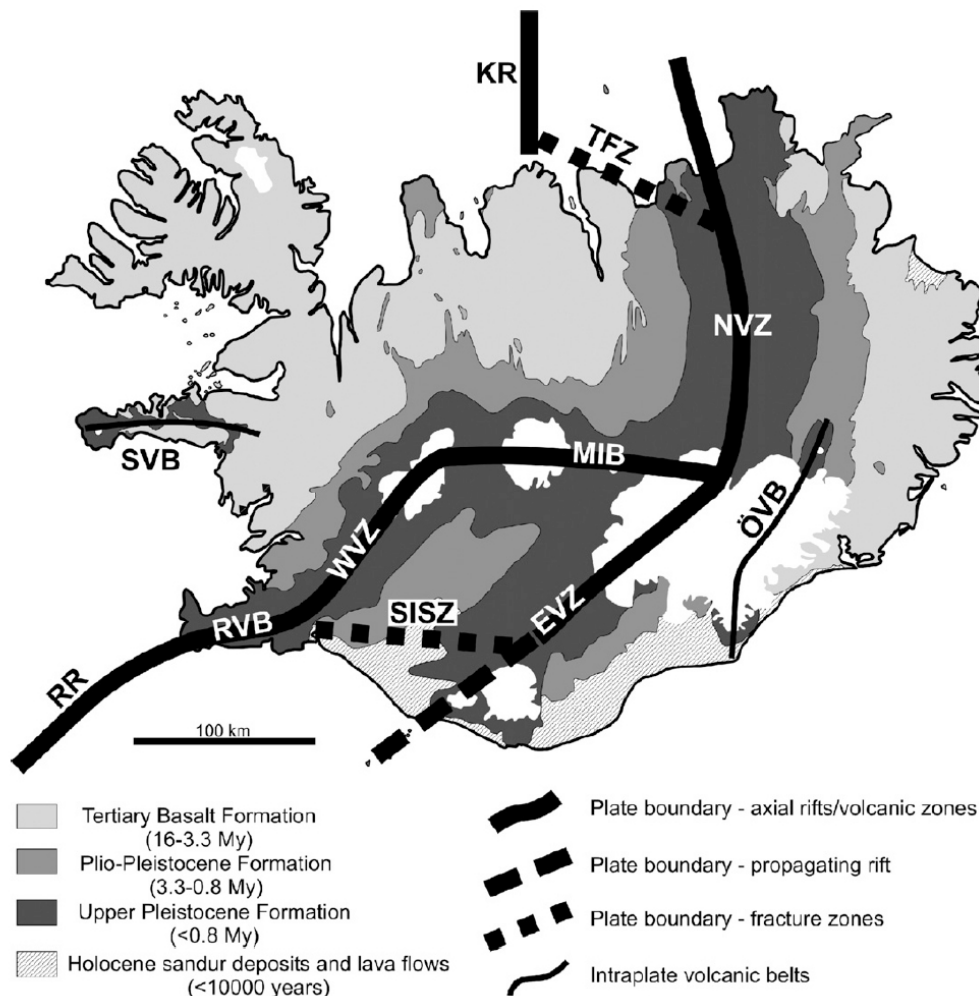


Abbildung 4: Grundsätzliche geologische Formationen Islands, hervorgehoben sind die hauptsächlich Platten-grenzen und vulkanisch aktiven Zonen (RR: Reykjanes Ridge, RVB: Reykjanes Volcanic Belt, SISZ: South Iceland Seismic Zone, WVZ: West Volcanic Zone, MIB: Mid-Iceland Belt, EVZ: East Volcanic Zone, NVZ: North Volcanic Zone, TFZ: Tjörnes Fracture Zone, KR: Kobeinsey Ridge, ÖVB: Öræfi Volcanic Belt, SVB: Snæfellsnes Volcanic Belt) (Quelle: Thordarson & Larsen, 2007)

Die einzelnen Vulkansysteme haben unterschiedliche Grössen, ihr Ausmass reicht von ca. 25 bis 2500 km² und haben eine Länge von 7 bis 200 km. Mit einer Fläche von 300 km² (Eyjafjallajökull) und 720 km² (Hekla) handelt es sich bei den beiden relevanten Vulkansystemen um kleine bis mittelgrosse Systeme (Thordarson & Larsen, 2007).

4.2. Hekla

Beim Vulkansystem der Hekla (isländisch für *Haube*) handelt es sich um einen Schicht- oder Stratovulkan, welcher sich bis auf eine Höhe von 1491 m ü. M. erhebt. Typischerweise hat sein Kegel eine Neigung zwischen 15 – 33° und einen Gipfelkrater, eine sogenannte Caldera (Thordarson & Larsen, 2007). Die Hekla ist einer der aktivsten Vulkane Islands, in den letzten 1100 Jahren kam es zu 17 nachgewiesenen Ausbrüchen. Zusätzlich zu den Eruptionen des Hauptvulkans kam es zu weiteren sechs Eruptionen in dessen Peripherie. Bis 1947 wies Hekla eine Periodizität von einer Eruption pro 100 Jahren auf. Nach 1947 änderte sich dies drastisch, seit 1970 bricht der Vulkan alle zehn Jahre aus. So kam es seit 1947 zu vier weiteren Vulkanausbrüchen, in den Jahren 1970, 1980 – 1981, 1991 und 2000. Die Zusammensetzung des Materials, welches bei den Ausbrüchen zu Tage gefördert wird, widerspiegelt die Zeitdauer zwischen den Ausbrüchen. Bei längeren Intervallen von 100 Jahren oder mehr, fliesst hoch silikatische Magma (Rhyodazit) aus. Sind die Zeiträume zwischen den Eruptionen kürzer (< 30 Jahre) setzt sich das Magma aus wenig silikatischem Material zusammen (Andesit bis basaltischer Andesit) (Höskuldsson et al., 2007).



Abbildung 5: Mt. Hekla im Süden Islands, März 2005 (Foto: Hreggviður Norðdahl).

Nach zwei weiteren Jahrzehnten der Ruhe, brach die Hekla am 5. Mai 1970 eher unerwarteterweise aus, da bis dahin eine Periodizität von 100 Jahren galt. Die initiale Phase der Eruption dauerte zwei bis drei Stunden an und war geprägt durch ein kontinuierliches Auswerfen von Lava und Tephra. Die Aschewolke erreichte 16 km Höhe und somit die oberen Schichten der Troposphäre (Haas et al., 1997). Insgesamt produzierte diese Eruption 0.2 km^3 Lava und 0.07 km^3 Tephra. Die Asche wurde vom Wind in nördliche Richtung getragen. Die Eruption dauerte bis am 5. Juli 1970, also genau zwei Monate (Thorarinsson et al., 1972).

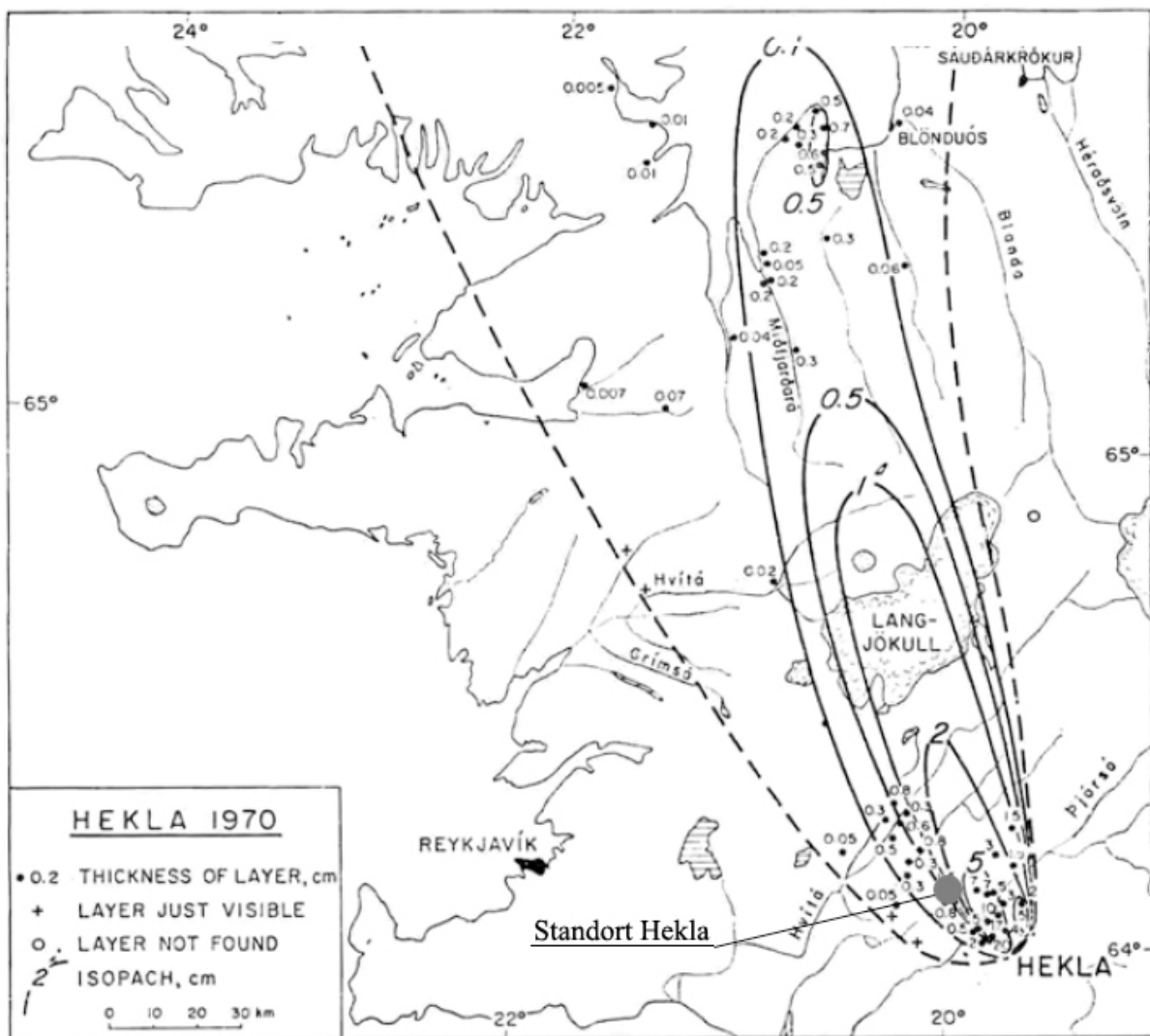


Abbildung 7: Verteilung und Mächtigkeit der Tephraschicht der Hekla Eruption von 1970. Grau eingezeichnet ist der Standort Hekla (Quelle: Thorarinsson et al., 1972, modifiziert).

Am 17. Januar 1991 startete die Eruption der Hekla und dauerte an bis am 11. März 1991. Die Eruption förderte 0.02 km^3 Tephra und 0.15 km^3 Lava zu Tage (Gudmundsson et al., 1992). Ein Grossteil der Tephra entwich während der ersten acht Stunden der Eruption. Die Asche sedimentierte anschliessend in einem Gebiet, das nordwestlich der Hekla liegt (Flaathen & Gislason, 2007).

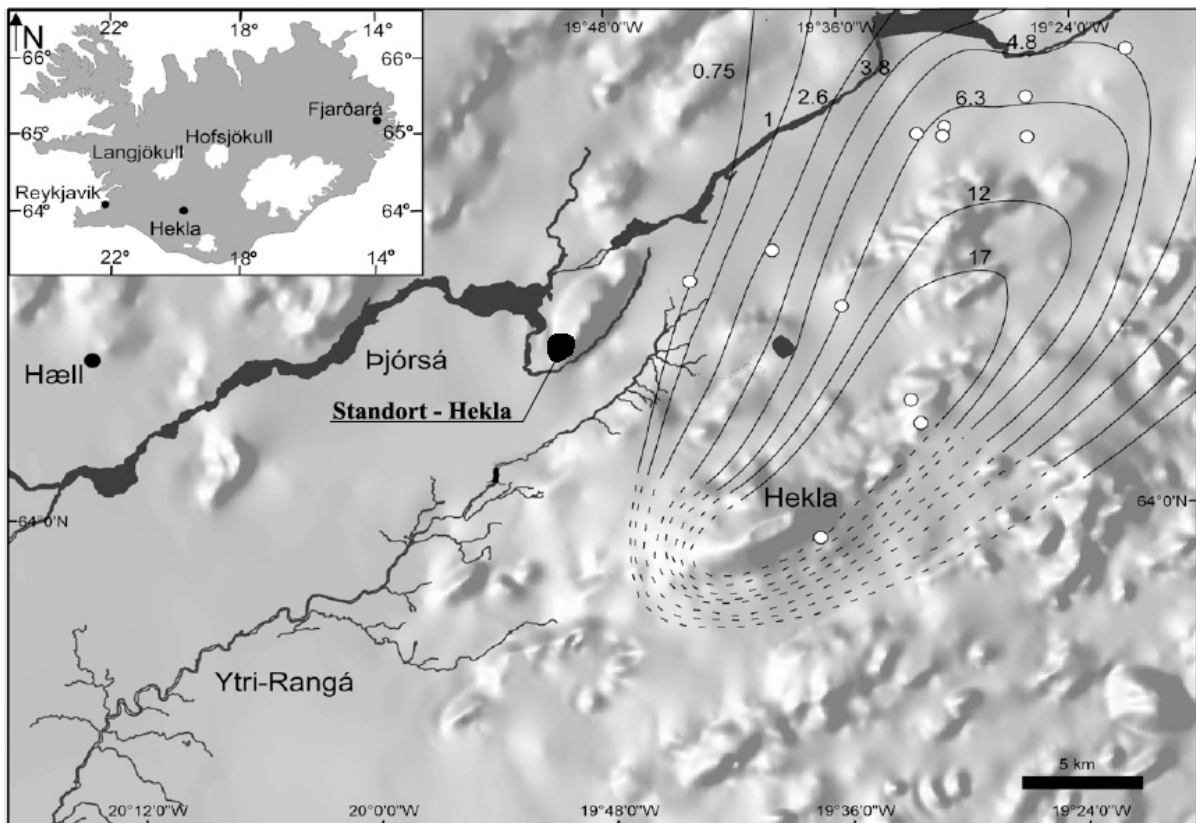


Abbildung 9: Karte vom Gebiet rund um den Vulkan Hekla. Die eingezeichneten Isolinien (kg/m^2) bezeichnen die Sedimentation der Tephra nach der Hekla Eruption 1991. Als schwarze Markierung ist auch der Untersuchungsstandort nahe der Hekla eingezeichnet (Quelle: Larsen et al., 1992, modifiziert).

Die vorerst letzte Eruption der Hekla begann am 26. Februar 2000, wobei sich ein 4.5 km langer Riss an der Südostflanke der Hekla auftat. Innert weniger Minuten produzierte der Vulkan eine 11 – 12 km hohe Aschewolke, welche durch den vorherrschenden Südwind gegen Norden getragen wurde. Die ersten vier Stunden der Eruption war eine sehr stark explosive Phase. Danach war der Vulkanausbruch durch ausfliessende Lava geprägt. Die 2000er Eruption ist eine der kürzesten und kleinsten aufgezeichneten Eruptionen der Hekla. Sie dauerte insgesamt elf Tage an und förderte ein Volumen von 0.01 km^3 Tephra und 0.17 km^3 Lava (Flaathen & Gislason, 2007). Über die zentralen Gebiete bis hin zur Nordküste Islands kann

eine Tepherschicht gefunden werden, welche vom Ausbruch im Jahr 2000 her stammt (Lacasse et al., 2003).

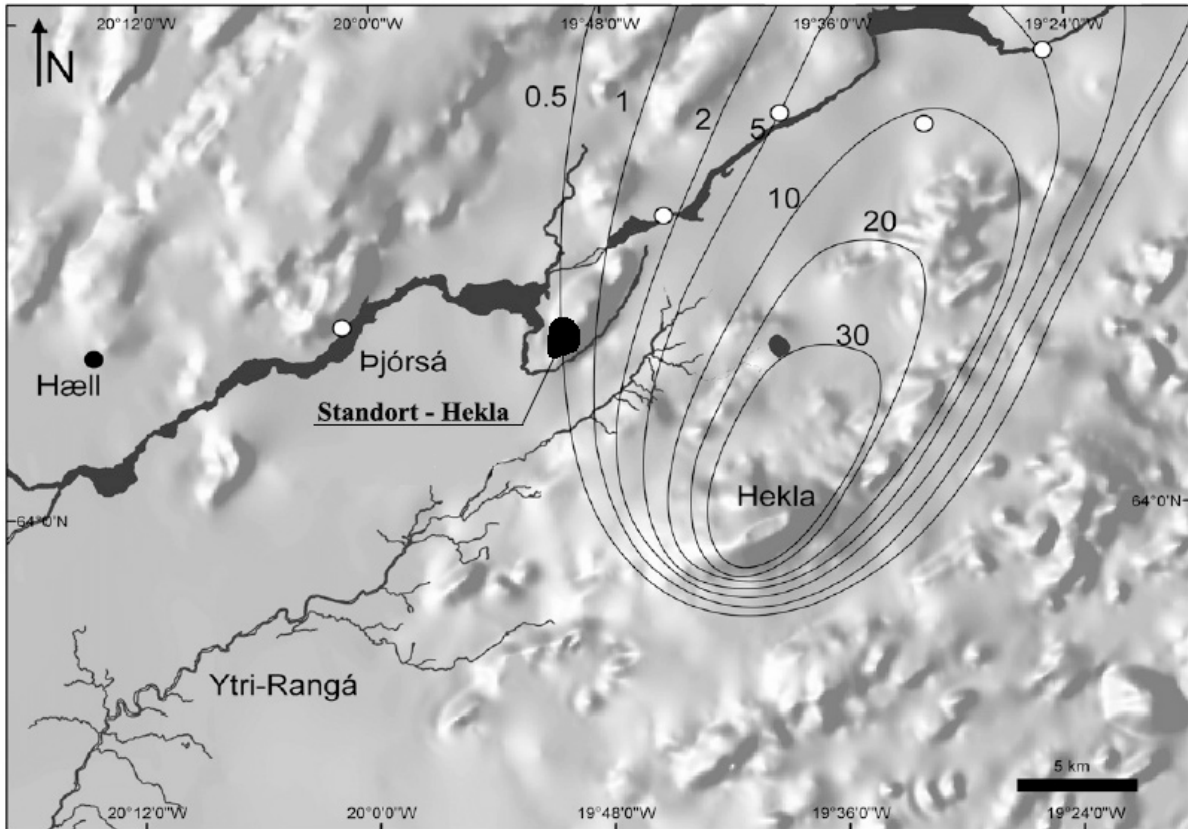


Abbildung 10: Karte vom Gebiet rund um den Vulkan Hekla. Die eingezeichneten Isolinien (kg/m^2) bezeichnen die Sedimentation der Tephra nach der Hekla Eruption im Jahr 2000. Eingezeichnet ist auch der Untersuchungsstandort nahe der Hekla (Quelle: Flaathen & Gislason, 2007, modifiziert).

4.3. Eyjafjallajökull

Der Vulkan Eyjafjallajökull (isländisch für Inselberggletscher) hat eine langgestreckte, flache Form und erreicht eine Höhe von 1666 m ü. M. Der bis zu 200 m dicke Eyjafjallajökull – Gletscher bedeckt den Vulkan und seinen 2.5 km breiten, elliptischen Krater. Durch eine Öffnung im Krater fließt der Gletscher in nördlicher Richtung die flache Flanke ($4 - 8^\circ$ Gefälle) hinunter. Der jüngste Ausbruch, vor demjenigen im Frühling 2010, trat 1821 – 1823 auf. Das ausgestossene Material des Eyjafjallajökulls hat eine alkalische Zusammensetzung und bildet beim Auskühlen basaltisches Gestein. Diese Art von Vulkanen erzeugt bei einem Ausbruch relativ kleine Mengen an gefördertem Material, in der Regel 0.1 km^3 Asche und Lava pro Eruption. Der älteste Teil des Vulkans wird auf 0.78 Mio. Jahre geschätzt, womit der Eyjafjallajökull einer der ältesten noch aktiven Vulkane Islands ist (Sturkell et al., 2010).



Abbildung 11: Eyjafjallajökull, Mai 2012 (Foto: Camille Eichmann).

4.3.1. Die Eruption des Eyjafjallajökulls im Jahr 2010

Seit der Eruption des Eyjafjallajökulls in den Jahren 1821 – 1823, blieb der Vulkan ruhig. Intensive seismische Aktivitäten, in Form von Erdbeben und einer Hebung der Erdoberfläche, von Januar bis März 2010, kündigten eine bevorstehende Eruption an. Am 20. März kam es zu einem ersten Ausbruch an der Flanke des Eyjafjallajökulls. Dabei stiess der Vulkan basaltisches Lavamaterial aus, welches ein Gebiet von 1.3 km^2 mit insgesamt 0.2 km^3 Material bedeckte. Während der Hauptideruption des Eyjafjallajökulls, vom 14. April – 22. Mai 2010, förderte der Vulkan nur eine geringe Menge an Lava und Tephra an die Oberfläche. Etwa 20% des geförderten Materials bestand aus festem Gestein und wassergebundener Tephra, die restlichen 80% wurden in die Luft geschleudert und bildeten die Aschewolke Aschepartikel (Volumen: 0.27 km^3). Der Hauptausbruch des Vulkans kann in 4 Phasen aufgeteilt werden:

1. Initiale / Erste explosive Phase (14. – 18. April): Diese Phase ist geprägt durch Magma- und Tephraausstoss, welche den aufliegenden Gletscher zum schmelzen brachte. Da der Wind zu Beginn aus Osten und dann aus Norden wehte, wurde die Asche im Westen und Süden des Eyjafjallajökulls abgelagert. Die abkühlende Lava bildete überwiegend Benmoreite aus.
2. Phase mit kleinem Ausstossvolumen (18. April – 4. Mai): Ein 3 km langer Lavastrom ergoss sich von der Caldera aus gegen Norden. Die explosive Aktivität war schwach, es wurde deutlich weniger Asche gefördert.

3. Zweite explosive Phase (5. – 17. Mai): Ein plötzliches Eintreten der explosiven Aktivität und eine veränderte Magmazusammensetzung (von Benmoreit zu Trachyt) prägte die 3. Phase des Ausbruchs. Durch sich ändernde Windrichtungen wurde die Asche viel breiter gestreut als dies bei der ersten explosiven Phase noch der Fall gewesen ist.
4. Schlussphase (18. – 22. Mai): Die Eruption schwächte sich deutlich ab, bis sie schliesslich zum Erliegen kommt. Kleinere Explosionen treten noch Anfangs Juni auf, bleiben aber ohne grössere Bedeutung. Eine Dampfwolke bleibt für mehrere Monate nach der Eruption bestehen.

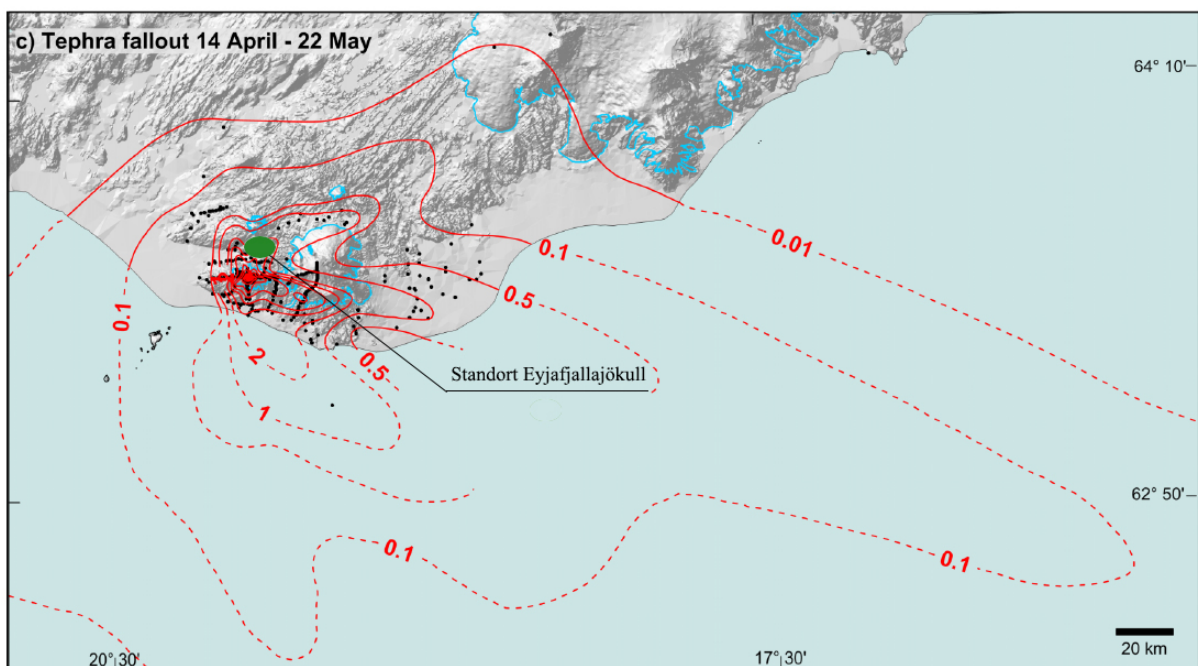


Abbildung 12: Gesamte Tephraablagerung während der Eruption vom 14. April – 22. Mai 2010. Die rote ausgezogene Linie bezeichnet die Ablagerungsmächtigkeit an Land und die geschätzte Ablagerungsmenge im Meer ist mit einer roten gestrichelten Linie eingezeichnet. Die Mächtigkeit der Tephra Ablagerung ist in cm angegeben (rote Ziffern). Als grüner Punkt eingezeichnet ist der Untersuchungsstandort am Eyjafjallajökull (Quelle: Gudmundsson, 2012, modifiziert).

Durch die vorherrschende Windrichtung breitete sich die Aschewolke hauptsächlich in südöstlicher Richtung aus. Das Untersuchungsgebiet, welches etwa fünf Kilometer nördlich des Krates gelegen ist, dürfte nach der Eruption mit einer Ascheschicht von 1 – 2 cm Mächtigkeit bedeckt gewesen sein (siehe Abbildung 12) (mündliche Mitteilung von Óskarsson, 2013).

Die Asche wurde primär während der beiden explosiven Phasen ausgestossen (> 80% der gesamten Aschemenge). Die Aschewolke erreichte eine maximale Höhe von zehn Kilometer. Dadurch, dass die Asche sich in südwestlicher Richtung nach Europa bewegte, wurde über den Ausbruch und dessen Folgen für die Luftfahrt in den Medien ausführlich berichtet. Gegen

Ende der Eruption konnte eine Sedimentation von Aschepartikel bis weit in den Süden Europas (Pyrenäen in Spanien) beobachtet werden (Gudmundsson, 2012).

5. Das Klima Islands

Island liegt im Norden des Atlantiks, nahe dem Polarkreis, zwischen 63°23'N und 66°32'N Breite und 13°30'W und 24°32'W Länge. Aufgrund der Lage Islands gibt es ein Defizit in der Strahlungsbilanz auf der Erdoberfläche und in der Atmosphäre. Es besteht ein grosser Unterschied zwischen der Sonnenscheindauer und dem Sonnenstand während der Sommer- und Wintermonate.

Tabelle 1: Sonnenscheindauer und Sonnenstand für Island, als Vergleich jene Werte für Zürich (Quelle: Einarsson, M. A. 1984, map.geo.admin.ch, www.timeanddate.com).

Standort	Latitude	Sonnenstand am Mittag		Länge des Tages	
		Sommer Sonnenwende	Winter Sonnenwende	Sommer Sonnenwende	Winter Sonnenwende
Reykjavik	64°08'N	49°18'	2°25'	21h09	4h08
Zürich	47°22'N	66°06'	19°18'	15h57	8h28

Ein Arm des Golfstroms, der sogenannte Irminger Strom, fliesst entlang der südlichen und westlichen Küste Islands und bewirkt das moderate Klima in diesem Gebiet. Der kalte Ost Grönland Strom fliesst westlich von Island gegen Süden. Ein Arm dieses Kaltwasserstroms, der sogenannte Ost Island Strom, umfließt den Norden und Osten Islands (siehe Abbildung 13) Dies widerspiegelt sich in den Oberflächenwassertemperaturen rund um Island. Während den kältesten Monaten (Januar – März) betragen die Wassertemperaturen um die +2°C. In den Sommermonaten (Juni – August) erreichen die Wassertemperaturen +10°C an der südlichen und westlichen Küste, an der nördlichen Küste erreicht sie +8°C, im Osten bleiben die Wassertemperaturen jedoch unter +8°C. In Jahren mit viel Meereis aus dem Norden Islands kann es vorkommen, dass die Meerestemperaturen im Sommer nahe den Bedingungen im Winter liegen.

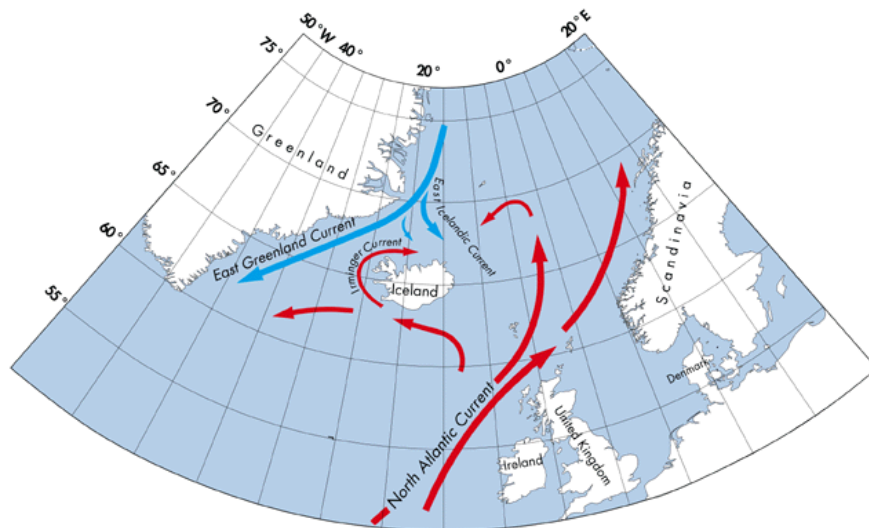


Abbildung 13: Ozeanströme, welche das Klima Islands beträchtlich beeinflussen (Quelle: Universität Island).

Das kalte maritime Klima Islands ist stark durch das kalte Ozeanwasser geprägt, welches Island umfließt. Die Karte der Jahresmitteltemperatur zeigt, dass nur im Süden und Südwesten des Landes durchschnittlich 4 – 6°C (Lufttemperatur) erreicht werden. Im Norden und Osten des Landes, wo die Kaltwasserströme auf Island treffen, ist es deutlich kälter. Auch in den Höhenlagen, den sogenannten *Highlands*, werden tiefere Durchschnittstemperaturen gemessen.

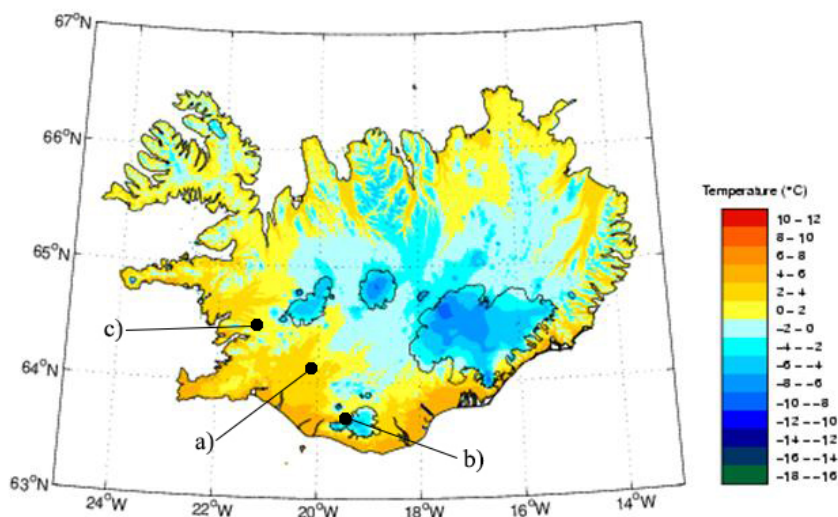


Abbildung 14: Jahresmitteltemperatur (1961 – 1990), Standorte: a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island, modifiziert).

Die mittleren Temperaturen des wärmsten Monats (Juli) erreichen 10°C in den tiefer gelegenen Gebieten im Süden und Westen Islands. In den restlichen Gebieten bleiben die Temperaturen unterhalb 10°C. In den wärmsten Tagen können die Temperaturen +20 bis +25°C erreichen.

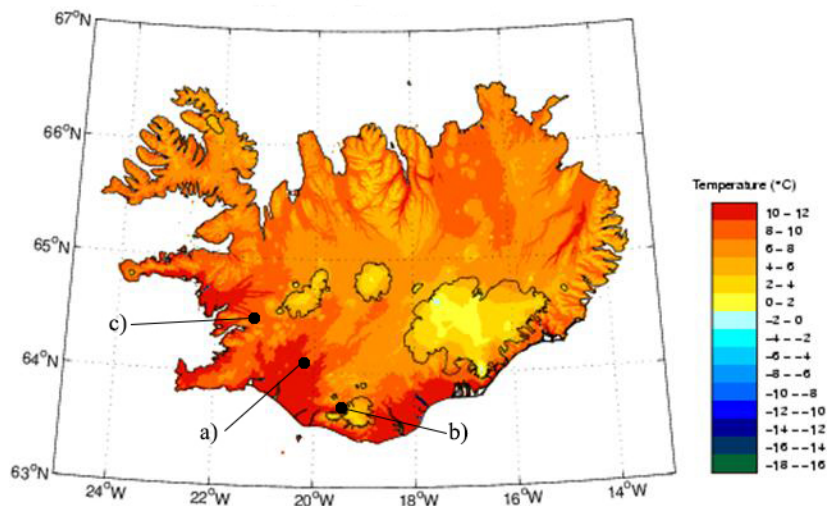


Abbildung 15: Mittlere Julitemperaturen (1961 – 1990), Standorte: a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island, modifiziert).

Die Winter in Island sind generell eher mild für diesen Breitengrad. Die mittleren Januartemperaturen der Küstennahen, tiefer gelegenen Gebiete sind nahe dem Gefrierpunkt (0°C). In den *Highlands* im Landesinnern steigen die Temperaturen nicht über -10°C an. Die tiefsten Wintertemperaturen werden im Norden Islands und in den *Highlands* im zentraleren Teil Islands gemessen und bewegen sich zwischen -25 und -30°C.

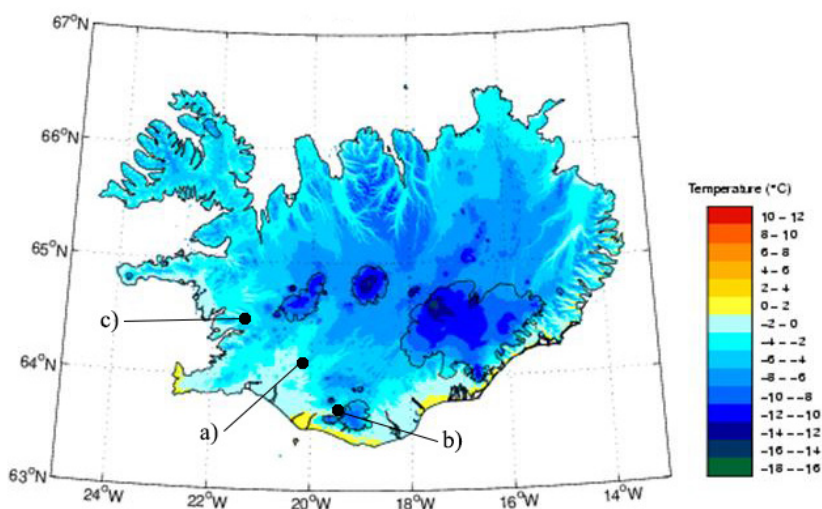


Abbildung 16: Mittlere Januartemperaturen (1961 – 1990), Standorte: a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island, modifiziert).

Die höchsten Niederschlagswerte werden auf dem Eisschild von Vatnajökull und Mýrdalsjökull im Südosten Islands gemessen, mit geschätzten jährlichen Niederschlagsmengen von mehr als 4000 mm. In tiefer gelegenen Gebieten fällt deutlich weniger Niederschlag, rund 1600 mm pro Jahr. Im Südwesten und Westen Islands fallen in den sogenannten *Lowlands* und in den Küstenregionen 1000 – 1600 mm pro Jahr, weiter im Landesinnern 700 – 1000 mm. Im Norden und Nordosten fallen deutlich kleiner Niederschlagsmengen, rund 400 – 600 mm oder weniger pro Jahr. Die Menge an Niederschlag hängt von den lokalen Bedingungen ab und kann auf kleinem Raum stark variieren. Ein Grossteil des Niederschlags fällt während des Herbsts und frühen Winters, wobei im Oktober normalerweise die höchsten Werte erreicht werden (Einarsson, 1984).

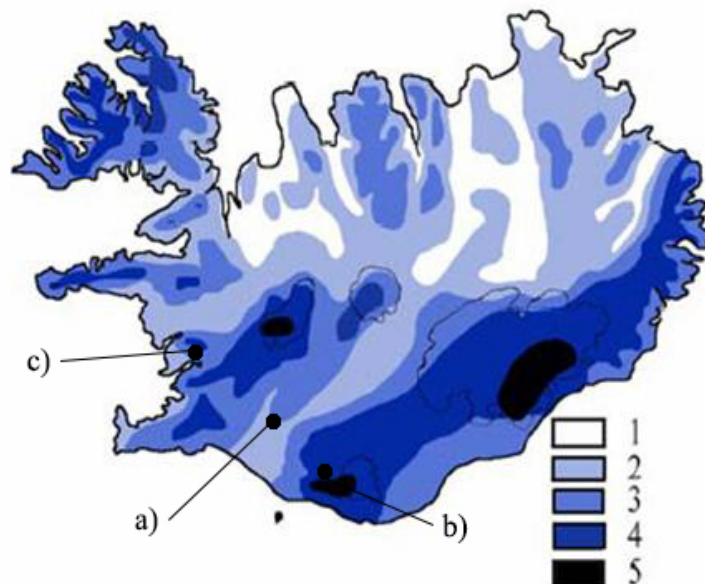


Abbildung 17: Mittlere Jährliche Niederschlagsverteilung für die Periode 1931-1960: 1: < 600 mm, 2: 600 – 1199 mm, 3: 1200 – 1999 mm, 4: 2000 – 3999 mm und 5: > 4000 mm. Standorte: a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island, modifiziert).

5.1. Klima am Standort Hekla

Tabelle 2: Klimatische Kennzahlen des Standortes an der Hekla (Quelle: Universität Island).

Mittlere Jahrestemperaturen [°C]	Mittlere Julitemperaturen [°C]	Mittlere Januarterperaturen [°C]	Geschätzter Jahresniederschlag [mm]
0 – 2	6 – 8	-4 – -2	1200 – 2000

5.2. Klima am Standort Eyjafjallajökull

Tabelle 3: Klimatische Kennzahlen des Standortes am Eyjafjallajökull (Quelle: Universität Island).

Mittlere Jahrestemperaturen [°C]	Mittlere Julitemperaturen [°C]	Mittlere Januarterperaturen [°C]	Geschätzter Jahresniederschlag [mm]
0 – 2	6 – 8	-4 – -2	2000 – 4000

5.3. Klima am Standort Vatnshornsskogur

Tabelle 4: Klimatische Kennzahlen des Standortes Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island).

Mittlere Jahrestemperaturen [°C]	Mittlere Julitemperaturen [°C]	Mittlere Januarterperaturen [°C]	Geschätzter Jahresniederschlag [mm]
0 – 2	6 – 8	-6 – -4	1200 – 2000

6. Historische Waldvegetation

Island wurde um das Jahr 870 n. Chr. durch die Wikinger besiedelt (*landnám* – Altnordisch für Landnahme). In der Literatur wird davon ausgegangen, dass zu dieser Zeit 15 – 40% der Fläche Islands mit Birken bewachsen war. Ein Grossteil des ursprünglichen Waldbestandes dürfte sich im Tiefland nahe der Küste befunden haben. Die Rodung der Wälder erfolgte hauptsächlich in zwei Phasen: In den Jahren nach der *landnám* musste Weideland für das Vieh der Bevölkerung geschaffen werden. Später dann, als in Island die Verarbeitung von Metall und die Eisenverhüttung wichtiger wurden, schritt die Abholzung voran. So wurden in vielen Wäldern die Bäume vor Ort zu Kohle weiterverarbeitet. Solche Kohlegruben wurden an verschiedenen Standorten gefunden und auf das Jahr 1300 n. Chr. datiert. Die Rodung der Birkenwälder nahm in Island seinen Lauf, so dass der heutige Birkenwaldbestand in Island weniger als 1% der Landoberfläche beträgt, wobei ein Grossteil davon durch Aufforstung im 20. Jh. zustande kam (Church et al. 2007).



Abbildung 18: Historische Karte Islands aus dem Jahr 1645. Es ist kein Wald auf dieser historischen Karte vermerkt (Quelle: <http://commons.wikimedia.org>, Original von Willem und Joan Blaeu).

7. Probenmaterial

Gebiete mit einem ursprünglichen Birkenwaldbestand, welche sich als Untersuchungsstandorte eignen, sind so abgelegen, dass sich ein Abbau nicht lohnte und so nicht der Rodung zum Opfer fielen. Zudem sollten sie nahe am Vulkan wachsen und nicht durch anthropogene Tätigkeiten gestört sein.

7.1. Moor-Birke - *Betula pubescens*



Abbildung 19: *Betula pubescens* am Standort nahe dem Eyjafjallajökull (Foto: Camille Eichmann).

Betula pubescens Ehrh. ist der lateinische Name für die Moor-Birke (Erhardt et al., 2002), sie gehören der Familie der Birken-gewächse an (*Betulaceae*). Sie zählt zu den am häufigsten vorkommenden Baumarten des Nord-Atlantischen Gebiets. Die Moor-Birke kann von Nordamerika bis Südgrönland und Island, als auch im nördlichen und westlichen Europa, von Spanien bis nach Sibirien gefunden werden (Krüssman, 1976). Sie wächst vorwiegend in Kalksteinarmen, feucht sumpfigen Regionen, wie sie an den Untersuchungsstandorten vorzufinden sind. *B. pubescens* erträgt extreme Wintertemperaturen, ist aber auf Trockenheit im Sommer anfällig. In Sumpfgebieten wird die Moor-Birke oft in Gemeinschaft mit der Schwarz-Erle (*Alnus glutinosa* Gaertn.) gefunden (Schweingruber, 1993). In Island

ist die Moor-Birke die einzige Baumart, die ohne anthropogene Unterstützung überleben kann. Im Unterschied zu den Birken, welche auf dem europäischen Kontinent bis zu 20 m hoch werden können, sind die meisten Birken Islands weniger als zwei Meter gross. Lokal können sich die Birken durchaus gut entwickeln, im Untersuchungsgebiet erreichten die grössten Exemplare eine Höhe von maximal neun Meter. Diese gut entwickelten Birkenwä-

der gedeihen in geschützten Tälern, wie es die Þórsmörk in der Nähe des Eyjafjallajökulls ist (www.iceland-nh.net, 2014).

7.2. Standortbeschreibung

Für die Untersuchung wurden drei Standorte für die Probennahme definiert. Diese Standorte sollten unter anderem folgende Kriterien erfüllen:

- a) Der Waldbestand sollte möglichst nicht von anthropogenen Tätigkeiten beeinflusst sein. So sollte der Birkenbestand dem ursprünglichen Waldbestand Islands entsprechen und das Wachstum der Bäume sollte nicht durch Düngemassnahmen von Menschenhand unterstützt sein.
- b) Die Standorte sollten möglichst nahe am Vulkan gelegen sein (Hekla und Eyjafjallajökull), damit eine möglichst direkte Beeinflussung des Wachstumsverhaltens der Bäume durch den Vulkanausbruch auftritt.
- c) Da die ursprünglichen Birkenwälder Islands unter Schutz stehen, konnten dank einer Sondergenehmigung der isländischen Forstverwaltung einige wenige Bäume gefällt werden. Es konnten sieben Stammscheiben zur Untersuchung mit in die Schweiz genommen werden.
- d) Der Kontrollstandort (Vatnshornsskogur) sollte keine direkte Beeinflussung durch die Vulkanaktivität erfahren haben. Durch eine genügend grosse Entfernung zu den beiden Vulkanen (Hekla und Eyjafjallajökull) sollte dieses Kriterium erfüllt worden sein.

Der Standort Hekla liegt 50 km nördlich des Standorts am Eyjafjallajökull entfernt. Die Distanz zwischen Hekla und dem Kontrollstandort Vatnshornsskogur beträgt 90 km, in nordwestlicher Richtung. Somit liegt der Standort an der Hekla zwischen den beiden Standorten Eyjafjallajökull und Vatnshornsskogur, welche gut 130 km voneinander entfernt liegen (siehe Abbildung 20).

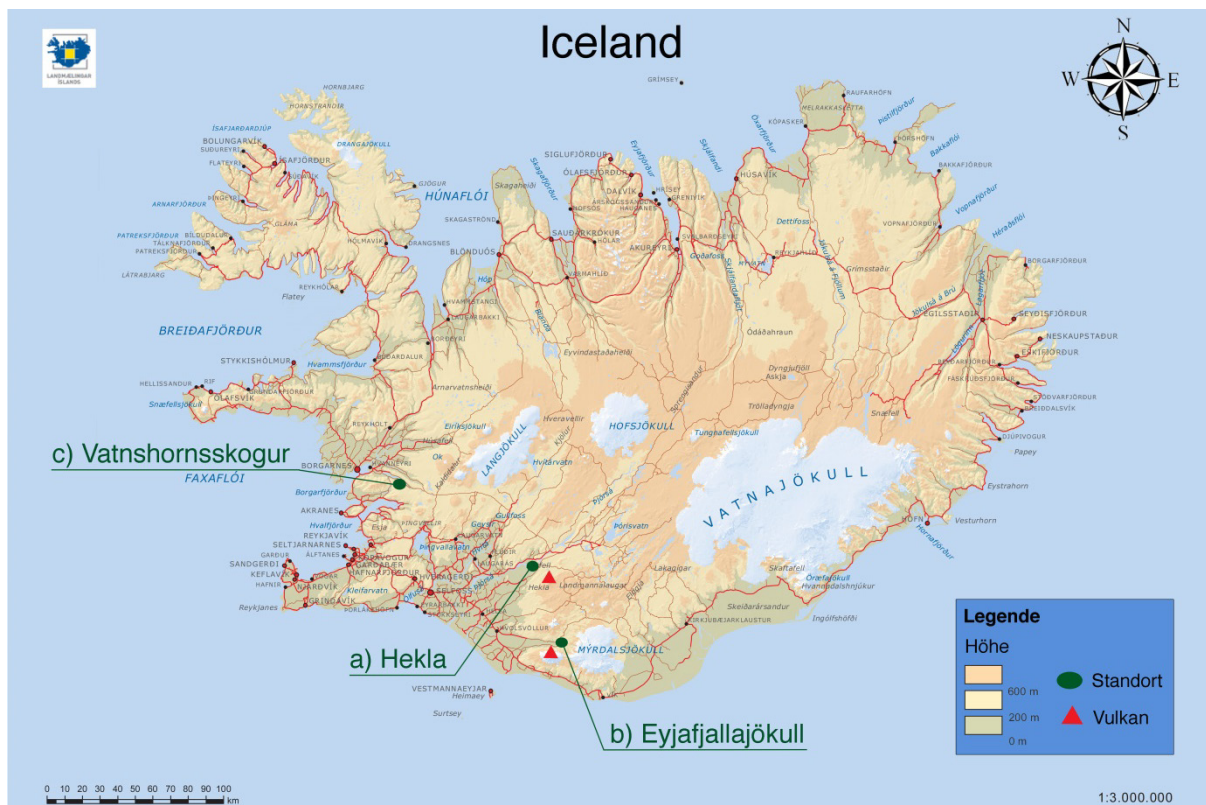


Abbildung 20: Karte Islands mit den drei Untersuchungsstandorten a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: National Land Survey of Iceland, modifiziert).

7.2.1. Standort Hekla

Der Forschungsstandort befindet sich rund elf Kilometer vom Vulkan Hekla entfernt, in NNW Richtung gelegen. Mit einem Gefälle von durchschnittlich 10° fällt das Gelände in SW Richtung ab. Die beprobten Bäume liegen zwischen 168 m ü. M. und 195 m ü. M. Insgesamt wurden bei 22 Bäumen Holzproben genommen. Anhand der Bodenkarte der *National Land Survey of Iceland* wurde für diesen Standort der Bodentyp *Andosol* (World Reference Base, 2006) bestimmt. Ganz in der Nähe fließt der Þjórsá durch die ansonsten karge Landschaft.



Abbildung 21: Standort Hekla, Feldarbeit Mai 2013 (Foto: Camille Eichmann).

7.2.2. Standort Eyjafjallajökull

Der Forschungsstandort liegt sieben Kilometer vom Eruptionsherd des Eyjafjallajökulls entfernt, in einem seitlichen Ausläufer des Haupttals, welches durch den Fluss Krossá geformt wird. Die 20 beprobten Bäume liegen auf einer Höhe von 206 m ü. M. bis 251 m ü. M. Das Tal in welchem sich die Bäume befinden, fällt mit einem Gefälle von 12° in westlicher Richtung ab. Die Bodenart für diesen Standort wurde, ebenfalls anhand der Bodenkarte, als *Andosol* (World Reference Base, 2006) bestimmt.



Abbildung 22: Standort Eyjafjallajökull, Feldarbeit Mai 2013 (Foto: C. Eichmann).

7.2.3. Standort Vatnshornsskogur

Der Kontrollstandort Vatnshornsskogur, rund 50 km nördlich von Reykjavik gelegen, befindet sich am Südwestufer des Sees Skorradalvatn. Der Hang an dem sich die Bäume wachsen fällt mit 10° in Richtung des Sees ab, also in nordöstlicher Richtung. Mit einer Höhenlage von 88 m ü. M. bis 106 m ü. M. liegt dieser Standort ein wenig tiefer als die beiden anderen Standorte. Durch seine Distanz zu den Vulkanen Hekla und Eyjafajallajökull (100 km zur Hekla und 130 km zum Eyjafajallajökull) gab es in diesem Gebiet keine direkte Beeinflussung durch eine Ascheschicht von einem Vulkanausbruch der beiden Vulkane. Der vorgefundene Bodentyp *Histic Andosol* (Arnalds, 2004) wird in Gebieten Islands gefunden, welche weit entfernt von Vulkanen liegen. Dieser Bodentyp deutet auf sumpfiges Gebiet hin, was sich mit den gemachten Beobachtungen vor Ort deckt. An diesem Standort wurden 24 Bäume beprobt.



Abbildung 24: Kontrollstandort Vatnshornsskogur am Ufer des Skorradalsvatn, nördlich von Reykjavik gelegen (Foto: Camille Eichmann).

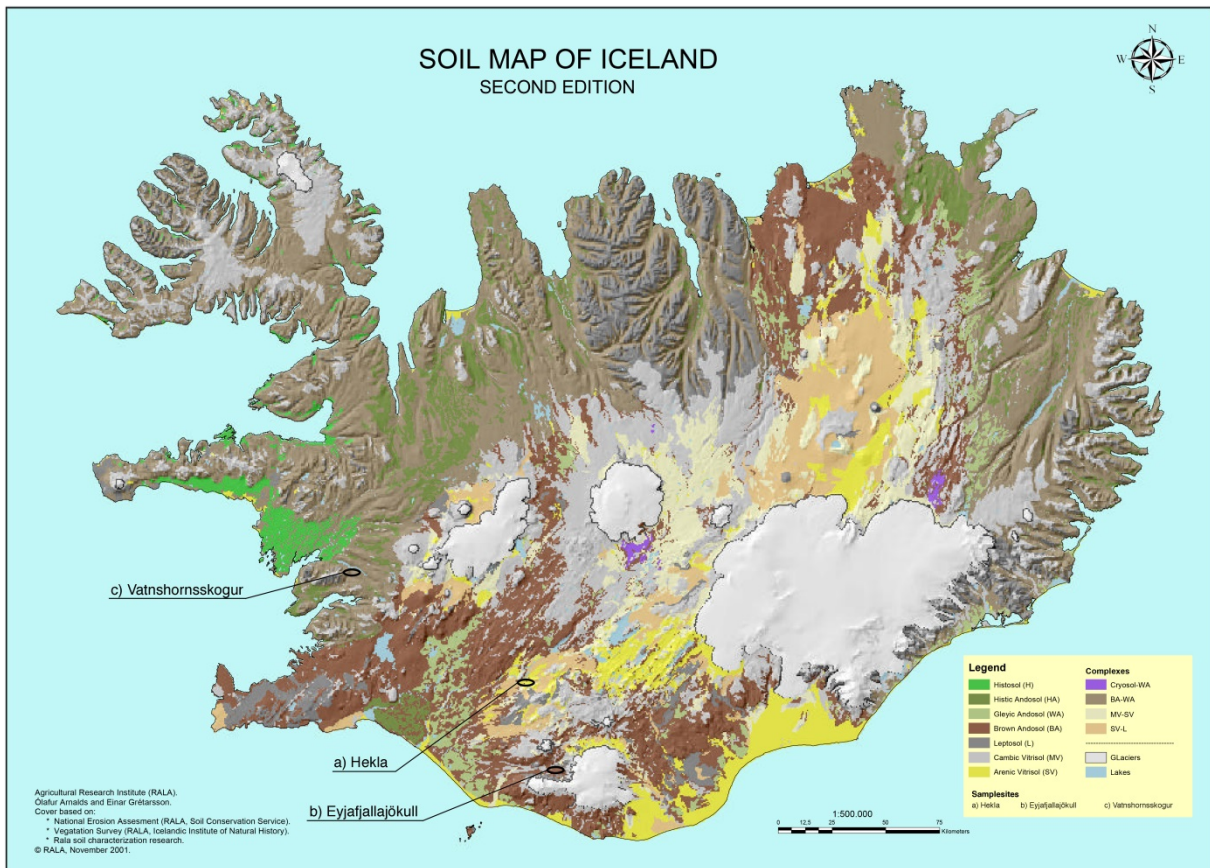


Abbildung 23: Bodenkarte Islands mit den Standorten a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: National Land Survey of Iceland, modifiziert)

7.3. Probennahme

An den drei Standorten (Hekla, Eyjafjallajökull und Vatnshornsskogur) wurden zu Beginn der Vegetationsperiode 2013, vom 21.05.2013 – 23.05.2013, die Proben für diese Masterarbeit genommen. Unter grosszügiger Mithilfe von Ólafur Eggertsson und Þorbergur Hjalti Jónsson vom Isländischen Waldforschungsinstitut Mógilsá wurde die Feldarbeit erledigt.

Insgesamt wurden 66 dominante Bäume für die spätere Analyse ausgewählt, vermessen und beprobt. So wurde die Höhe der Birke und deren Durchmesser auf 50 cm und auf Brusthöhe (130 cm) gemessen. Es wurden sieben Birken mit einer Motorsäge gefällt, um Stammscheiben zu erhalten. Die restlichen 59 Proben wurden mit einem für die Dendrochronologie üblichen Bohrer genommen. Da die beprobten Birken im Durchmesser nicht allzu mächtig waren, konnte durch den gesamten Stamm gebohrt werden, um so zwei Radien pro Baum zu erhalten (L: linker Baumradius / R: rechter Baumradius). Somit kommen total 132 Proben zusammen. Die Stammscheiben wurden auf einer Höhe von 50 cm ab Bodenoberfläche genommen. Um vergleichbare Werte zu haben, wurden die Bohrkernkerne auf derselben Höhe genommen, vereinzelt jedoch auf 80 cm beziehungsweise auf einem Meter Höhe. Baumproben sollten nicht unmittelbar über der Bodenoberfläche genommen werden, da nicht Wurzel-, sondern Stammholz beprobt werden soll. Ab einer Höhe von 50 cm sollte kein Wurzelholz die Analysen mehr verfälschen.

Tabelle 5: Anzahl Proben am jeweiligen Standort.

Standort	Stammscheiben	Bohrkerne	Total
Hekla	6	16	22
Eyjafjallajökull	1	19	20
Vatnshornsskogur	0	24	24
Insgesamt	7	59	66

Es wurde darauf geachtet, dass die Bohrrichtung quer zum Gefälle des Hangs liegt, um allfällige Zugholzbildungen zu umgehen. Bei Zugholz handelt es sich um Reaktionsholz von Laubbäumen auf der zugbeanspruchten Seite, wie es beispielsweise an Astoberseiten oder an der Hangoberseite zu beobachten ist (Kaennel und Schweingruber, 1995). So wirkt das Zugholz der Gravitation entgegen, sprich der Baum richtet sich in einem Hang auf, um möglichst



Abbildung 25: Ólafur Eggertsson (rechts) und Þorbergur Hjalti Jónsson (links) im Untersuchungsgebiet in der Nähe des Eyjafjallajökull unterwegs, Mai 2013 (Foto: Camille Eichmann).

senkrecht wachsen zu können (Thomas, 2000). Das Ziel ist eine möglichst ungestörte Probe zu erhalten, sprich es sollte dort gebohrt werden, wo der Baum keine Verletzung oder sonstige Wachstumsstörungen aufweist.



Abbildung 26: Borhkernentnahme (Camille Eichmann) am Standort Eyjafjallajökull, Mai 2013 (Foto: Ólafur Eggertsson).

Um einem allfälligen Schimmelbefall vorzubeugen, wurden die Proben vor Ort getrocknet. Dazu wurden die Stammscheiben als auch die Bohrkern während gut einer Woche im *Guesthouse* des staatlichen Waldforschungsinstituts in Móglisá, luftgetrocknet.



Abbildung 27: Zum Trocknen aufgereichte Stammscheiben und Bohrkern im *Guesthouse* (Foto: Camille Eichmann).

8. Methoden

Die Proben wurden für die dendrochronologische Untersuchung, als auch für die Isotopenanalyse im Labor Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf vorbereitet. Das Probenmaterial wurde dann mit dendrochronologischen Standardmethoden analysiert, ebenfalls an der WSL. Für die Isotopenanalyse wurde mit dem Paul Scherer Institut (PSI) in Villingen zusammengearbeitet und die Komponentenanalyse wurde an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) am geologischen Institut in Zürich gemacht.

8.1. Dendrochronologische Analyse

Damit die Baumringe gut sichtbar wurden, musste eine möglichst glatte Oberfläche geschaffen werden, was mit einem *Core-Microtome* gemacht wurde. Dann wurden die Jahrringe mit Hilfe eines Messtischs und einem Mikroskop vermessen. Dafür wurde die TSAPWin Computersoftware verwendet. Das Crossdatieren geschah in zwei Schritten, zum einen mit den statistischen Auswertungen der COFECHA Software und zum anderen in TSAPWin selber. Mit den so erhaltenen Daten konnte eine Chronologie für die jeweiligen Standorte erstellt werden. Sogenannte Pointer Jahre wurden mit Hilfe der WEISER Software definiert und Korrelationen zwischen Jahrringbreite und Klimabedingungen mit der DENDROCLIM 2002 Software berechnet.

8.1.1. Theoretische Grundlage – Baumwachstumsmodell

Das Wachstum der Bäume wird nach Cook und Briffa (1990) durch verschiedene Einflussfaktoren bestimmt. Natürliche und anthropogene Umweltfaktoren wirken auf das Baumwachstum ein, was zur unterschiedlichen Ausbildung der einzelnen Jahrringe führt, welche ein Produkt dieser Einflussfaktoren sind. Dies ergibt folgende Formel:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t$$

Formel 1: Jahrringbreite als Produkt verschiedener Einflussfaktoren (Quelle: Cook and Briffa, 1990).

R_t = Jahrringwachstum in einem Jahr, wobei t das jeweilige Jahr bezeichnet

A_t = altersbedingter Wachstumstrend, durch normale physiologische Alterungsprozesse bedingt

C_t = Klimafaktor, der während des Jahres aufgetreten ist (z. B. Niederschlag und Temperatur)

$\delta D1_t$ = Störungsfaktor innerhalb des Waldbestandes (z. B. Windwurf von Bäumen)

$\delta D2_t$ = Störungsfaktoren von ausserhalb des Waldbestandes (z. B. Insektenausbruch, welcher die Bäume entblättert, was zu einer Wachstumsreduktion führt)

E_t = weitgehend ungeklärte Jahr zu Jahr Variabilität, die nicht durch die anderen Faktoren erklärbar ist

Der griechische Buchstabe δ vor D1 und D2 in Formel 1 ist “0” für das Fehlen oder “1” für das Vorhandensein des Störungssignals.

8.1.2. Temperatur – Limitierender Faktor

Justus von Liebig erkannte 1855, dass gutes Pflanzenwachstum nur möglich ist, wenn kein Wachstumsfaktor (Wasser, Luft, Temperatur, Licht, etc.) oder Nährelement fehlt. Er fasste diese Erkenntnis im „Gesetz vom Minimum“ zusammen (Alsing, 2002). Die Dendrochronologie arbeitet mit diesen limitierenden Faktoren, welche das Wachstum jedes Baumes nur in einem bestimmten Masse erlauben (Grissino-Mayer, 2014). Im Falle von Island ist dieser limitierende Faktor die Temperatur (Levanič & Eggertsson, 2008). Diese spielt auch im oben erwähnten Baumwachstumsmodell eine Rolle und ist mit dem Buchstaben C_t gekennzeichnet. Ist die Temperatur zu tief, so kommt es zu verringertem oder gar ausbleibendem Baumwachstum (Fritts, 2012, Hughes, 2002). Insofern wurden die aus der dendrochronologischen Analyse erhaltenen Daten mit den vorherrschenden Temperaturen, sprich dem limitierenden Faktor abgeglichen. Auskeilende oder fehlende Jahrringe mussten dann im Prozess des *crossdating* manuell korrigiert und eingefügt werden. *Crossdating* ist die Anpassung der Variationen von Jahrringbreiten oder anderen Jahrringmerkmalen zwischen Bäumen. Dies erlaubt die exakte Bestimmung des Entstehungsjahres eines jeden Jahrrings oder der Herkunft der Bäume.“ (Kannel und Schweingruber, 1995).

8.1.3. Datierung und Messung der Jahrringe

Nachdem die Proben schon auf Island getrocknet wurden, konnten die Bohrkerne und Stammscheiben für die Jahrringmessung vorbereitet. Die Proben wurden mit einem *Core-Microtome* bearbeitet. Dazu mussten die getrockneten Proben befeuchtet werden, damit die Klinge einen

sauberen Schnitt machte, ohne dabei die ansonsten spröden Zellwände zu zerstören. Um gute Resultate zu erhalten, werden dünne Schichten abgehobelt (10 – 20 μm). Zudem sollte die Klinge nach fünf Proben gewechselt werden, um eine möglichst sauber geschnittene Oberfläche zu erhalten. Beim Einspannen der Proben in den Probenhalter muss darauf geachtet werden, dass die Bohrkern richtig ausgerichtet sind, so dass die Jahrringe in einem 90° Winkel angeschnitten werden. Dies ist wichtig um die Baumringe gut sichtbar zu machen und sie anschließend korrekt vermessen zu können (Gärtner und Nievergelt, 2010).

Nun wurden die Jahrringe der Proben mit Hilfe eines Mikroskops (Leica Wild M8, Deutschland) gezählt und datiert. Alle 10 Jahrringe wurden auf der Probe mit einem Nadelstich markiert, um später beim Messen und *crossdating* einen Anhaltspunkt zu haben.

Der nächste Schritt war das Messen der Jahrringbreiten, mit einem Lintab Messsystem (Rinntech, Deutschland). Um eine möglichst genaue Messung zu erhalten, wird der grösstmögliche Vergrößerungsfaktor (Vergrößerung: 40x) am Mikroskop (Leica Wild M8, Deutschland) eingestellt. Durch das Verschieben des Messtischs kann nun die Jahrringbreite auf 1/100 mm genau bestimmt werden. Die Software TSAPWin (Rinntech, Deutschland) registriert die feinen Verschiebungen am Messtisch und zeichnet diese in einer sogenannte Messreihe auf.

Soweit dies aufgrund der Qualität der Probe möglich war wurden sämtliche Proben vermessen. Teilweise konnte nicht der ganze Bohrkern vermessen werden, da das Holz Störungen aufwies oder der Bohrkern in Teilstücke zerbrochen ist. Probleme stellten sich aufgrund der Anatomie des Birkenholzes, da die Jahrringe teilweise sehr schmal ausgebildet wurden, sind die Baumringe teilweise nur zu erahnen gewesen.

8.1.4. Statistische Analyse mit COFECHA

Um sicher zu stellen, dass die Jahrringe richtig gemessen wurden und das *crossdating* korrekt gemacht worden ist, wurden sie mit der Software COFECHA (Holmes 1983, Speer 2010) überprüft. Diese Software identifiziert Segmente in jeder gemessenen Serie und testet, ob Fehler beim *crossdating* oder Messfehler vorhanden sind.

Die Software analysiert die Genauigkeit des *crossdating* aller gemessenen Serien indem die Messreihen in kürzere Segmente aufgeteilt werden. Für diese Forschungsarbeit ist die Segmentlänge 30 Jahre gewählt worden. Mit statistischen Korrelationstechniken vergleicht COFECHA jedes Segment mit einem gleichlangen Segment, welches aus dem Durchschnitt aller Serien gebildet wurde. Im nächsten Analyseschritt verschiebt sich dann der Segmentabschnitt um die Hälfte der Segmentlänge (15 Jahre) und COFECHA vergleicht dann dieses

Segment wiederum mit dem Durchschnitt aller Serien. Dies wird wiederholt, bis die gesamte Serie getestet ist.

Liegt ein Segment unterhalb der statistischen Signifikanzschwelle, wird dies von COFECHA gekennzeichnet. Anhand von möglichen alternativen Positionen wird dann versucht das fehlerhafte Segment manuell an den richtigen Ort zu platzieren. COFECHA zeigt an, dass bei einer Verschiebung des Segments um so und so viele Jahre (addieren oder subtrahieren von Jahren) eine bessere Übereinstimmung erreichen lässt. Fehlerquellen können fehlende Jahrringe oder ein doppelt gezählter Ring sein, welcher aufgrund der Anatomie des Baumes oder durch einen Messfehler entstanden ist. In Jahren wo die klimatischen Bedingungen es dem Baum nicht erlauben zu wachsen, wird kein Jahrring ausgebildet (Schweingruber, 1996). Solche fehlenden Jahrringe (*missing rings*) können beim *crossdating* gefunden und korrigiert werden. Liegt ein Messfehler vor, wird dieser durch ein erneutes Messen beseitigt. Durch einen weiteren Analysedurchlauf von COFECHA die vorgenommenen Korrekturen bestätigt. Der Korrelationskoeffizient innerhalb einer Serie (Formel 2) ist der Schlüsselmasstab um die Qualität der *crossdating* zu überprüfen. Er sollte > 0.40 sein und misst die Stärke der Gemeinsamkeiten innerhalb der Chronologie eines Standortes.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Formel 2: Für die Analyse von COFECHA berechnete Korrelationskoeffizienten r (Quelle: Speer, 2010)

Neben den oben beschriebenen Analysemöglichkeiten berechnet COFECHA auch die relative Änderung der Ringbreite von einem Jahr zum nächsten, die mittlere Sensitivität (Formel 3). Diese ist positiv, wenn die Korrelation innerhalb der Serie hoch genug ist. Ist die Korrelation und die mittlere Sensitivität hoch, so sind keine grossen Korrekturen vorzunehmen.

$$ms_x = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=n-1} \left| \frac{2(X_{t+1} - X_t)}{X_{t+1} + X_t} \right|$$

Formel 3: mittlere Sensitivität ms_x (Quelle: Speer, 2010)

8.1.5. WEISER Jahre

Die Analysesoftware WEISER zeigt die Zusammenhänge zwischen Klima und Radialwachstum der Bäume auf. Sie basiert auf dem statistischen Vergleich von Baumwachstum Chronologien mit meteorologischen Daten (Temperatur und Niederschlag).

WEISER analysiert die Chronologie auf sogenannte Zeiger Jahre (*pointer years*). Dies sind Jahre in welchen ein Ereignis (erhöhtes oder verringertes Wachstum) in mehreren Baumindividuen registriert worden ist. Zeiger Jahre beziehen sich immer auf eine Gruppe von Bäumen, in diesem Fall auf die Bäume der Standorte Hekla, Eyjafjallajökull oder Vatnshornsskogur. Nach Schweingruber (1996) kann die Häufigkeit solcher Zeiger Jahre aufgrund eines definierten Schwellenwertes bestimmt werden. Dieser Schwellenwert kann auf Prozentsätzen oder auf statistischen Signifikanzen basieren. Für diese Arbeit wurde der Schwellenwert auf 66% gesetzt.

Dieser Schwellenwert gibt die Jahre an, in welchem die Bäume ein positives oder negatives Wachstum aufzeigen. Die restlichen Einstellungen von WEISER entsprechen den Standardeinstellungen und wurden nicht verändert.

8.1.6. Statistische Analyse mit DENDROCLIM 2002

Klimatische Einflüsse sind so vielfältig, dass mehrdimensionale Methoden verwendet werden, sogenannte *response function* und *correlation function*, um Datensätze zu analysieren (Fritts, 1971). So wurden Niederschlags- und Temperaturdaten zusammen mit den gemessenen Jahringbreiten verwendet.

Resultat der Analyse von DENDROCLIM 2002 ist eine Korrelationsfunktion und eine Response Funktion. Diese Funktionen sind die Folge der Koeffizienten zwischen den Baumring Chronologien und den monatlichen klimatischen Bedingungen während der Vegetationsperiode. In der Korrelationsfunktion stammen die Koeffizienten aus einer Pearson Korrelation, während die Response Funktion die Koeffizienten durch eine multivariable Schätzung aus einem Hauptkomponentenregressionsmodell berechnet. Die Parameter wurden so festgelegt, dass die Vegetationsperiode im September des Vorjahres beginnt und im August des Folgejahres endet, dies entspricht dem hydrologischen Jahr. Alle Ergebnisse liegen auf einem statistischen Signifikanzniveau von 0.05 (Biondi und Waikul, 2004).

Die vorhandenen Datensätze aus der dendrochronologischen Untersuchung und die klimatischen Daten wurden in die Software geladen. Durch die Unterschiedliche Länge der Messrei-

hen konnten die Analysen für die folgenden Jahre durchgeführt werden: 1932 – 2011 für die Temperatur (meteorologische Station Hæll) und 1959 – 2003 für die Niederschlagswerte (meteorologische Station Hella).

8.2. Isotopenanalyse

Kohlenstoff hat zwei stabile Isotope (^{12}C und ^{13}C), beide haben sechs Protonen, aber unterschiedliche Anzahl Neutronen, sechs im ^{12}C und sieben im ^{13}C . Diese Isotope sind chemisch gesehen beinahe identisch, sind jedoch unterschiedlich schwer. Das Verhältnis des Kohlenstoffisotops ($\delta^{13}\text{C}$) ist das Verhältnis von ^{13}C zu ^{12}C und wird in Promille ($‰$) angegeben und wird mit folgender Formel berechnet:

$$\delta^{13}\text{C} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1)1000$$

Formel 4: Berechnung von $\delta^{13}\text{C}$, wobei R_{sample} und R_{standard} das $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Verhältnis in der Probe und im Standard ist, hier industriell hergestellte Zellulose mit bekanntem Isotopenverhältnis $\delta^{13}\text{C}$.

Sauerstoff hat drei natürlich vorkommende stabile Isotopenzustände (^{16}O , ^{17}O und ^{18}O) alle haben acht Protonen, jedoch ist die Anzahl Neutronen unterschiedlich. Das Isotop ^{16}O hat acht, ^{17}O neun und ^{18}O hat zehn Neutronen im Kern, somit steigt die Masse im gleichen Umfang an. Das Verhältnis des Sauerstoffisotops ^{18}O zum Standard wird durch $\delta^{18}\text{O}$ bezeichnet, in diesem Fall ist der Standard Vienna-SNOW (*standard mean ocean water*) (McCarroll & Loader, 2004).

Durch die Kontakte von Dr. Paolo Cherubini, war es möglich, die Analyse der Isotopenverhältnisse für $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ am PSI zu machen. Da die Menge an Probenmaterial relativ klein war, die Menge an extrahierter Zellulose bewegte sich zwischen 0.8 mg und 4.0 mg, konnten die nötigen Analysen nicht an der WSL gemacht werden. Das PSI besitzt Geräte, die mit weniger Probenmaterial auskommen. Die nötigen Analyseschritte wurden von Dr. Matthias Sauerer durchgeführt, der als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Gruppe für Ökosystem Flux, am PSI arbeitet. Um die Analysen durchführen zu können musste Zellulose von den einzelnen Jahrringen extrahiert und in Zinn- bzw. in Silberkapseln eingewogen werden. Diese Arbeitsschritte wurden an der WSL durchgeführt.

8.2.1. Probenaufbereitung

Für die Isotopenanalyse ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) wurden für die Standorte Eyjafjallajökull und Vatns-hornsskogur je fünf Proben aufbereitet. Die Bohrkerne wurden so ausgewählt, dass jene genommen wurden, bei welchen die Jahrringe gut sichtbar gewesen sind. Diese Proben mussten mithilfe eines Mikroskopes und einem Skalpell entlang den Jahrringgrenzen gespalten werden, damit die Isotopenverhältnisse für jedes einzelne Jahr bestimmt werden konnte. Die nun aufgeteilten Proben wurden in „Rotilab®-Sicherheitsreaktionsgefäße“ (2 ml) eingefüllt und beschriftet.

Den Proben in den Sicherheitsreaktionsgefäßen wurden zwei Metallkugeln beigegeben und mit Hilfe einer Schwingmühle (Retsch MM 2000, Deutschland) gemahlen. Mit dieser Technik konnten bis zu 16 Proben gleichzeitig bearbeitet werden. Die Proben wurden während zehn Minuten geschüttelt (Amplitude: 70 Hz). Die kollidierenden Kugeln im Reaktionsgefäß zerkleinerten das Holz auf die gewünschte Grösse.

Die nun gemahlten Proben wurden in Teflon Taschen (ANKON F57 Filter Bags, USA) gefüllt und verschweisst. Je nach Menge des vorhandenen Materials wurden bis zu 10 mg eingewogen (Waage: Mettler Toledo XS105 DualRange, Schweiz).

Die verpackten Proben wurden mit einer 5%-Natrium-Hydroxid Lösung (NaOH) versetzt und für vier Stunden im Wasserbad bei 60°C aufbereitet. Bei diesem Arbeitsschritt werden Fette, Harze, Öle, Tannine und Hemizellulose herausgelöst. Die Proben werden anschliessend mit kochendem destilliertem Wasser gewaschen, um Lösungsreste zu entfernen. Als nächstes wurden die Proben für 32 Stunden bei 60°C in einer 7%-Natrium-Chlorid Lösung (NaClO_2) eingelegt. So wird das Lignin aus dem Holz gelöst, so dass nur die Cellulose übrig bleibt, welche dann für die Isotopenmessung gebraucht wird. Nachdem die Proben mit kochendem deionisiertem Wasser durchgespült wurden, trockneten diese über Nacht bei 50°C im Trocknungsschrank. Damit die Proben beim Abkühlen kein Wasser ziehen, werden sie in einen Exsikkator gelegt, bis sie weiter bearbeitet wurden.

Die nun übriggebliebene Zellulose wurde aus den Teflon Taschen genommen und gewogen. Für die weiteren Analyseschritte am PSI, mussten für die $\delta^{13}\text{C}$ Analyse jeweils 0.4 – 0.6 mg Zellulose (bzw. 0.1 – 0.2 mg für die Proben mit sehr wenig Material) in Silberkapseln eingewogen und verschlossen werden. Für die Analyse der $\delta^{18}\text{O}$ Verhältnisse mussten 1.0 – 1.2 mg Zellulose (bzw. 0.4 – 0.6 mg für die Proben mit sehr wenig Material) in Zinnkapseln eingewogen und verschlossen werden (Borella et al., 1998).

8.2.2. Analyse am PSI

Das in Kapseln verpackte Zellulosematerial wird durch ein automatisiertes Verfahren, mit Hilfe eines Isotopenverhältnis Massenspektrometers (IRMS) analysiert. Dazu werden die Proben auf 1000°C (Kohlenstoffmessung) bzw. auf 1100°C (Sauerstoffmessung) erhitzt und verbrannt. Dies geschieht in einem abgeschlossenen System, welches die entstandenen Gase direkt zum Massenspektrometer leitet, wo die Isotope einzeln gemessen werden können. Die Resultate werden mit Standardproben, bei welchen die Isotopenverhältnisse bekannt sind, abgeglichen. Mit dieser Methode können die Isotopenverhältnisse mit hoher Genauigkeit bestimmt werden (0.1 ‰ für C, bzw. 0.3 ‰ für O) (McCarroll & Loader, 2004).

8.3. Chemische Zusammensetzung des Holzes

Pearson et al. (2005) haben aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Holzes ein Signal für den Ausbruch des Tambora Vulkans in Indonesiens im Jahr 1815 gefunden. Das verwendete Holz stammt von Bäumen aus Sarikamisx in der Türkei, also tausende von Kilometer entfernt vom eigentlichen Ausbruch. Es stellt sich also die Frage, ob ein solches oder ähnliches Signal auch für die Bäume in Island und den Ausbruch des Eyjafjallajökulls gefunden werden kann. Dazu wurden zwei Proben, je eine vom Standort Eyjafjallajökull und eine vom Kontrollstandort Vatnshornsskogur analysiert. Die Messung wurde am Institut für Geochemie und Petrologie der ETHZ, von Prof. Dr. Olivier Bachmann und seinem Team mit der LA-ICP-MS (*laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*) Analysemethode gemessen. Dabei wird die Probe mit einem Laser System (ArF Laser (193 nm), New Wave, USA) beschossen um so die chemische Zusammensetzung (Massenspektrometer: Elan6100 DRC quadrupole ICP, West Coast Analytical Service, USA) zu ermitteln (Monticelli et al., 2009). Es wurden folgende Elemente gemessen: Kohlenstoff (^{13}C), Aluminium (^{27}Al), Eisen (^{57}Fe), Nickel (^{62}Ni), Kupfer ($^{63, 65}\text{Cu}$), Zink (^{66}Zn), Strontium (^{88}Sr), Barium (^{137}Ba), für den Zeitraum von 2002 – 2012. Die Resultate zeigen das Verhältnis vom jeweiligen Isotop zum ^{13}C (Monticelli et al., 2009).

8.4. Klimatische Daten

Die Klimadaten, in diesem Fall die Monatsmittelwerte für die Temperatur, bzw. die Niederschlagsdaten, stammen von den meteorologischen Stationen Hella und Hæll im Süden Islands.

Die verwendeten Daten wurden von der meteorologischen Anstalt Islands zur Verfügung gestellt (Homepage: Icelandic Meteorological Office, 19.04.2014). Vom Standort Hæll sind die Temperaturdaten von 1931 bis 2011 und für den Standort Hella von 1958 bis 2004 vorhanden. Für Hæll sind die monatlichen Durchschnittstemperaturen zur Verfügung gestanden. Für die meteorologische Station in Hella konnten Daten über monatlichen Durchschnittstemperaturen, und monatliche Niederschlagsmengen verwendet werden. Beide meteorologischen Stationen befinden sich in der Nähe des Vulkans Hekla. Diese Daten, zusammen mit den Jahringbreiten, wurden mit Hilfe der Software DENDROCLIM 2002 analysiert.

8.4.1. Meteorologische Station Hella

Die meteorologische Station Hella liegt im Süden Islands, auf 20 m ü. M. Es handelt sich dabei um eine automatisierte Beobachtungsstation, welche die Temperatur, den Niederschlag und die Windstärke misst. Die Daten haben eine zeitliche Auflösung von einem Monat und die Messreihe deckt den Zeitraum von 1958 – 2004 ab. Die Station befindet sich in der Ebene zwischen den beiden Standorten Hekla und Eyjafjallajökull.

8.4.2. Meteorologische Station Hæll

Die meteorologische Station Hæll liegt ebenfalls im Süden Islands, rund 20 km westlich vom Untersuchungsstandort Hekla entfernt, auf 121 m ü. M. Für diesen Standort sind mittlere Monatstemperaturen für den Zeitraum von 1931 – 2011 zur Verfügung gestanden.

8.4.3. Klimadiagramm für den Süden Islands

Das Klimadiagramm für Süd-Island (Abbildung 28) zeigt, dass die höchsten Temperaturen ($> 12^{\circ}\text{C}$) während der Vegetationsperiode, von Juni bis August, erreicht werden. Die tiefsten Durchschnittstemperaturen werden in den Monaten Dezember bis Februar gemessen ($< 1^{\circ}\text{C}$). In den Monaten September bis März fällt deutlich mehr Niederschlag (rund 120 mm pro Monat), als in den Monaten April bis August (rund 80 mm pro Monat).

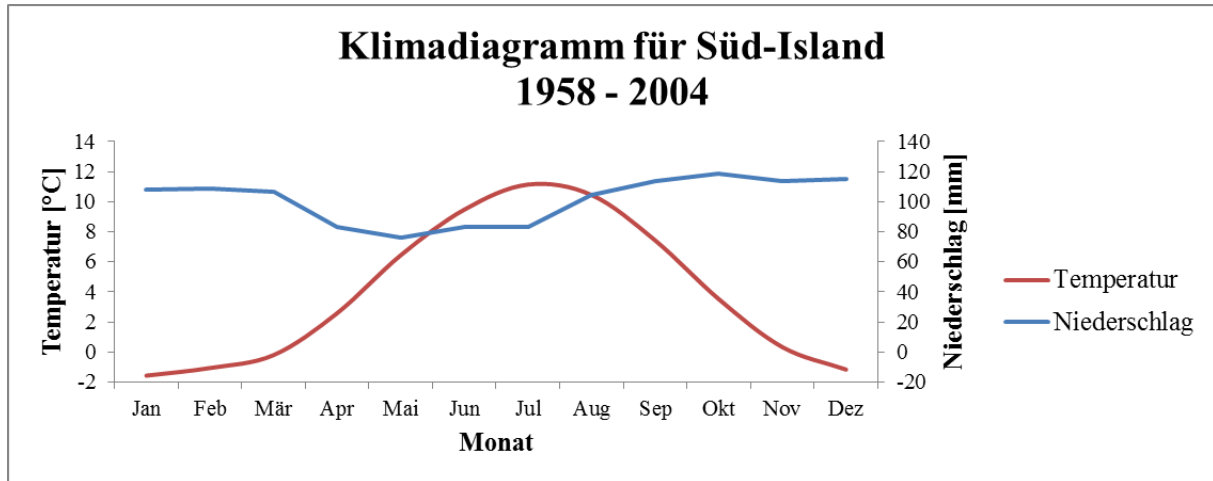


Abbildung 28: Klimadiagramm für Süd-Island, erstellt aus den Daten der meteorologischen Stationen Hæll und Hella.

9. Resultate

In den Resultaten werden die Messungen der Jahrringbreiten, die Weiser Jahr Analyse, die Resultate der Dendroclim 2002 Software, sowie die Messung der Isotopenverhältnisse ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) und die Messung der chemischen Zusammensetzung des Holzes dargestellt und im Detail beschrieben.

9.1. Dendrochronologische Analyse

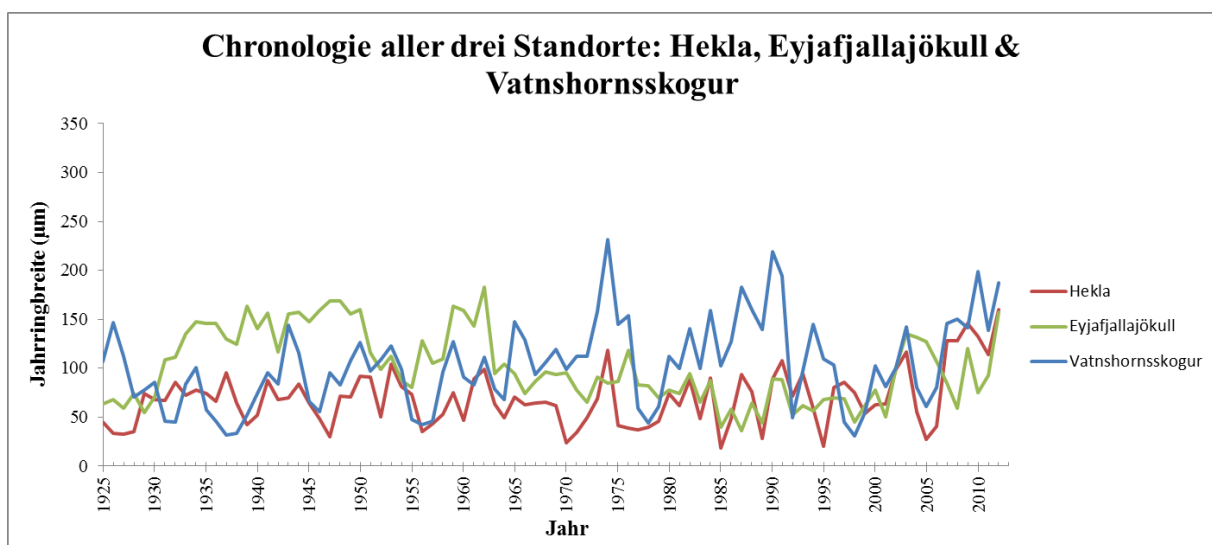


Abbildung 29: Jahrringchronologien aller drei Standorte Hekla (rot), Eyjafjallajökull (grün) und Vatnshornsskogur (blau).

Für jeden der drei Standorte wurde eine Baumringchronologie erstellt (siehe Abbildung 29: Hekla – rot, Eyjafjallajökull – grün und Vatnshornsskogur – blau). Alle Drei beginnen im Jahr 1925 und enden 2012. Die drei Chronologien zeigen unterschiedliche Verläufe, weisen aber auch gemeinsame *Peaks* mit verstärktem oder verringertem Wachstum auf. Von speziellem Interesse sind die Jahre in welchem Eruptionen an der Hekla oder am Eyjafajallajökull auftraten. Die Jahre mit Vulkanausbrüchen der Hekla sind in Abbildung 30 als graue Balken und die Eruption des Eyjafjallajökulls im Jahr 2010 ist in Abbildung 31 als hellgrauer Balken eingezeichnet.

So zeigt im besagten Jahr 2010 der Standort am Eyjafjallajökull ein deutlich verringertes Wachstum. An der Hekla fällt die Reaktion geringer aus, jedoch ist dort ebenfalls weniger Wachstum im Vergleich zum Vorjahr festzustellen. Die Baumringbreiten am Kontrollstandort Vatnshornsskogur, zeigen im Gegensatz zu den beiden anderen Standorten, erhöhte Wachs-

tumsraten auf. Im Jahr 2005 zeigen die Chronologien der beiden Standorte Hekla und Vatnshornsskogur einen deutlich negativen *Peak*, während die Chronologie des Standorts Eyjafjallajökull klar erhöhte Wachstumsraten aufweist. 2002 zeigen alle drei Chronologien erhöhte Wachstumsraten, sprich es kann ein positiver *Peak* identifiziert werden. Im Jahr 1990 sind die Wachstumsraten aller drei Standorte rückläufig. Auffällig ist, dass in der Periode von 1980 – 1990 am Standort Vatnshornsskogur mehr Wachstum verzeichnet wird, als an den beiden anderen Standorten. Im Jahr 1974 steigen die Kurven der beiden Chronologien für die Standorte Hekla und Eyjafjallajökull deutlich an. Am Standort Eyjafjallajökull wuchsen die Bäume im Zeitraum von 1930 – 1950 mehr als an den beiden anderen Standorten. Ein altersbedingter Wachstumstrend kann bei keinem untersuchten Standort ausgemacht werden.

9.1.1. Chronologie Standort Hekla

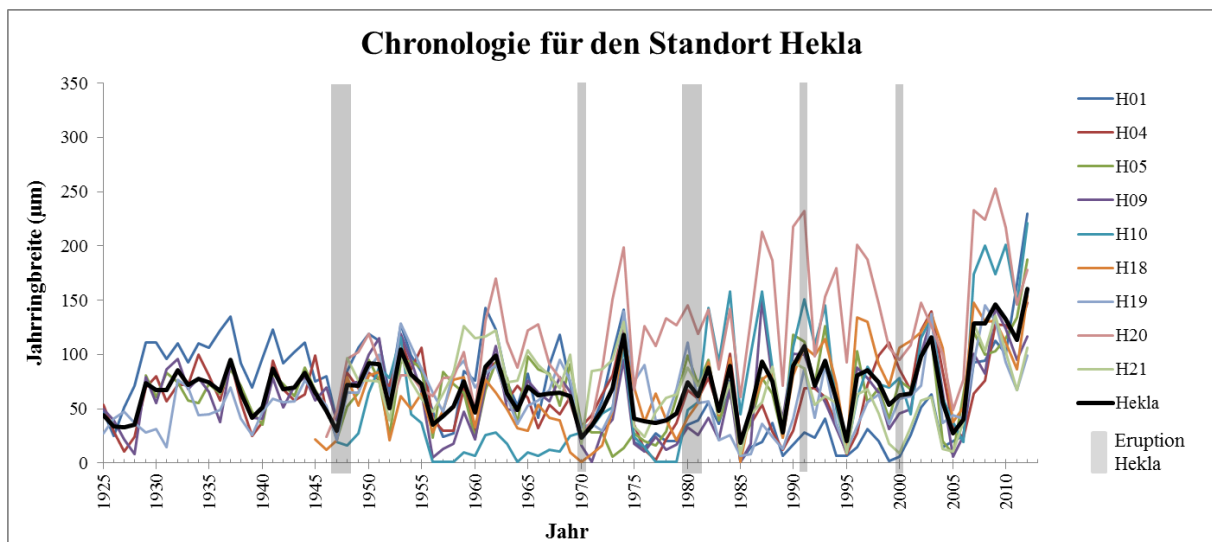


Abbildung 30: Jahrringchronologie für den Standort an der Hekla, bestehend aus neun Bäumen (H01, H04, H05, H09, H10, H18, H19, H20 und H21), dem Mittelwert und den als graue Balken eingezeichneten Eruptionsjahre der Hekla Vulkans (1947/48, 1970, 1980/81, 1991, 2000).

Aus den Jahrringbreiten der neun verwendeten Bäume wurde eine Chronologie erstellt. Diese besteht aus den Mittelwerten der einzelnen Bäume, je zwei Radien ergaben einen Baum (L und R). Die Kurven zeigen keinen Alterstrend, sprich die Bäume wuchsen zu Beginn ihres Lebens im gleichen Masse wie im höheren Alter. Auffällig ist, dass sich nur die Vulkanausbrüche von 1947/48 und 1970 durch ein verringertes Wachstum manifestierten. In den Ausbruchjahren 1980/81, 1991 und 2000 gibt es keine merklichen Reaktionen bezüglich der Jahrringbreite. Im Jahr 2010, also im Jahr der Eyjafjallajökull – Eruption, können keine deutlich verringerten Wachstumsraten festgestellt werden. Klare negative *Peaks* in den Jahrringbreiten

wurden für die Jahre 2005, 1995, 1989, 1985, 1975 – 1979, 1970, 1960, 1956, 1952, 1947, 1940, 1939 und von 1926 – 1928 gemessen. *Peaks* mit verstärktem Wachstum wurden in den Jahren 2012, 2009, 2003, 1997, 1996, 1993, 1991, 1987, 1984, 1982, 1973, 1962, 1961, 1959, 1953, 1951 und 1950 gemessen.

9.1.2. Chronologie Standort Eyjafjallajökull

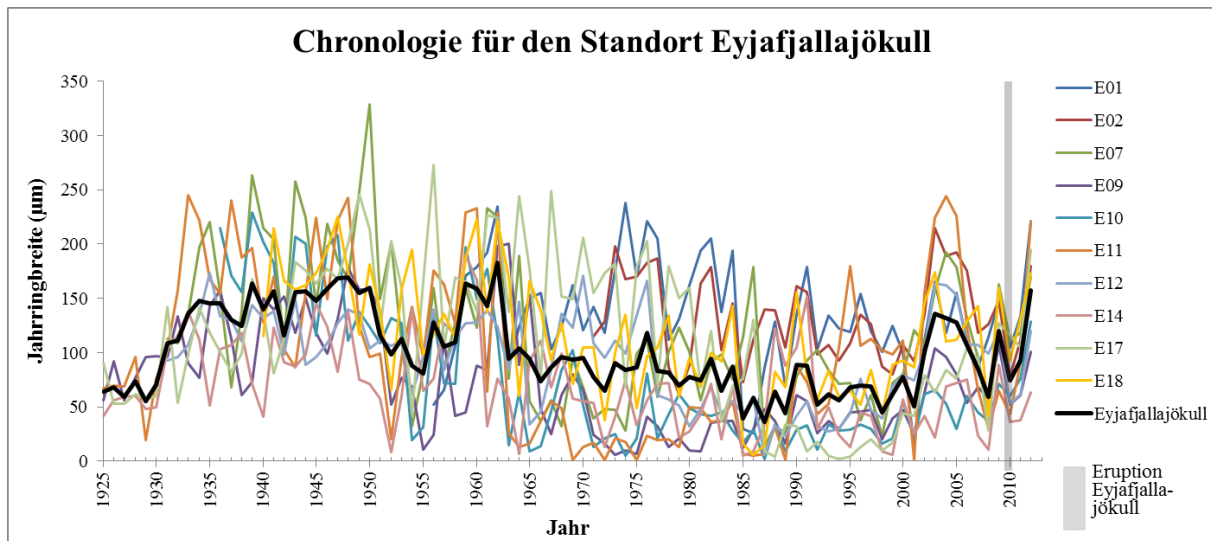


Abbildung 31: Jahrringchronologie für den Standort am Eyjafjallajökull, bestehend aus zehn Bäumen (E01, E02, E07, E09, E10, E11, E12, E14, E17 und E18), dem Mittelwert und als graue Balken eingezeichnet ist die Eruption des Eyjafjallajökulls im Jahr 2010.

Die Chronologie für diesen Standort besteht aus zehn Bäumen. Die Bäume zeigen keinen Alterstrend, sie mussten also nicht weiter bearbeitet werden, um einen allfälligen Trend zu entfernen. Im Ausbruchsjahr des Eyjafjallajökulls (grauer Balken in Abbildung 31) weisen die Bäume ein vermindertes Wachstum auf, ein Negativpeak in den Jahrringbreiten ist die Folge davon. In den Folgejahren 2011 und 2012 kann ein verstärktes Wachstum, bzw. breitere Jahrringe festgestellt werden. Im Jahr vor der Eruption (2009) bildeten die Bäume breitere Jahrringe aus, als in den Jahren 2008 und 2010. Um das Jahr 2005 herum wuchsen einige Bäume auffällig mehr als in der Periode zuvor, von 1965 bis 2002. In der Periode von 1985 bis 1990 wuchsen die Bäume im Mittel nur sehr wenig. Im Jahr 1962 wurden die höchsten durchschnittlichen Wachstumsraten der gesamten Chronologie gemessen. Zwischen 1951 und 1958 gab es eine Phase mit verringertem Wachstum. Auch in der Periode von 1934 bis 1950 sind überdurchschnittlich breite Jahrringe ausgebildet worden. Auch an diesem Standort zeigen die Bäume keinen Alterstrend.

9.1.3. Chronologie Standort Vatnshornsskogur

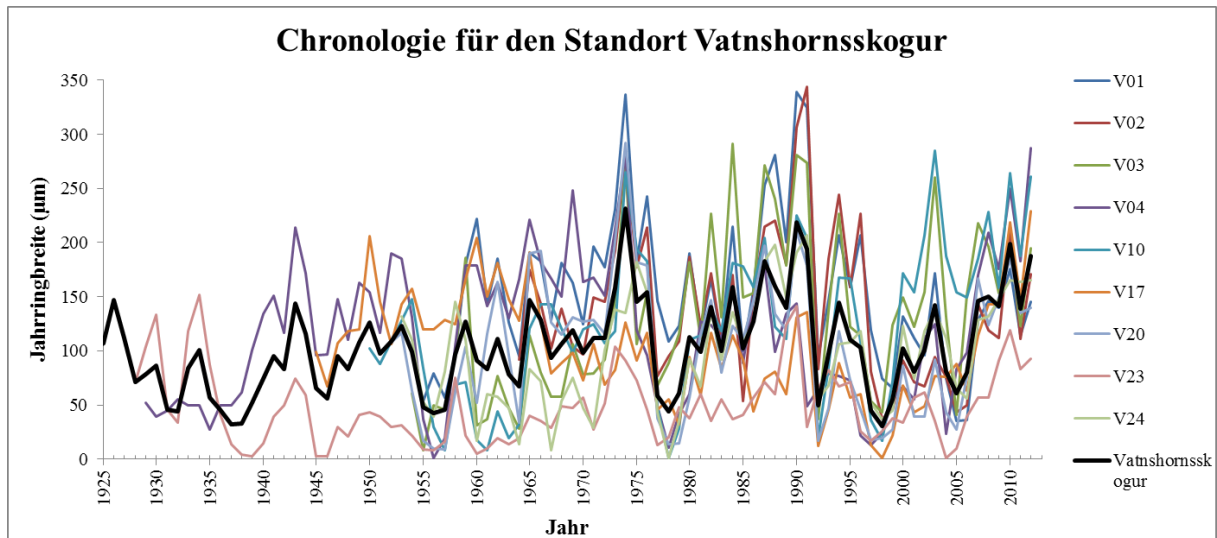


Abbildung 32: Jahringchronologie für den Kontrollstandorts Vatnshornsskogur, bestehend aus neun Bäumen (V01, V02, V03, V04, V10, V17, V20, V23 und V24) und dem Mittelwert.

Die aus den Mittelwerten von neun Bäumen bestehende Chronologie für den Kontrollstandort Vatnshornsskogur zeigt, wie die beiden anderen Standorte, keinen Alterstrend. Deshalb wurden auch für diese Chronologie die Messdaten nicht weiter bearbeitet. Im Jahr 2010 zeigt diese Chronologie ein erhöhtes Wachstum, im Vergleich zu den Jahren zuvor (2005 – 2009) und dem Folgejahr 2011. Weitere negative *Peaks* wurden, nebst dem Jahr 2005, in den Jahren 1998, 1997, 1992, 1977 – 1979, 1964, 1961, 1960, und 1955 – 1957 gefunden. Verstärktes Wachstum und dementsprechend breitere Jahrringe können in den Jahren 2012, 2010, 2004, 2000, 1996, 1991, 1990, 1987, 1984, 1982, 1976, 1974, 1965, 1962 und 1959 ausgemacht werden. Ein Alterstrend wurde für diesen Standort nicht gefunden.

9.1.4. Crossdating Parameter

Die Bäume eines Standorts zeigen ein ähnliches Wachstumsverhalten. Die Gleichläufigkeit (G_{lk}), die Signatur der Gleichläufigkeit (GSL) und der *Crossdating* Index (CDI) innerhalb jeder Chronologie mit den einzelnen Bäumen zeigen an, ob die Bäume richtig datiert und somit die Chronologie korrekt erstellt worden ist. Mit überlappenden Jahren (OVL) sind jene Jahre gemeint, die die einzelnen Bäume und die Chronologie (Mittelkurve des Standorts) gemeinsam abdecken.

Tabelle 6: Überlappende Jahre (OVL), Gleichläufigkeit (Glk), Signatur der Gleichläufigkeit (GSL) und Cross Date Index (CDI) für die Messungen für die Standorte Hekla (H01L bis H21R) Eyjafjallajökull (E01L bis E18R) und Vatnshornsskogur (V01L bis V24R). Die Buchstaben L und R bezeichnen zwei verschiedene Radien desselben Baumes. Die Werte beziehen sich jeweils auf die Mittelkurve der Messungen des jeweiligen Standortes.

Probe	OVL	Glk	GSL	CDI	Probe	OVL	Glk	GSL	CDI	Probe	OVL	Glk	GSL	CDI
H01L	97	81	***	76	E01L	55	79	***	61	V01L	58	83	***	94
H01R	96	83	***	87	E01R	57	71	***	52	V01R	57	84	***	84
H04L	97	73	***	67	E02L	42	91	***	66	V02L	49	86	***	103
H04R	96	79	***	86	E02R	41	81	***	37	V02R	49	82	***	88
H05L	83	73	***	56	E07L	84	79	***	74	V03L	59	87	***	82
H05R	84	74	***	67	E07R	84	79	***	94	V03R	59	87	***	99
H09L	94	76	***	91	E09L	109	66	***	37	V04L	83	72	***	44
H09R	94	89	***	105	E09R	102	71	***	40	V04R	84	76	***	29
H10L	33	83	***	94	E10L	79	82	***	103	V10L	63	81	***	79
H10R	66	82	***	63	E10R	81	81	***	69	V10R	62	76	***	62
H18L	68	72	***	67	E11L	85	75	***	58	V17L	68	81	***	74
H18R	58	71	***	73	E11R	107	81	***	88	V17R	68	77	***	58
H19L	110	75	***	87	E12L	84	75	***	87	V20L	59	78	***	66
H19R	99	77	***	71	E12R	84	78	***	80	V20R	62	84	***	109
H20L	67	81	***	108	E14L	98	81	***	65	V23L	113	65	***	38
H20R	62	87	***	59	E14R	110	78	***	98	V23R	113	72	***	39
H21L	64	85	***	100	E17L	94	66	**	49	V24L	73	73	***	48
H21R	65	78	***	72	E17R	93	75	***	64	V24R	60	79	***	54
					E18L	72	78	***	90					
					E18R	73	77	***	63					

Die Gleichläufigkeit (Glk) ist die Summe der gleichen Steigungen in einem Intervall (ganze Probe) in %. Die Gleichläufigkeit ist bei allen Standorten > 66%, der zu erreichende Schwellenwert liegt bei 60%.

Die Signatur der Gleichläufigkeit (GSL) wird mit ein bis drei Sternen angegeben. Dies sind die Signifikanzniveaus der GSL, so bedeutet ein Stern (*) ein Pearson Signifikanzniveau von 95.0%, zwei Sternen (**) ein Pearson Signifikanzniveau von 99.0% und drei Sterne (***) ein Pearson Signifikanzniveau von 99.9%. Die Werte für die untersuchten Standorte liegen alle bis auf ein Probe (E17L) auf dem $p < 0.01$ Signifikanzniveau (***). Die Probe E17L liegt eine Stufe tiefer auf dem $p < 0.1$ Signifikanzniveau (**).

Der *Crossdating* Index (CDI) ist eine Kombination von Gleichläufigkeit und t-Werten. Die Werte der *crossdatierten* Proben (> 36) liegen alle über dem minimal zu erreichenden Wert von 10 (Rinn, 2003).

Alle diese Werte (OVL, Glk, GSL und CDI) werden von TSAPWin direkt berechnet und stehen so zur Kontrolle der erbrachten Arbeit zur Verfügung (siehe Tabelle 6).

9.1.5. WEISER Jahre

Reagieren 66% und mehr der Bäume eines Standortes in gleicher Weise, mit verstärktem Wachstum (+1) oder verringertem Wachstum (-1), werden sie zu den Weiser Jahren (*pointer years*) gezählt. Für den Standort Hekla konnten so elf positive und zwölf negative Weiser Jahre identifiziert werden, für den Standort Eyjafjallajökull konnten elf positive und neun negative Weiser Jahre und für den Kontrollstandort Vatnshornsskogur acht positive und sechs negative Weiser Jahre definiert werden (siehe Tabelle 7 und 8)

Auffallend ist, dass das Jahr 1974 an allen drei Standorten als *pointer year* bezeichnet werden kann. Alle drei Standorte haben in diesem Jahr einen Anstieg der Wachstumsraten verzeichnet. Jahre in denen zwei Standorte ein positives Signal aufweisen sind: 1937, 1941, 1990 und 2003. Negative Weiser Jahre, die sich an zwei Standorten finden, sind die Jahre 1952, 1955 und 1985. Ansonsten sind die positiven als auch die negativen Weiser Jahre nur in jeweils einem der drei untersuchten Standorte festgestellt worden.

Tabelle 7: Jahre mit sogenannten Weiser Jahren für die drei Untersuchungsstandorte (Teil 1: 1925 – 1956). Jahre mit positivem Wachstum sind mit +1 (grün) markiert, jene mit negativem Wachstum mit -1 (rot) markiert. Die Eruptionsjahre des Vulkans Hekla sind dunkelgrau markiert.

Jahr	Hekla	Eyjafjallajökull	Vatnshornsskogur	Jahr	Hekla	Eyjafjallajökull	Vatnshornsskogur
1925				1941	+1	+1	
1926			+1	1942			
1927				1943			
1928			-1	1944	+1		
1929				1945			
1930				1946			
1931			-1	1947	-1		
1932		+1		1948			
1933			+1	1949			
1934			+1	1950			+1
1935		-1		1951			
1936				1952	-1	-1	
1937	+1	+1		1953	+1		
1938				1954		+1	
1939	-1			1955		-1	-1
1940				1956	-1		

Tabelle 8: Jahre mit sogenannten Weiser Jahren für die drei Untersuchungsstandorte (Teil 2: 1957 – 2012). Jahre mit positivem Wachstum sind mit +1 (grün) markiert, jene mit negativem Wachstum mit -1 (rot) markiert. Die Eruptionsjahre des Vulkans Hekla sind dunkelgrau, die Eruption des Eyjafjallajökull ist hellgrau markiert.

Jahr	Hekla	Eyjafjallajökull	Vatnshornsskogur	Jahr	Hekla	Eyjafjallajökull	Vatnshornsskogur
1957				1985	-1	-1	
1958				1986			
1959		+1		1987	+1		
1960	-1			1988			
1961				1989	-1		
1962		+1		1990		+1	+1
1963				1991	+1		
1964	-1			1992			-1
1965			+1	1993			
1966				1994			
1967				1995	-1		
1968				1996			
1969				1997			-1
1970	-1			1998		-1	
1971				1999	-1		
1972		-1		2000			
1973				2001		-1	
1974	+1	+1	+1	2002	+1		
1975		-1		2003	+1	+1	
1976				2004			
1977			-1	2005	-1		
1978				2006			
1979				2007			
1980	+1			2008		-1	
1981				2009			
1982	+1			2010			+1
1983				2011			
1984		+1		2012		+1	

9.1.6. Fehlende Jahrringe – *missing rings*

An allen drei Standorten, beziehungsweise in den Messreihen der Bäume der jeweiligen Baumringchronologie, mussten fehlende Jahrringe, sogenannte *missing rings*, eingefügt werden. Diese fehlenden Ringe können aufgrund von Messfehlern oder in Jahren mit harschen Umweltbedingungen in einzelnen Bäumen auftreten (Schweingruber, 1996). Diese werden dann von Hand während des Prozesses des *crossdating* eingefügt und somit korrigiert.

Tabelle 9: Eingefügte *missing rings* in der Baumringchronologie am Standort Hekla. L / R bezeichnet die zwei Radien links und rechts der Probe.

Probe	L / R	missing ring (Jahr)					
H01	L	2004	1985				
	R	1999	1995	1994	1989	1985	
H04	L	1990	1977				
	R						
H09	L	2005					
	R	1972	1958				
H10	L						
	R	1995	1978	1977	1964	1956	1957
H18	L	1985	1972	1971			
	R	1985	1970				
H19	L						
	R	1985					
H20	L						
	R	1993					
H21	L	1985					
	R	2000					
H05	L						
	R						

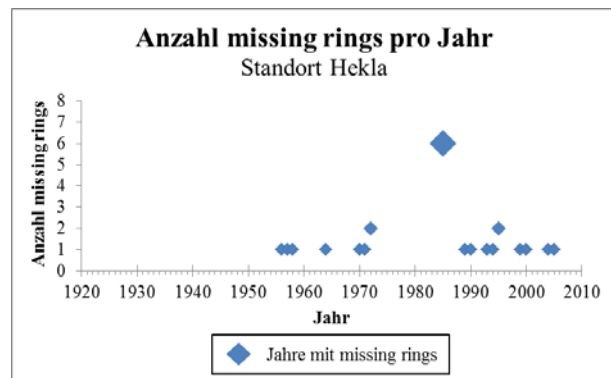


Abbildung 33: Jahre mit *missing rings*, Standort Hekla. Je grösser das blaue Viereck, desto mehr Bäume zeigten diesen fehlenden Jahrring.

Am Standort Hekla mussten insgesamt 24 fehlende Jahrringe eingefügt werden (siehe Tabelle 9). Das Jahr mit den meisten *missing rings* ist das Jahr 1985, dort mussten die Messungen von sechs Bäumen korrigiert werden. Die *missing rings* der Jahre 1972 und 1995 traten in zwei Bäumen auf. Ansonsten sind Jahre mit fehlenden Jahrringen jeweils nur in einer Messung festgestellt worden (siehe Abbildung 33).

Am Standort Eyjafjallajökull mussten insgesamt 30 fehlende Jahrringe eingefügt werden (siehe Tabelle 10). Das Jahr mit den meisten *missing rings* ist das Jahr 1987, dort mussten die Messungen von fünf Bäumen korrigiert werden. Im Jahr 1975 wurden bei vier Messungen Ringe eingefügt, im Jahr 1973 bei drei Messungen und in den Jahren 1969, 1983, 1985, 1989 und 2001 mussten bei jeweils zwei Bäumen *missing rings* eingefügt werden. Ansonsten sind Jahre mit fehlenden Jahrringen nur bei je einer Messung aufgetreten (siehe Abbildung 34).

Tabelle 10: Eingefügte *missing rings* in der Baumringchronologie am Standort Eyjafjallajökull. L / R bezeichnet die zwei Radien links und rechts der Probe.

Probe	L / R	missing ring (Jahr)					
E01	L						
	R						
E02	L						
	R						
E07	L	1987					
	R						
E09	L	1983	1976				
	R	1983	1975	1973			
E10	L						
	R	1987	1975				
E11	L	2001	1989	1975	1973	1969	
	R	2001	1989	1987	1975	1973	1969
E12	L						
	R						
E14	L	2003	1987	1980	1978		
	R	1987	1985				
E17	L	1995	1994	1993			
	R	1965					
E18	L						
	R	1985					

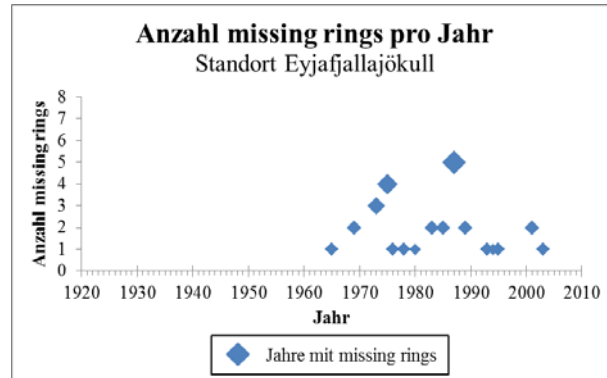


Abbildung 34: Jahre mit *missing rings*, Standort Eyjafjallajökull. Je grösser das blaue Viereck, desto mehr Bäume zeigten diesen fehlenden Jahrring.

Am Standort Vatnshornsskogur mussten insgesamt 28 fehlende Jahrringe eingefügt werden (siehe Tabelle 11). Das Jahr mit den meisten *missing rings* ist das Jahr 1978, dort mussten die Messungen von acht Bäumen korrigiert werden. Im Jahr 1956 wurden bei vier Messungen Ringe eingefügt und in den Jahren 1998, 1999, und 2004 mussten bei jeweils zwei Bäumen *missing rings* eingefügt werden. Ansonsten sind Jahre mit fehlenden Jahrringen nur in je einer Messung aufgetreten (siehe Abbildung 34).

Tabelle 11: Eingefügte *missing rings* in der Baumringchronologie am Standort Vatnshornsskogur. L / R bezeichnet die zwei Radien links und rechts der Probe.

Probe	L / R	missing ring (Jahr)									
V01	L	2001									
	R										
V02	L										
	R										
V03	L										
	R										
V04	L	1985	1977	1978	1956						
	R	1956									
V10	L	1992	1978								
	R	1978									
V17	L	1998									
	R	1999	1998								
V20	L	1999	1978								
	R										
V23	L	2004	1978	1972	1961	1956	1948	1947	1941	1940	
	R	2004	1956	1924							
V24	L	1978									
	R	1978									

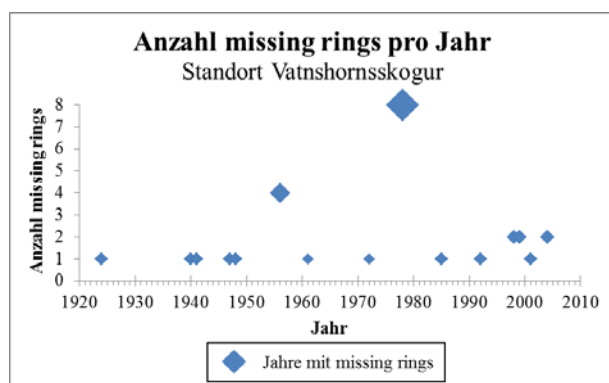


Abbildung 35: Jahre mit *missing rings*, Standort Vatnshornsskogur. Je grösser das blaue Viereck, desto mehr Bäume zeigten diesen fehlenden Jahrring.

9.2. Klimatische Bedingungen – Analyse mit DENDROCLIM 2002

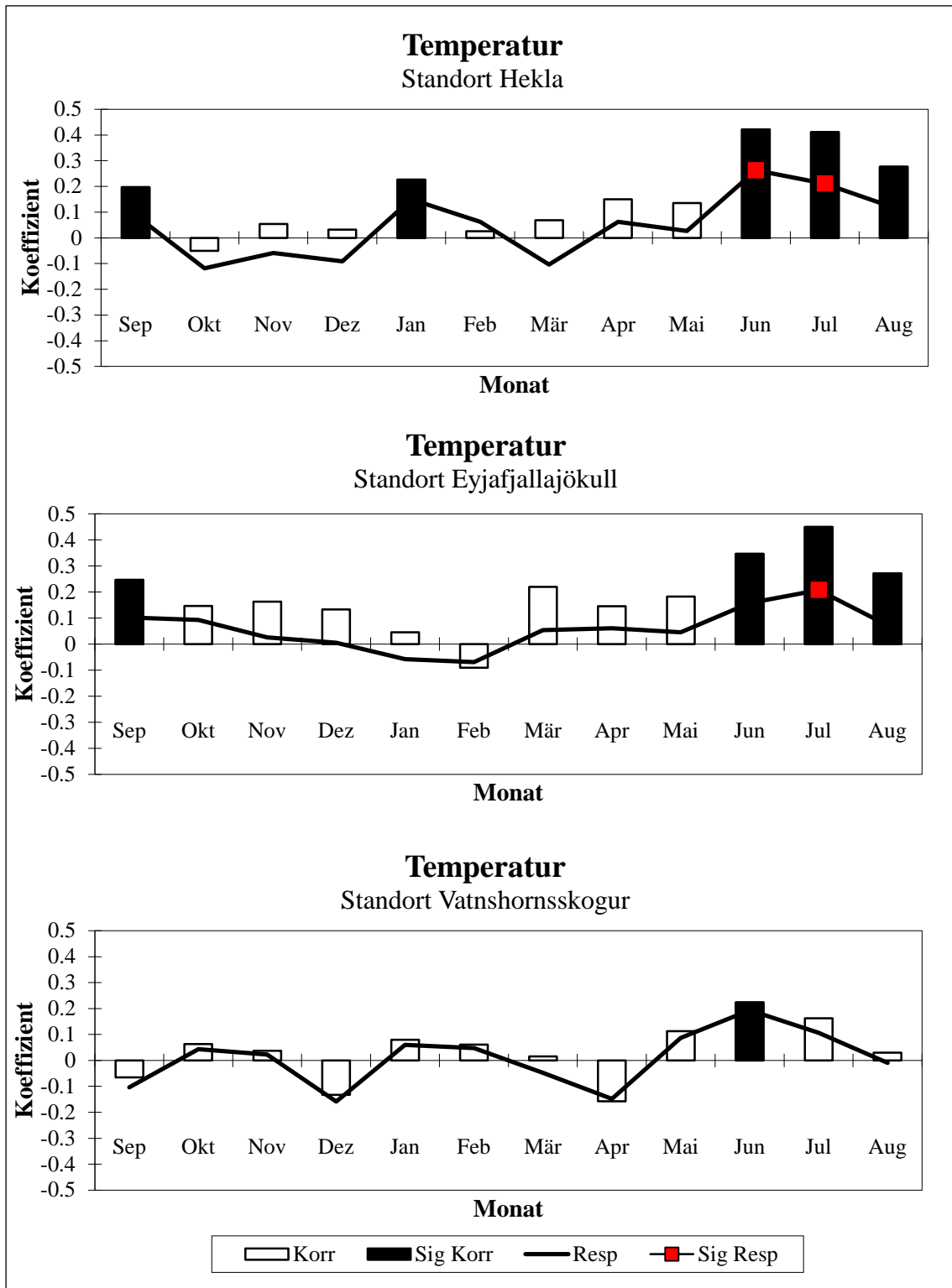


Abbildung 36: Analysen der Temperatur und der Jahrringbreite, mit der Software Dendroclim 2002 für die Standorte Hekla, Eyjafjallajökull und Vatnshornsskogur. Monate, die eine signifikante Korrelation aufwiesen, sind mit schwarz eingefärbten Balken gekennzeichnet. Monate für die die Response Funktion signifikant ausfiel, sind durch ein rotes Viereck hervorgehoben.

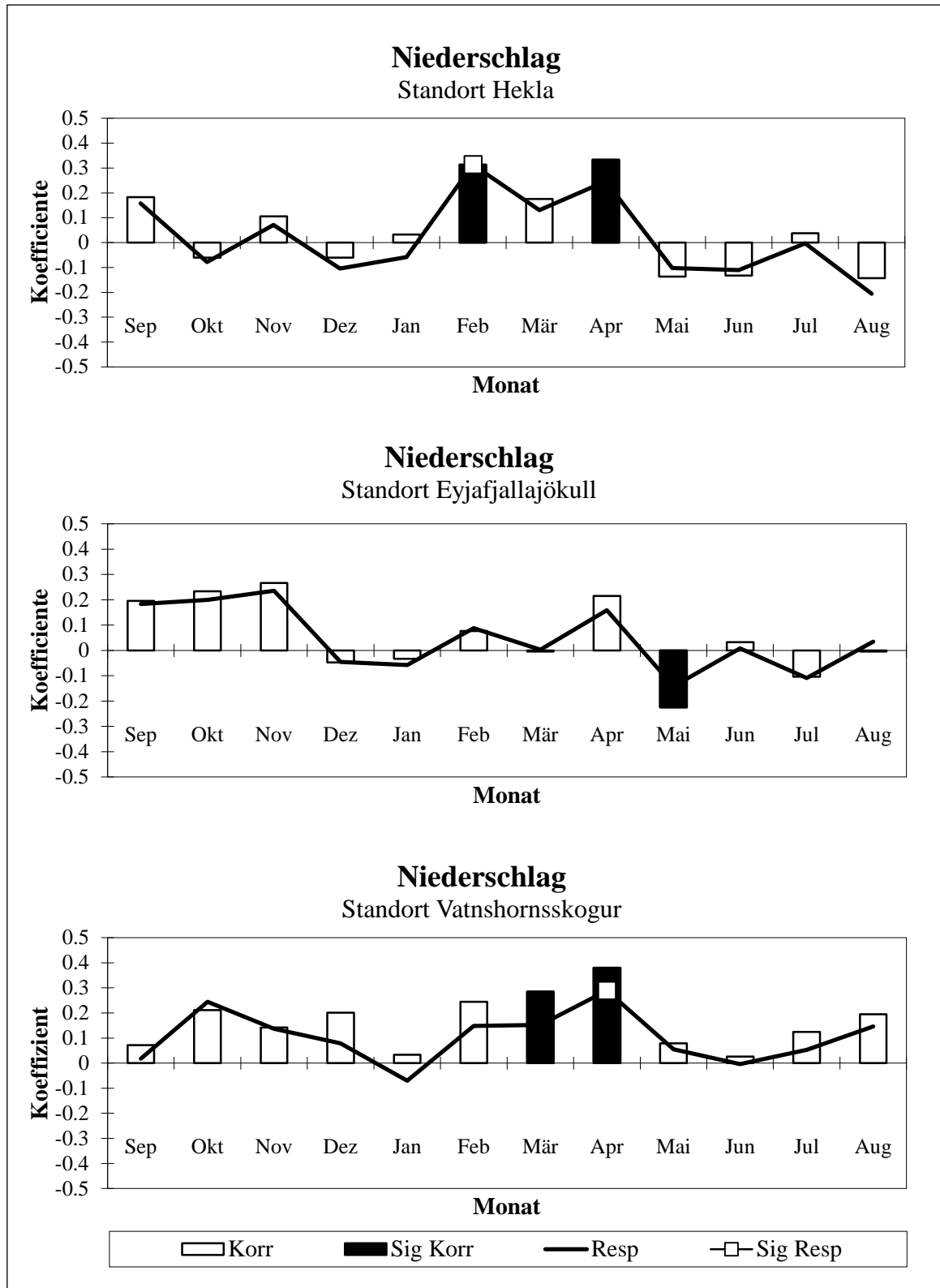


Abbildung 37: Analysen der Niederschlagsmenge und der Jahrringbreite, mit der Software Dendroclim 2002 für die Standorte Hekla, Eyjafjallajökull und Vatnshornsskogur. Monate, die eine signifikante Korrelation aufwiesen, sind mit schwarz eingefärbten Balken gekennzeichnet. Monate für die die Response Funktion signifikant ausfiel, sind durch ein weisses Viereck hervorgehoben.

Mit Hilfe der Software Dendroclim 2002 konnten die Jahrringbreiten der drei Untersuchungsstandorten zusammen mit den Monatsmittelwerten der Temperatur (meteorologische Station Hæll) und der monatlichen Monatsniederschlagsmengen (meteorologische Station Hella) analysiert werden.

Die Analyse der Jahrringbreiten zusammen mit der Temperatur ergab positiv signifikante Korrelationen zwischen den vorherrschenden Temperaturen in den Monaten Juni, Juli und August (siehe Abbildung 36). An den beiden Standorten Hekla und Eyjafjallajökull sind diese Korrelationen signifikant vorhanden, am Standort Vatnshornsskogur wurde nur für den Monat Juni eine signifikante Korrelation festgestellt. Es ist festzuhalten, dass auch der Kontrollstandort Vatnshornsskogur eine Korrelation in den Monaten Juni und August aufweist, jedoch erreicht diese nicht das Signifikanzniveau. Das Programm Dendroclim 2002 zeigt für die beiden Standorte Hekla und Eyjafjallajökull ebenfalls eine signifikante Korrelation im Monat September an, diese fällt aber weniger stark ausgeprägt aus. Bei diesen beiden Standorten wurden nur diejenigen Korrelationen als bedeutend angesehen, wenn der Korrelationskoeffizient grösser als 0.25 war. Eine negativ signifikante Korrelation zwischen Temperatur und Jahrringbreite konnte an keinem Standort festgestellt werden. Am Standort Hekla zeigt die Response Funktion einen signifikanten Zusammenhang der Temperatur im Juni und Juli an. Am Standort Eyjafjallajökull ergab die Response Funktion nur eine Signifikanz für die Julitemperaturen. Am Kontrollstandort gab die Response Funktion keine signifikanten Zusammenhänge an.

Bei den Korrelationen der Jahrringbreiten der Bäume mit den Niederschlagsmengen ergab sich nicht so ein eindeutiges Bild, wie für die Temperatur (siehe Abbildung 37). Am Standort Hekla gab die Dendroclim 2002 Software eine positiv signifikante Korrelation für die Monate Februar und April an, am Standort Eyjafjallajökull keine und am Standort Vatnshornsskogur für die Monate März und April. Eine negativ signifikante Korrelation konnte nur am Standort Eyjafjallajökull erkannt werden, für den Monat Mai. Mit einem Korrelationskoeffizient von -0.22 ist diese Korrelation nicht allzu stark ausgebildet. Für die weiteren Analysen wurden die Niederschlagsmengen des Monats April verwendet, da dort bei allen Standorten eine positive Korrelation, bei den Standorten Hekla und Vatnshornsskogur gar eine signifikante Korrelation festgestellt wurde. Die Response Funktion für den Standort Hekla zeigt eine Signifikanz für die Niederschlagsmengen im Monat Februar an. Am Standort Vatnshornsskogur lässt sich

eine Signifikanz aufgrund der Response Funktion im Monat April finden. Der Standort Eyjafjallajökull zeigt keine signifikanten Zusammenhänge aufgrund der Response Funktion.

9.2.1. Temperaturdiagramm

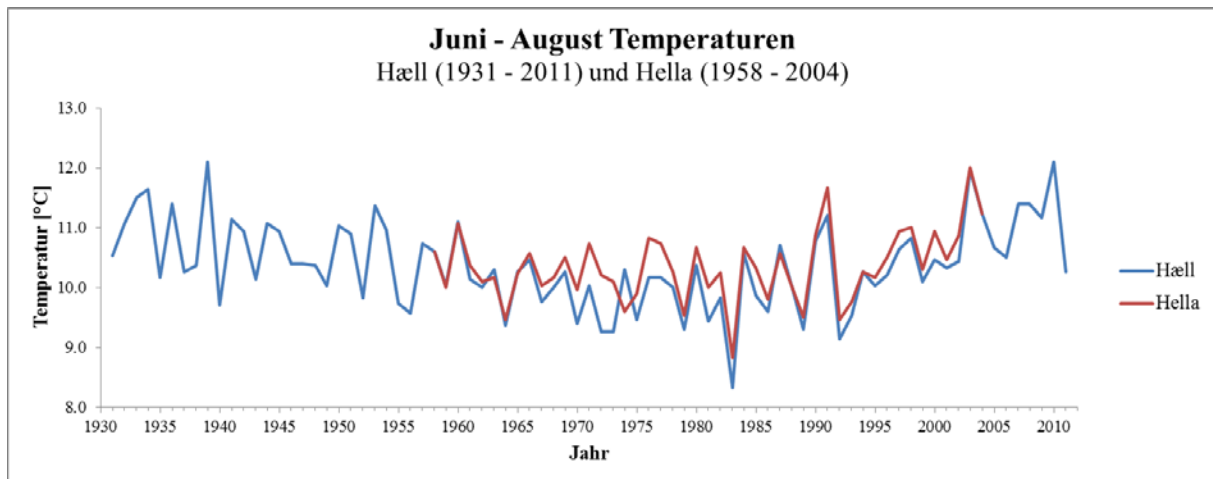


Abbildung 38: Gemittelte Juni – August Temperaturen, Daten von den beiden meteorologischen Stationen Hæll (blaue Kurve) und Hella (rote Kurve), beide liegen im Süden Islands.

Aufgrund der Analysen der Dendroclim 2002 Software zeigte sich, dass die Temperaturen in den Monaten Juni, Juli und August die Wachstumsraten der Bäume an den drei Untersuchungsstandorten signifikant beeinflussen. Somit wurden in Abbildung 38 die Durchschnittstemperaturen für drei relevanten Monate dargestellt. Da Daten von zwei verschiedenen meteorologischen Stationen zur Verfügung standen, wurde für beide Stationen (Hæll und Hella) diese Kurve erstellt. Auffällig sind die tiefen Sommertemperaturen in den Jahren 1964, 1979, 1983, 1989 und 1992. In den Jahren 1939, 1953, 1990/91, 2003 und 2010 registrierten die beiden Stationen die höchsten Sommertemperaturen der gesamten Messreihe.

9.2.2. Niederschlagsdiagramm

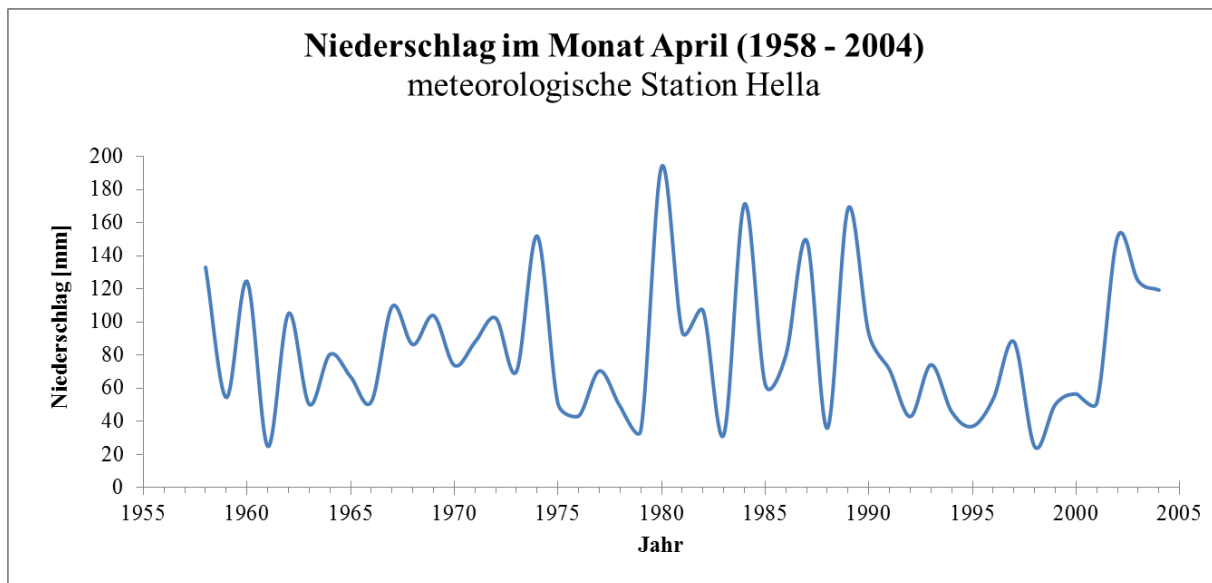


Abbildung 39: Niederschlagsmengen für den Monat April, mit den Daten der meteorologischen Stationen Hella (1958 – 2004) im Süden Islands.

Mit der Software Dendroclim 2002 wurde die Niederschlagsmenge im Monat April als relevant für das Wachstum der Bäume ermittelt. Es besteht eine positiv signifikante Korrelation zwischen den Niederschlagsmengen im April und der Jahrringbreite, so bedeuten hohe Niederschlagsmengen verstärktes Wachstum der Bäume. Die Jahre 1974, 1980, 1984, 1987, 1989 und 2002 sind diejenigen Jahre, in welchen hohen Niederschlagsmengen im April gemessen wurden. In den Jahren 1961, 1979, 1983, 1988 und 1998 wurden die tiefsten Niederschlagsmengen für den Monat April gemessen.

9.3. Isotopenanalyse

Die Isotopenverhältnisse, sowohl diejenigen vom $\delta^{13}\text{C}$ als auch vom $\delta^{18}\text{O}$, zeigen einen ähnlichen Verlauf für die beiden untersuchten Standorte am Eyjafjallalökull und Vatnshornsskogur.

Die Werte für das Verhältnis von $\delta^{13}\text{C}$ sinken an beiden Standorte zum Jahr 2010 hin ab und steigen dann in den Jahren 2011 und 2012 wieder etwas an. Die Kurven für beide Standorte

verlaufen mehr oder weniger parallel, nur dass die Werte für den Kontrollstandort Vatnshornsskogur auf einem etwas höheren Niveau liegen.

Bei den Werten für das Isotopenverhältnis des $\delta^{18}\text{O}$ haben die Kurven für die beiden Standorte ebenfalls einen ähnlichen Verlauf. Zu Beginn der Messreihe, in den Jahren 2008 und 2009, sinken sie ab, steigen dann im Jahr 2011 an und sinken anschliessend im 2012 wieder ab. Im Gegensatz zu den Isotopenverhältnissen des $\delta^{13}\text{C}$, liegen die Werte für $\delta^{18}\text{O}$ am Eyjafjallajökull auf einem höheren Niveau als die Werte für den Kontrollstandort Vatnshornsskogur.

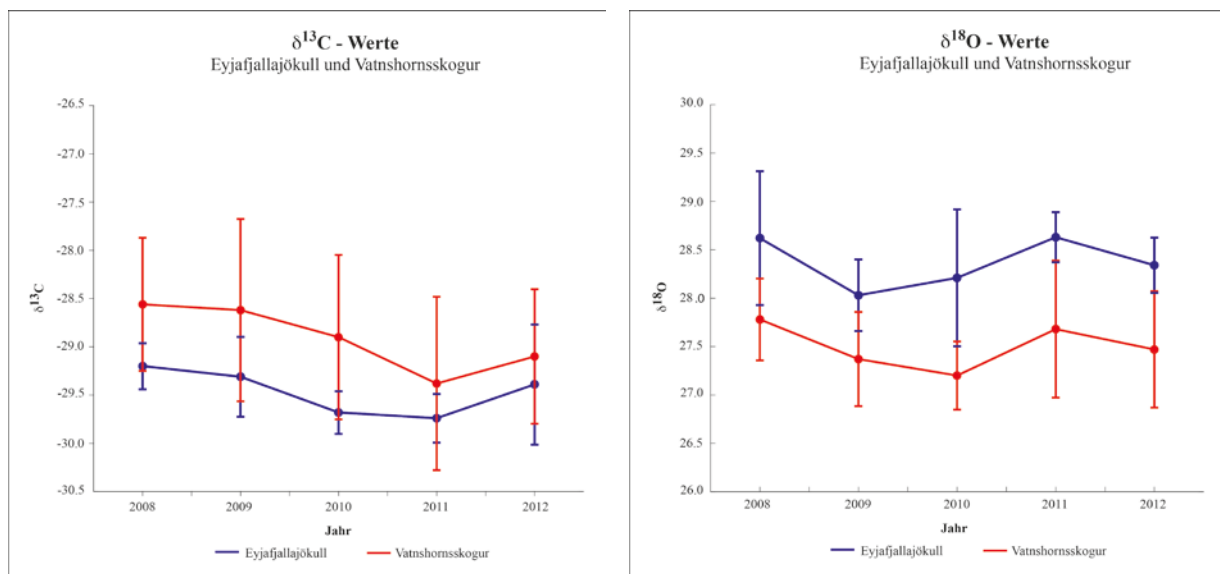


Abbildung 40: Auswertung der Isotopenmessungen, links: Werte der $\delta^{13}\text{C}$ und rechts: Werte der $\delta^{18}\text{O}$ Messung für die beiden Standorte Eyjafjallajökull (blau) und Vatnshornsskogur (rot), mit den Standardabweichungen.

9.3.1. $\delta^{13}\text{C}$ Werte

Die Werte für das Isotop $\delta^{13}\text{C}$ zeigen an beiden Standorten einen ähnlichen Verlauf. Bis zum Jahr 2011 sinken die Werte ab und steigen dann im Jahr 2012 wieder ein wenig an. Nicht alle analysierten Proben zeigen ähnliche Verläufe, die Baum zu Baum Streuung ist recht gross. Die Streuung der fünf Proben des Standorts Eyjafjallajökull ist aber deutlich kleiner als am Standort Vatnshornsskogur. Nicht nur der Verlauf der einzelnen Kurven, auch das Niveau auf welchem sie verlaufen ist beim Standort Vatnshornsskogur breiter gestreut als beim Eyjafjallajökull. So hebt sich die Kurve der Probe V03 deutlich vom Rest ab. Die anderen Proben bewegen sich in einem vergleichbaren Bereich, zwischen -28 und -30.

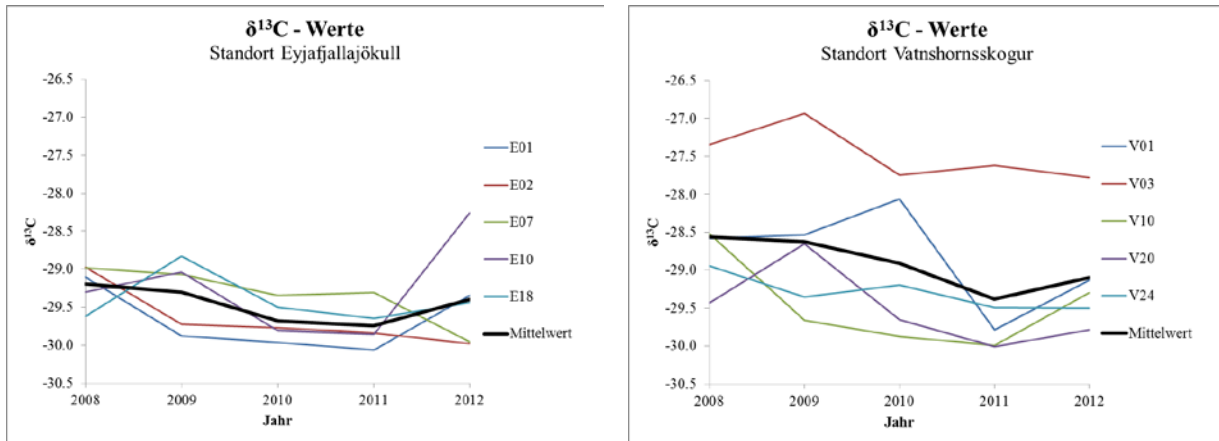


Abbildung 41: Auswertung der Isotopenmessungen von $\delta^{13}\text{C}$ für die beiden Standorte Eyjafjallajökull (links) und Vatnshornsskogur (rechts).

9.3.2. $\delta^{18}\text{O}$ Werte

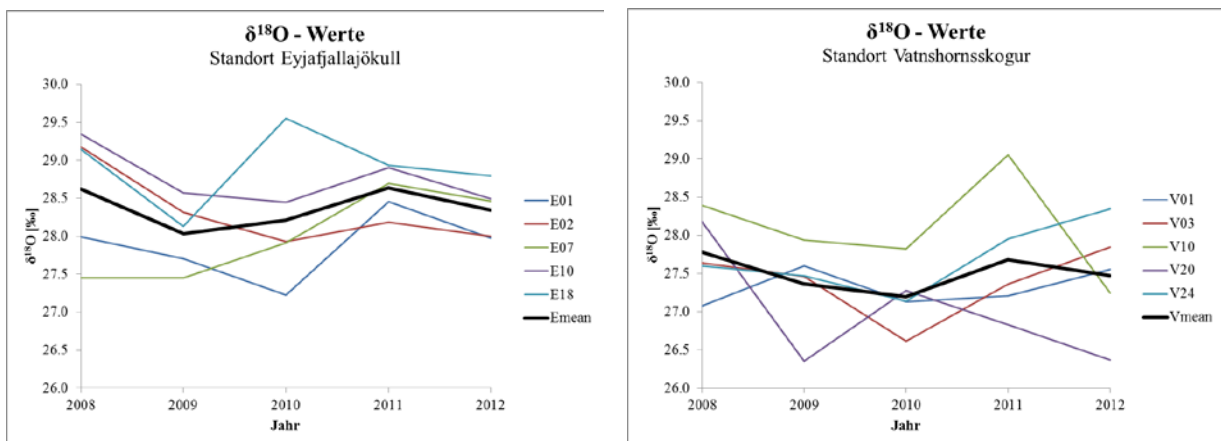


Abbildung 42: Auswertung der Isotopenmessungen von $\delta^{18}\text{O}$ für die beiden Standorte Eyjafjallajökull (links) und Vatnshornsskogur (rechts).

Die Isotopenverhältnisse des $\delta^{18}\text{O}$ zeigen für beide Standorte einen ähnlichen Verlauf. Beim Eyjafjallajökull sinken die Werte bei allen fünf analysierten Proben von 2008 zum 2009 ab. Danach ist das Bild nicht mehr so klar, im Jahr 2010 steigen die Kurven von zwei der fünf Proben an, die anderen der Proben sinken ab. Im 2011 steigen vier der fünf Kurven an bis dann im 2012 alle fünf Kurven absinken. Die Baum zu Baum Streuung ist im Jahr 2010 auffällig gross, so steigt die Kurve der Probe E18 als einzige stark an, während die restlichen Kurven absinken. Für den Standort Vatnshornsskogur kann ein ähnliches Bild beschrieben werden, dort sinken die Werte bis 2010 tendenziell eher ab, steigen im 2011 an und sinken dann im 2012 eher ein wenig ab. Die Baum zu Baum Streuung ist im Jahr 2011 und 2012

deutlich grösser als in den Jahren zuvor. Die Werte des Standorts Eyjafjallajökull bewegen sich in einem etwas höheren Niveau (27.5 – 30%) als diejenigen vom Vatnshornsskogur (26.5 – 28.5%).

9.4. Chemisch Zusammensetzung des Holzes

Die Resultate der LA-ICP-MS Analyse zeigen keinen bemerkenswerten Ausreisser im Jahr des Ausbruchs des Eyjafjallajökulls. Die beiden Abbildungen 38 und 39 zeigen oben das analysierte Holzstück, eingezeichnet sind die Jahrringe 2002 – 2012, rot markiert ist das Ausbruchsjahr 2010. Anschliessend wird die Holzzusammensetzung (Element im Verhältnis zu ^{13}C) dargestellt (siehe Abbildung 43 und 44).

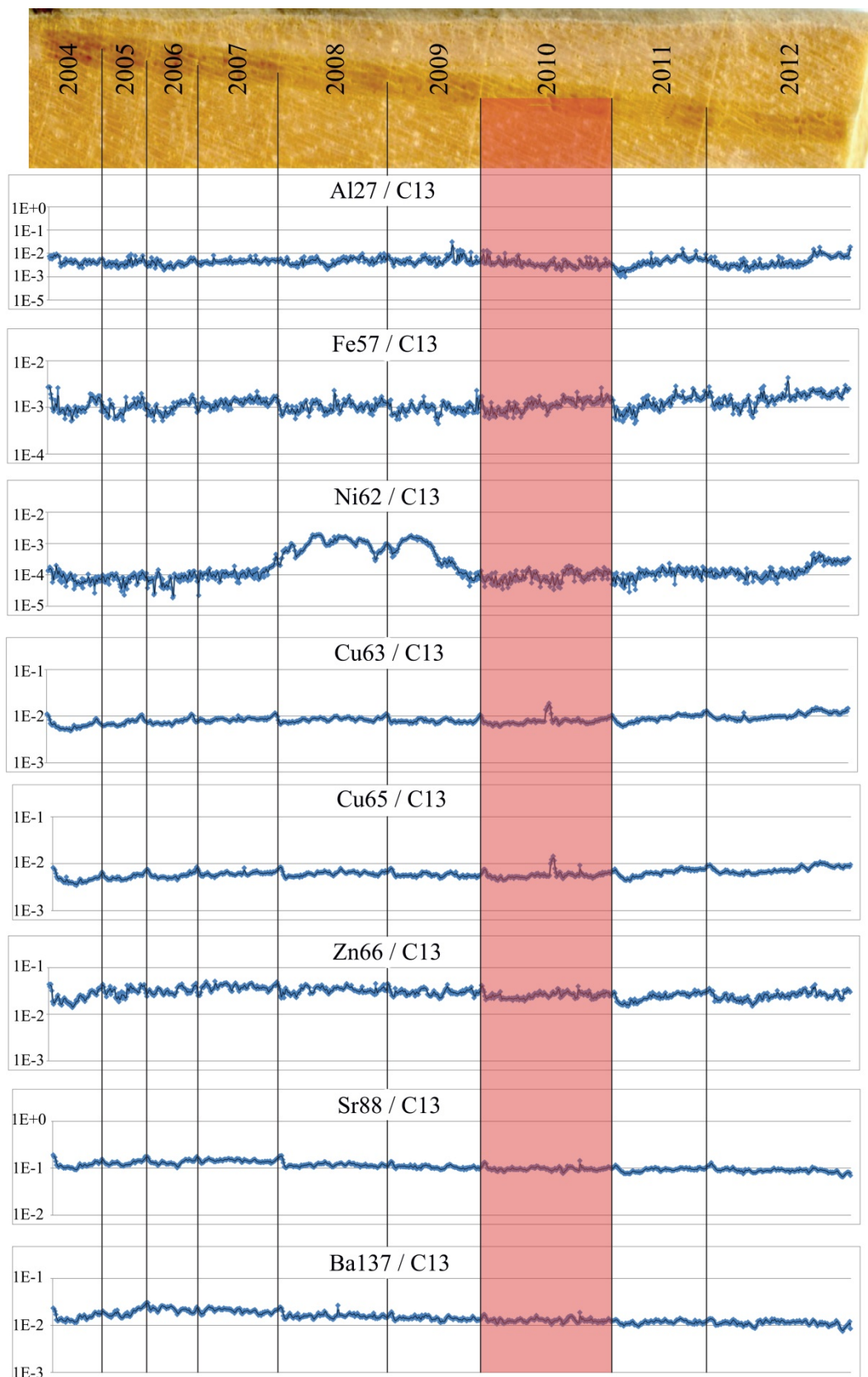


Abbildung 43: LA-ICP-MS Messung der Probe V04R, vom Standort Vatnshornsskogur, roter Balken markiert das Ausbruchsjahr 2010. Die Kurven der einzelnen Elemente zeigt das Verhältnis des gemessenen Elements zum ^{13}C (Quelle: Andrea Mancini).

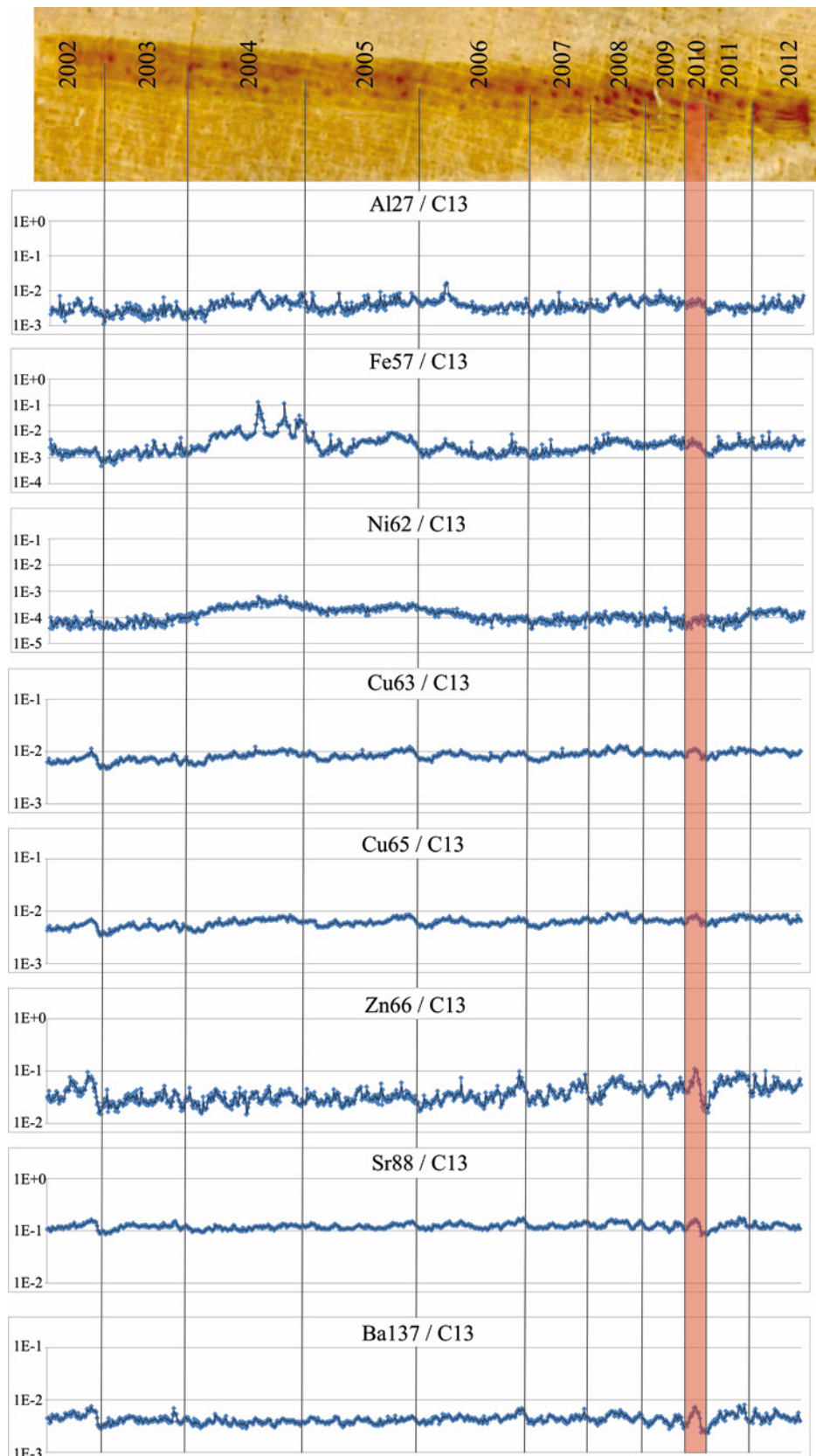


Abbildung 44: LA-ICP-MS Messung der Probe E11R, vom Standort Eyjafjallajökull, roter Balken markiert das Ausbruchsjahr 2010. Die Kurven der einzelnen Elemente zeigt das Verhältnis des gemessenen Elements zum ^{13}C (Quelle: Andrea Mancini).

10. Diskussion

Um den Einfluss der Vulkane auf die Vegetation Islands zu identifizieren, müssen möglichst alle anderen Einflussfaktoren, die das Wachstum der Bäume beeinflussen, ermittelt werden. Einflussfaktoren können anthropogenen Tätigkeiten, Klimatische Gegebenheiten, Verletzungen der Bäume oder sonstige Störfaktoren wie starke Winde oder Insektenbefall sein (Schweingruber, 1996). Werden diese Einflüsse identifiziert, kann ein Signal aufgrund einer Eruption herausgefiltert werden. Zuerst sollen deshalb die Resultate der Jahrringmessungen zusammen mit den klimatischen Rahmenbedingungen diskutiert werden. Somit können dann die Auswirkungen der Vulkanausbrüche interpretiert und in die Analysen miteinbezogen werden. Durch die Messung der Isotopenverhältnisse konnten in anderen Forschungsarbeiten (Battipaglia et al., 2007, Gu et al., 2003) Signale für Vulkanausbrüche identifiziert werden. Pearson et al. (2005) haben ein Signal für vulkanische Aktivität in der chemischen Zusammensetzung der Baumringe gefunden, was in dieser Masterarbeit ebenfalls versucht wurde. Mit all den gesammelten Daten der Analysen sollen die Einflüsse der Eruptionen der Hekla (1947 / 48, 1970, 1980 / 81, 1991 und 2000) und des Eyjafjallajökulls (2010) beschrieben werden.

10.1. Jahrringbreiten und klimatische Bedingungen

Da in Island das Wachstum der Vegetation durch die Temperatur limitiert wird, können Schwankungen in den Baumringbreiten durch die Sommertemperaturen (Juni – August) erklärt werden (Levanič & Eggertsson, 2008). Mit Hilfe der Weiser Software wurden auffällig schmale Jahrringe identifiziert, welche nun durch den Vergleich mit den vorherrschenden Temperaturen während der Vegetationsperiode zu erklären versucht wird (Briffa et al., 1998). Das Hauptaugenmerk soll im Folgenden auf die Weiser Jahre (positive und negative) gelegt werden, welche an zwei oder mehr Standorten aufgetreten sind. Für diese Arbeit relevante positive Weiser Jahre lassen sich in den Jahren 1937, 1941, 1974, 1990 und 2003, negative Weiser Jahre in den Jahren 1952, 1955 und 1985, finden (siehe Tabelle 7 und 8).

Die Standorte Hekla und Eyjafjallajökull haben durch die Weiser Jahr Analyse, im Jahr 1937, ein positives Signal ergeben. In diesem Jahr war die Sommertemperatur im Vergleich zum Vor- und Folgejahr etwas tiefer. Die gemittelten Temperaturen für die Monate Juni – August im Jahr 1937 (10.3°C) liegen auf dem Niveau des langjährigen Mittelwerts der Station Hæll (10.4°C). Verstärktes Wachstum aufgrund hoher Temperaturen kann dieses positive Signal

also nicht erklären. Ein verfrühter Einbruch des Frühlings könnten der Vegetation zugute gekommen sein. Die Temperaturen im April deuten jedenfalls auf einen milden Frühling hin. Es ist aber auch denkbar, dass die reichlich gefallenen Niederschlagsmengen im April 1937, das verstärkte Wachstum erklären könnten (Levanič & Eggertsson, 2008). Da keine Niederschlagsdaten für diesen Zeitraum zur Verfügung stehen, bleibt dieser Erklärungsansatz allerdings spekulativ.

Das nächste positive Weiser Jahr ist, an den Standorten Hekla und Eyjafjallajökull, das Jahr 1941. Auch am Kontrollstandort Vatnshornsskogur zeigt die Baumringchronologie einen positiven *Peak*, jedoch ist dieser nicht signifikant. In diesem Jahr hatte die Temperatur einen positiven Einfluss auf das Wachstum der Birken. Die Temperaturkurve (Jun – Aug) zeigt denselben positiven *Peak*, wie die Baumringchronologien. Wie von Levanič & Eggertsson (2008) beschreiben, wirken sich die hohen Sommertemperaturen positiv auf die Wachstumsgeschwindigkeit der Birken aus.

Die Jahre 1952 und 1955 zeigen eine vergleichbare Reaktion der Birken auf die tiefen Sommertemperaturen. Alle drei Standorte weisen in der jeweiligen Baumringchronologie ein verringertes Wachstum auf (siehe Abbildung 29). Tiefe Sommertemperaturen können in Island zu vermehrtem Auftreten von Sommerfrostergebnissen führen, was sich negativ auf das Wachstum der Birken auswirkt (Levanič & Eggertsson, 2008). Das verminderte Wachstum kann als Indiz dafür genommen werden, dass die Temperatur der limitierende Faktor in diesen Jahren gewesen ist. Die Temperaturkurve zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Baumringchronologie: tiefe Temperatur im Jahr 1952, gleichlaufend mit verringerten Wachstumsraten. Ein Ansteigen der Wachstumsraten in den Jahren 1953 und 1954 aufgrund steigender Sommertemperaturen. Im Jahr 1955 sinken dann sowohl die Temperaturen als auch die Wachstumsraten der Bäume aller drei Standorte ab.

Das Jahr 1974 kann als Beispiel dafür angesehen werden, wie sich das Klima und somit der limitierende Faktor innerhalb kurzer Distanz unterscheiden können (Chen et al., 1999). Die Analyse der Jahrringbreiten gibt für alle drei Standorte ein als positives Weiser Jahr an, was einer positiven Korrelation zu den hohen Sommertemperaturen entspricht. Die beiden Standorte Hekla und Vatnshornsskogur reagierten mit einer beträchtlichen Zunahme der Wachstumsraten. Am Standort Eyjafjallajökull fiel die Reaktion auf die hohen Temperaturen hingegen eher moderat aus. Wird davon ausgegangen, dass die Temperaturverhältnisse an den drei Standorten mehr oder weniger dieselben gewesen sind, kann in den erhaltenen Niederschlagsmengen eine Erklärung für die unterschiedlich starke Reaktion der Bäume gefunden werden. In diesem Jahr wurden für den Monat April hohe Niederschlagsmengen registriert,

auch im Vorjahr fielen Rekordmengen von mehr als 1500 mm (meteorologische Station Hella). Es stand also genügend Wasser für ein optimales Wachstum der Bäume zur Verfügung (Hynynen, 2010). Die Birken am Eyjafjallajökull liegen in einem Tal, welches im Regenschatten der Vulkane Eyjafjallajökull und Katla liegt (mündliche Mitteilung, Ólafur Eggertsson). Es ist denkbar, dass an diesem Standort weniger Regen gefallen ist, als an den beiden Standorten Hekla und Vatnshornsskogur. In diesem Falle wäre dann das pflanzenverfügbare Wasser der limitierende Faktor für den Standort am Eyjafjallajökull. An den beiden anderen Standorten, wo genügend Wasser vorhanden gewesen ist, war die Temperatur der limitierende Faktor (Schweingruber, 1996).

Das Jahr 1985 zeigt bei allen drei Standorten einen deutlichen Rückgang der Wachstumsraten an. Dieser Rückgang kann durch die tiefen Sommertemperaturen erklärt werden. Es ist denkbar, dass die Reaktion auf die tiefen Temperaturen durch die niedrigen Regenmengen im April 1985 verstärkt wurde. Die Kombination von tiefen Temperaturen und wenig Niederschlag zeigt, dass die Birken in Island auf die im Sommer vorherrschenden Temperaturen und auf Wassermangel im Frühling sensitiv reagieren (Levanič & Eggertsson, 2008, Schweingruber, 1993).

Dass die Temperatur der primär vorherrschende limitierende Faktor in Island ist, zeigt das Jahr 1990. Da ein beträchtlicher Teil der verfügbaren Wassermengen in Island als Schnee fällt, können durch die Schneeschmelze im Frühling tiefe Niederschlagsmengen kompensiert werden (Glenn & Woo, 1997). Trotz rückläufiger Werte für den Niederschlag steigen die Wachstumsraten für die Birken in diesem Jahr an allen drei Standorten deutlich an. Wassermangel hat die Pflanzen zumindest in diesem Jahr nicht beeinträchtigt. Das ansteigen der Wachstumsraten wird dementsprechend durch die wärmeren Verhältnisse während der Vegetationsperiode begünstigt.

Alle drei Standorte zeigen im Jahr 2003 verstärktes Wachstum an. Die Temperaturen erreichten in dieser Vegetationsperiode Höchstwerte, was das verstärkte Wachstum der Bäume begünstigte. Es fiel auch genügend Regen, so dass die Bäume gut gedeihen konnten (Levanič & Eggertsson, 2008).

Neben der Analyse der Weiser Jahre, wurden Extremwerte der Temperatur als Ausgangspunkt für den Abgleich mit den Baumringbreiten herangezogen. Wie in Abbildung 46 – 48 aufgezeigt, können Korrelationen zwischen hohen Sommertemperaturen und verstärktem Wachstum in den Jahren 1953, 2007 und 2010 festgestellt werden. Eine Korrelation der Jahringbreiten mit tiefen Temperaturen wurde für die 1964, 1979, 1983, 1989 und 1992 gefunden. Die negativen Korrelationen scheinen in den Jahren 1979, 1983 und 1992 durch tiefe

Niederschlagswerte (> 45 mm im Monat April) noch verstärkt worden sein (Kharuk et al., 2013). Wie von Levanič & Eggertsson (2008) beschrieben, können hohe Niederschlagsmengen die Temperaturen deutlich absenken. Die hohen Niederschlagsmengen (170 mm im Monat April) können somit Frostereignisse nach sich ziehen, welche aufgrund abgesenkener Temperaturen nach Niederschlagsereignissen auftreten können. Dadurch fungiert wiederum die Temperatur als wachstumslimitierender Faktor.

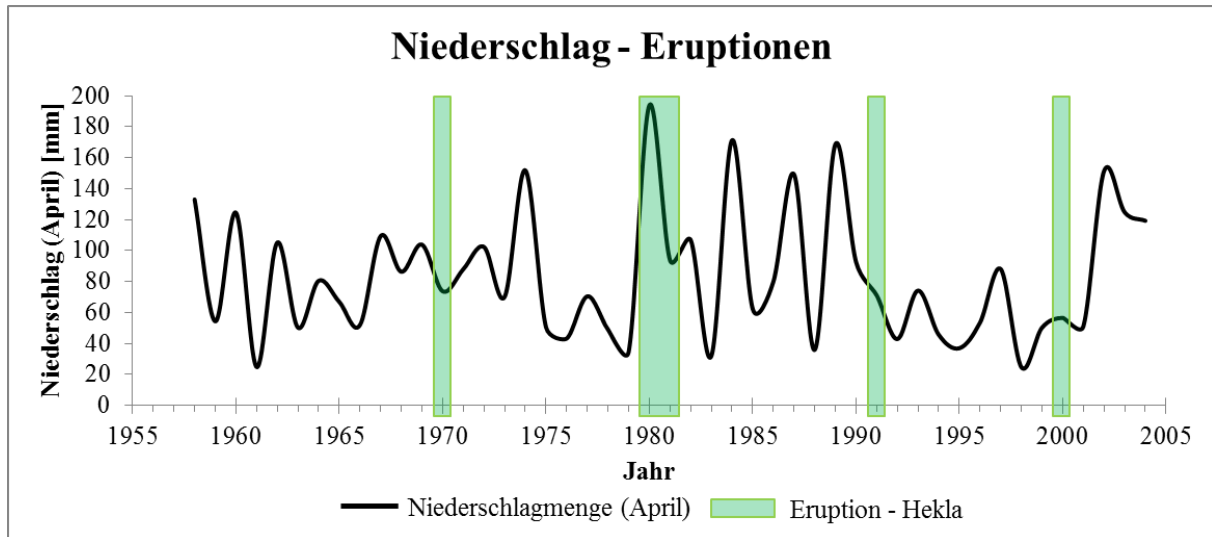


Abbildung 45: Verlauf der Niederschlagsmengen für den Monat April (meteorologische Station Hella) für die Jahre 1958 - 2004. Die grünen Balken markieren die Ausbruchsjahre des Vulkans Hekla.

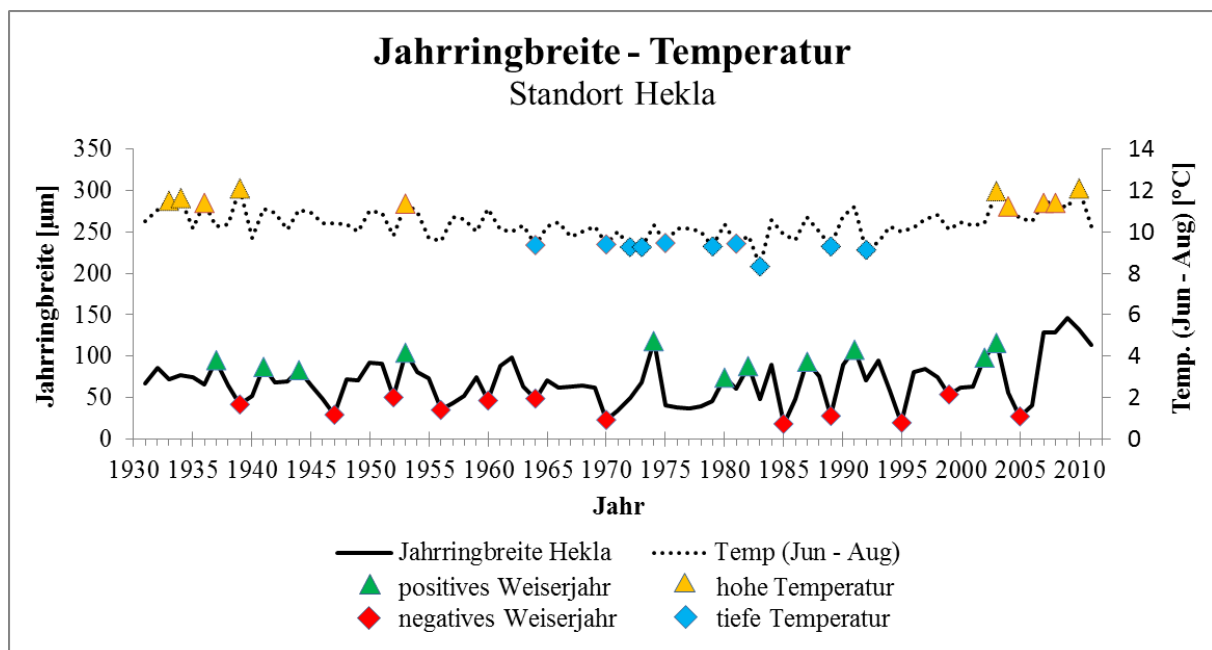


Abbildung 46: Die Jahrringbreiten für den Standort Hekla mit positiven Weiser Jahre (grün) und negativen Weiser Jahre (rot) zusammen mit den Temperaturen (Jun - Aug) und dessen Maximalwerten (hohe Temperatur: orange, tiefe Temperatur blau).

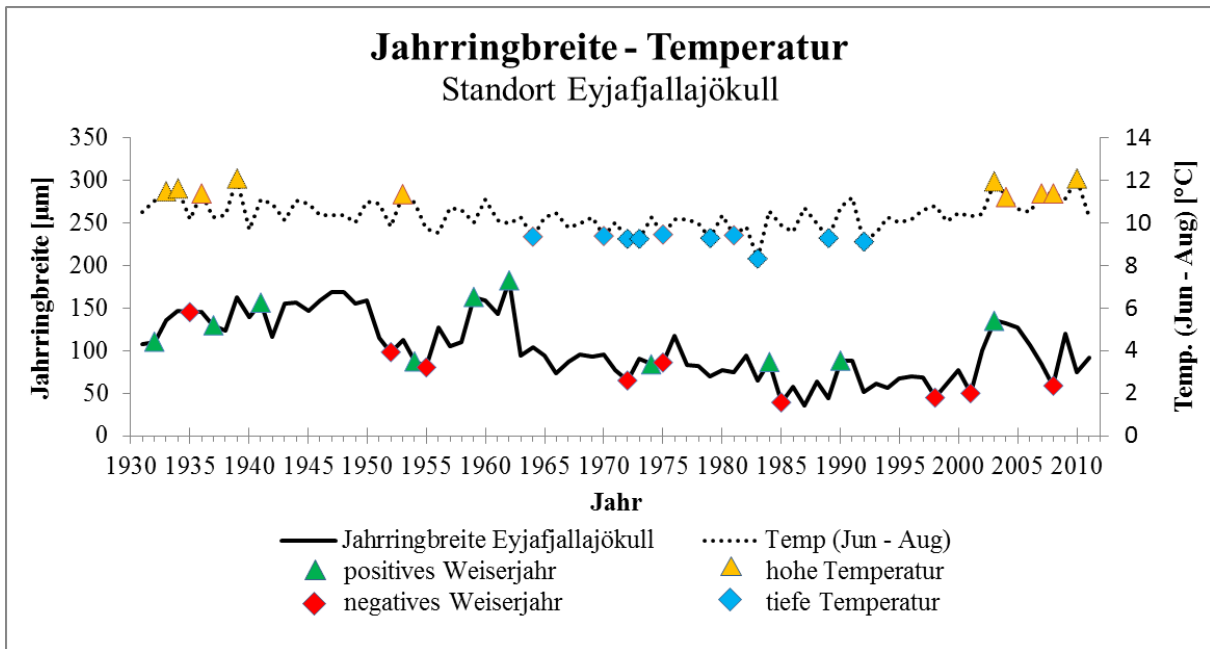


Abbildung 47: Die Jahrringbreiten für den Standort Eyjafjallajökull mit positiven Weiser Jahre (grün) und negativen Weiser Jahre (rot) zusammen mit den Temperaturen (Jun - Aug) und dessen Maximalwerten (hohe Temperatur: orange, tiefe Temperatur blau).

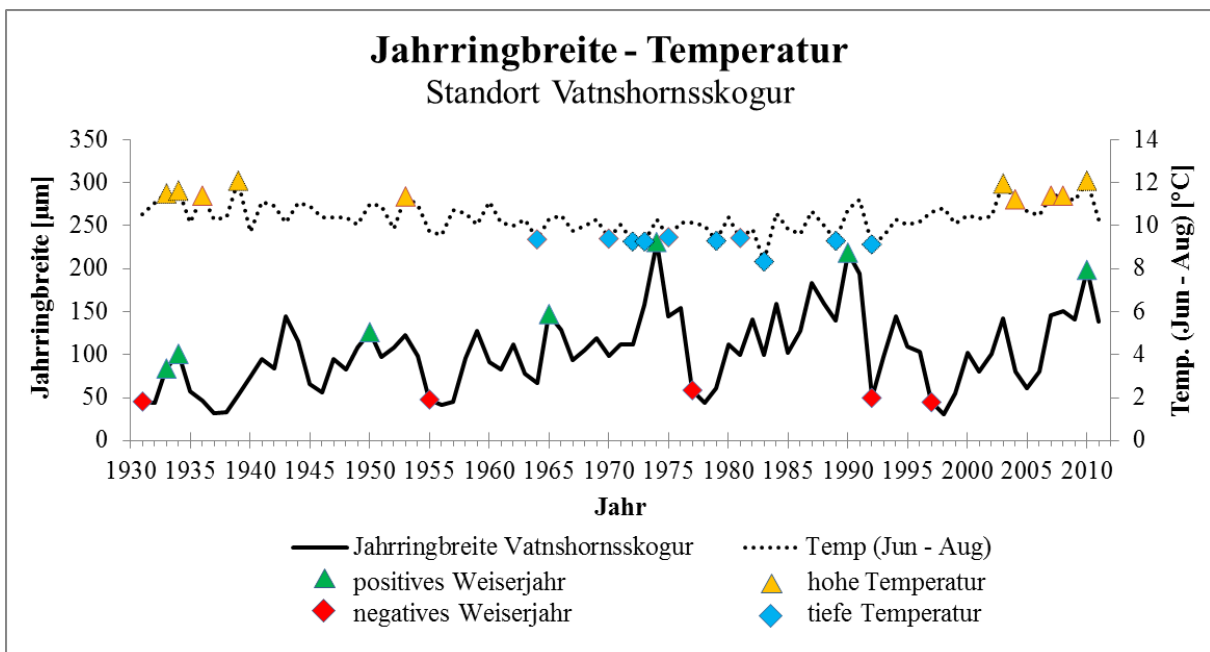


Abbildung 48: Die Jahrringbreiten für den Standort Vatnshornsskogur mit positiven Weiser Jahre (grün) und negativen Weiser Jahre (rot) zusammen mit den Temperaturen (Jun - Aug) und dessen Maximalwerten (hohe Temperatur: orange, tiefe Temperatur blau).

10.2. Jahrringbreiten und die Eruptionen der Hekla und des Eyjafjallajökulls

Der Einfluss von Vulkanausbrüchen auf das Wachstum von Bäumen wurde in der Vergangenheit auf unterschiedliche Weise und für verschiedene Regionen untersucht und beschrieben. Einige proklamieren einen negative Beeinflussung des Wachstums aufgrund eines Abschattungseffekts und folglich tieferen Temperaturen (Battipaglia et al., 2007). Andere sehen durch Vulkanausbrüche hervorgerufene verbesserte Wachstumsbedingungen, welche durch einen erhöhten Anteil an diffuser Strahlung und somit erhöhter Photosynthese Aktivität zustande kommen (Gu et al., 2003, Faruhar & Roderick, 2003, Krakauer & Randerson, 2003). Da die Eruptionen, welche in dieser Forschungsarbeit genauer angeschaut werden sollen, eher kleinerem Ausmasses waren, dürfte das Auftreten dieser Effekte nur gering Einfluss genommen haben. Teilweise wurden die Untersuchungsstandorte von einer mehrere Zentimeter mächtigen Ascheschicht bedeckt, welche das Wachstum zu beeinflussen vermag (siehe Abbildungen 6 – 10 und 12) (Briffa et al., 1998, Biondi et al., 2003, Hinckley et al., 1984, Tognetti et al., 2012). Der Zeitpunkt der Eruption spielt eine entscheidende Rolle, ob und in welchem Ausmass das Ausgeworfene Material Einfluss auf das Wachstum der Bäume nimmt (Hotes et al., 2004). Da Tephra typischerweise eine tiefe Kationenaustauschkapazität aufweist, werden die Bodeneigenschaften eher verschlechtert, denn verbessert (Wilson et al., 2011). Jahrringe zeigen schliesslich an, ob sich ein Ereignis auf das Wachstum der Bäume ausgewirkt hat oder nicht. Welche der oben genannten Möglichkeiten sich in den analysierten Jahrringen wiederfinden lassen, soll im Folgenden ausgeführt werden. Es wurde jedes einzelne Ausbruchsjahr auf ein allfälliges Signal für den Vulkanausbruch hin analysiert.

Die Jahrringbreiten am Standort Hekla zeigen für das Ausbruchsjahr 1947 ein stark vermindertes Wachstum an (siehe Abbildung 46 und Tabelle 7). Die Chronologien der beiden Standorte Eyjafjallajökull und Vatnshornsskogur zeigen hingegen keine sichtbare Reaktion. Da die Sommertemperaturen nicht zurückgingen (meteorologische Station Hæll), was auf eine klimatisch bedingte Wachstumsreduktion hindeuten würde (Levanič & Eggertsson, 2008), könnte es sich hierbei um eine Reaktion auf den Vulkanausbruch handeln. Wie von Battipaglia et al. (2007) beschrieben, kann es durch die Aerosole und Aschepartikel in der Atmosphäre zu einer Abkühlung kommen. Dies dürfte im Fall der Eruption im Jahr 1947 nur lokal am Standort Hekla aufgetreten sein. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, wurde die Asche gegen Süden getragen. Dies lässt den Schluss zu, dass der Forschungsstandort an der Hekla nicht durch eine

Ascheschicht bedeckt wurde. Somit dürften die schmalere Jahrringe dadurch zustande gekommen sein, dass die Birken an der Hekla weniger Sonnenlicht abbekommen haben und somit tieferen Temperaturen ausgesetzt waren (Battipaglia et al., 2007). Da keine Niederschlagsdaten für diesen Zeitraum zur Verfügung stehen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein lokal aufgetretener Wassermangel zu der Wachstumsreduktion geführt haben könnte (Chen et al., 1999, Kharuk et al., 2013).

Im Jahr 1970 herrschten zum einen tiefere Sommertemperaturen und zum anderen fiel nicht sehr viel Niederschlag (siehe Abbildung 45). Dies führte an allen drei Standorten zu einem klimatisch bedingten Signal. Reduziertes Wachstum und somit schmalere Jahrringe sind die Folge (Levanič & Eggertsson, 2008). Am Standort Hekla kann ein verstärktes Signal erkannt werden, möglicherweise als Folge des Vulkanausbruchs. Die Eruption im Mai 1970 dürfte unterschiedliche Einflüsse auf die Vegetation gehabt haben. Zum einen wurden die Bäume am Standort Hekla von einer Ascheschicht bedeckt (siehe Abbildung 7). Die feinen Aschepartikel legten sich auf die Blätter der Birken und störten so den Gasaustausch der Stomata (Biondi et al., 2003). Da sich die Eruption während der Vegetationsphase ereignete, dürfte die aufliegende Ascheschicht die Photosynthese Aktivität des Blattwerkes negativ beeinträchtigt haben (Tognetti et al., 2012). Die Durchlüftung des Bodens wird durch die Auflage einer Tephra-schicht ebenfalls reduziert, was nach Diaz et al. (2005) die Atmung der Wurzeln hemmt. Zudem fallen die Auswirkungen der Ascheschicht noch gravierender ins Gewicht, da die Eruption zu Beginn der Vegetationsperiode ablief (Hotes et al., 2004). Die Beeinflussung durch den Vulkan dürfte sich jedoch auf den Standort Hekla beschränkt haben. An den beiden anderen Standorten blieb ein so markanter Rückgang in den Jahrringbreiten aus (siehe Abbildung 29). Da der Ausbruch im Jahr 1980 gegen Ende der Vegetationsphase stattfand und kaum Tephra ins Untersuchungsgebiet Hekla gelangte (siehe Abbildung 8), dürfte ein allfälliger Einfluss nur bedingt in den Jahrringbreiten ablesbar sein. Dies wird durch die Weiser Jahr Analyse bestätigt (siehe Tabelle 8), welche das Jahr 1980 als positives Weiser Jahr, für den Standort Hekla, angibt (siehe Abbildung 46). Durch leicht höhere Temperaturen im Sommer bildeten die Bäume an der Hekla breitere Jahrringe aus als in den Vorjahren. Der erste Ausstoss von Tephra und Asche im August 1980, also gegen Ende der Vegetationsphase, hatte keinen grossen Einfluss auf das Wachstum der Bäume am Standort Hekla. Es kann für keinen der drei Standorte eine Beeinflussung des Baumwachstums festgehalten werden.

Die Eruption der Hekla im Jahr 1991 hatte an keinem der drei Standorte einen negativen Einfluss auf das Wachstum der Bäume. Es wurde nur sehr wenig Asche ausgestossen (Gudmundsson et al., 1992), welche dann zusätzlich im Gebiet nordöstlich des Vulkans Hekla ab-

gelagert wurde. Der Standort Hekla wurde nicht durch die beschriebenen Folgen einer aufliegenden Ascheschicht beeinträchtigt (siehe Abbildung 9). Die breiten Jahrringe an allen drei Standorten sind den hohen Sommertemperaturen zuzuschreiben. Es handelt sich also um ein klimatisch bedingtes Signal, wie es Levanič & Eggertsson (2008) in ihrer Forschungsarbeit beschreiben. Dass die Eruption eine erhöhte diffuse Strahlung zur Folge hatte, wie dies von Gu et al. (2003) festgestellt wurde, bleibt aufgrund der relativ kleinen Eruption der Hekla unwahrscheinlich (mündliche Mitteilung Prof. Dr. Þorvaldur Þórðarson, 2013).

Die Eruption im Jahr 2000 gilt als kleinste und kürzeste aller Hekla Eruptionen. Zudem fand der Ausbruch ausserhalb der Vegetationsphase im Februar statt, was nach Hotes et al. (2004) entscheidend für das Ausmass der Beeinflussung ist. Anhand der Jahrringbreiten konnten keine Auswirkungen auf die Vegetation festgestellt werden.

Während am Standort nahe dem Eruptionsherd am Eyjafjallajökull verringertes Wachstum für das Jahr 2010 festgestellt wurde, verzeichnen die beiden anderen Standorte Hekla und Vatnshornsskogur Höchstwerte in den Jahrringbreiten. Diese hohen Wachstumsraten können mit den höchsten Sommertemperaturen der gesamten Messreihe erklärt werden (Levanič & Eggertsson, 2008). Das verminderte Wachstum am Eyjafjallajökull kann somit als eindeutiges Signal für den Einfluss des Vulkanausbruches gewertet werden. Dadurch dass die Aschesäule während gut einem Monat bestehen blieb (Gudmundsson et al., 2012), wurde eine beträchtliche Menge Asche im Untersuchungsgebiet abgelagert (siehe Abbildung 12). Diese schwächte die Photosynthese Aktivität ab und beeinträchtigte somit das Wachstum während der Vegetationsperiode negativ (Biondi et al. 2003). Da die ausgestossene Asche des Eyjafjallajökulls ($< 63\mu\text{m}$) sehr feinkörnig gewesen ist (Bagnato et al., 2013) dürfte die Stomata Aktivität eingeschränkt gewesen sein (Hinckley et al., 1984, Tognetti et al., 2012). Da auch der Boden von Tephra bedeckt gewesen ist, dürfte die Atmung der Wurzeln eingeschränkt gewesen sein, was nach Diaz et al. (2005) die Wachstumsbedingungen weiter verschlechtert haben dürfte. Es ist denkbar, dass sich die Temperatur lokal abgesenkt hat, was zu schmaleren Jahrringen führen würde, wie dies von Battipaglia et al. (2007) am Vesuv (Italien) festgestellt wurde. Eine solche Veränderung der klimatischen Bedingungen sollte dann anhand der Isotopenmessungen nachvollzogen werden können, was in dieser Forschungsarbeit allerdings nicht gelungen ist (siehe Kapitel 10.3). Im Folgejahr konnte eine Zunahme der Jahrringbreiten für den Standort Eyjafjallajökull festgestellt werden, während die beiden anderen Standorte einen Rückgang verzeichneten. Dieser Rückgang kann durch die etwas tieferen Sommertemperaturen erklärt werden (Levanič & Eggertsson, 2008). Die erhöhten Wachstumsraten des Standorts Eyjaf-

jallajökull könnte damit begründet werden, dass die Wachstumsverhältnisse besser waren als im Vorjahr. Dadurch dass die Beeinträchtigung durch die Ascheschicht wegfiel (Peters & Witherspoon, 1972), konnten sich die Bäume trotz der tieferen Temperaturen besser entwickeln. Eine Temperaturerhöhung des Bodens aufgrund der tieferen Albedo, wie es Black & Mack (1986) aufzeigen, scheint aufgrund der geschlossenen Grasbedeckung im Untersuchungsgebiet unwahrscheinlich. Ein Signal für den Vulkanausbruch im Jahr 2010 lässt sich nur am Standort Eyjafjallajökull finden. Die Chronologien der beiden anderen Standorte folgen dementsprechend dem allgemeinen Klimatrend. Die Auswirkungen der Eruption blieben somit auf ein kleinräumiges Gebiet nahe dem Vulkan begrenzt.

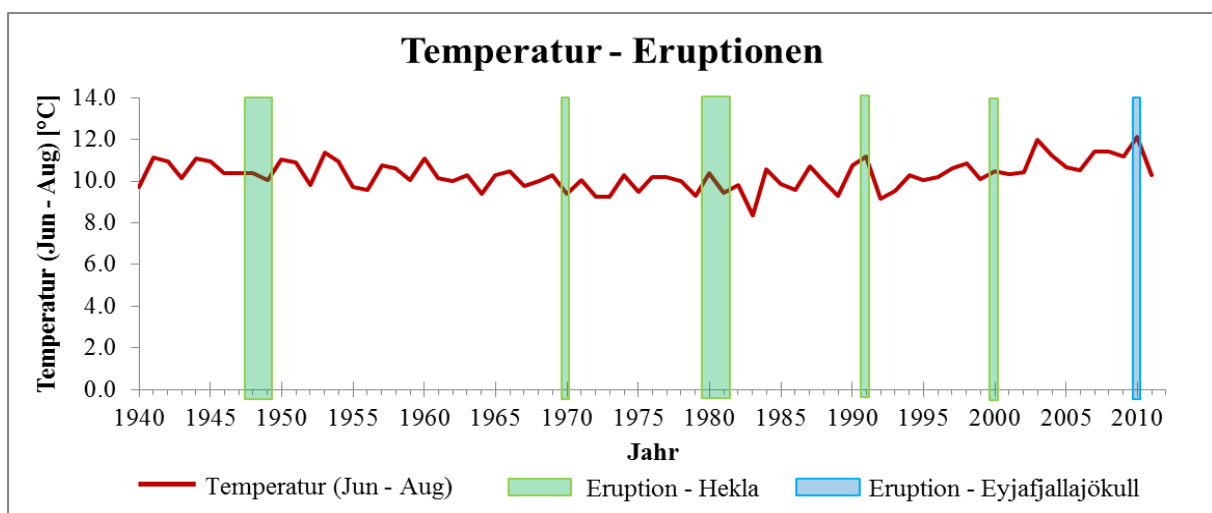


Abbildung 49: Der Temperaturverlauf (Jun – Aug) für den Abschnitt der vulkanischen Aktivität der beiden Vulkane Hekla und Eyjafjallajökull.

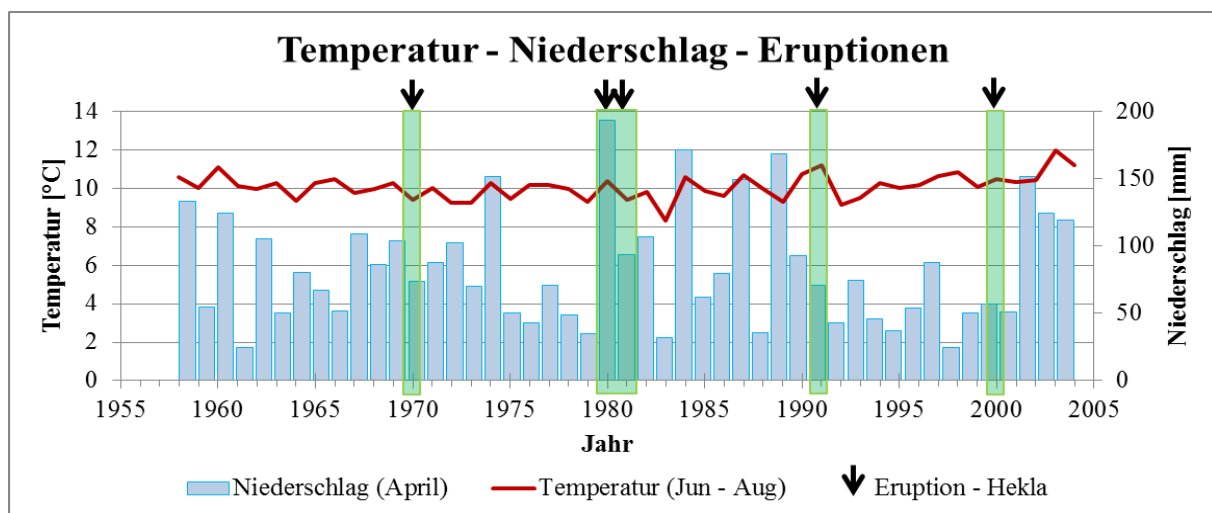


Abbildung 50: Verlauf der Temperatur (Jun – Aug) mit den Niederschlagsmengen (Monat April) von 1958 – 2004. Die Ausbruchsjahre der Hekla (1970, 1980 / 81, 1991 und 2000) sind als grüne Balken mit den schwarzen Pfeilen markiert.

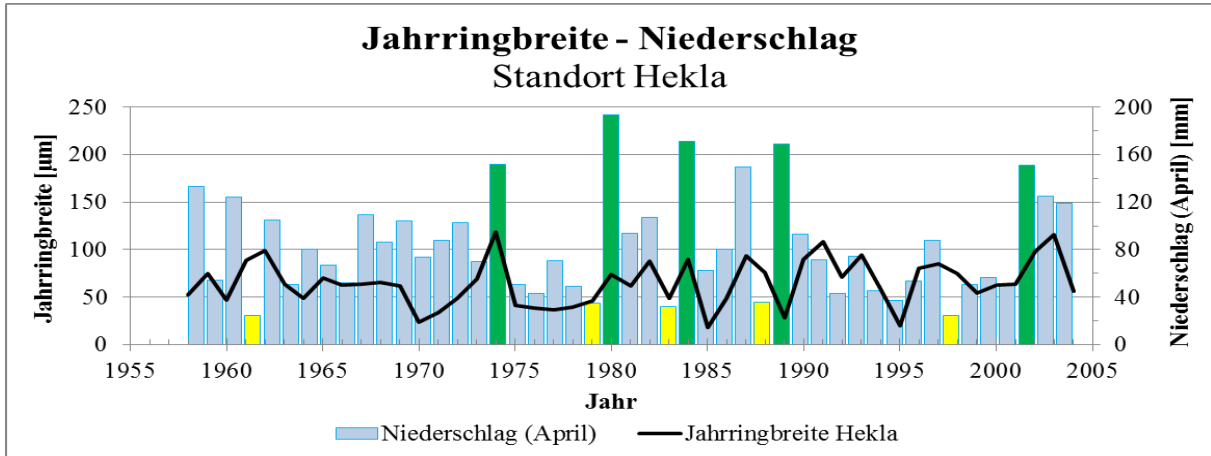


Abbildung 52: Jahrringbreiten des Standorts Hekla, zusammen mit den Niederschlagsmengen (Monat April) für die Jahre 1958 – 2004.

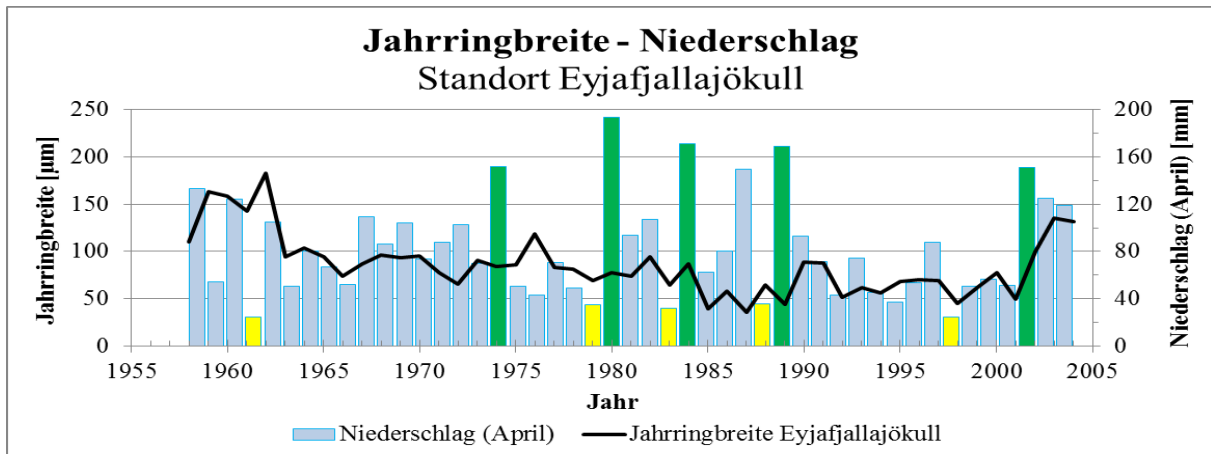


Abbildung 51: Jahrringbreiten des Standorts Eyjafjallajökull, zusammen mit den Niederschlagsmengen (Monat April) für die Jahre 1958 – 2004.

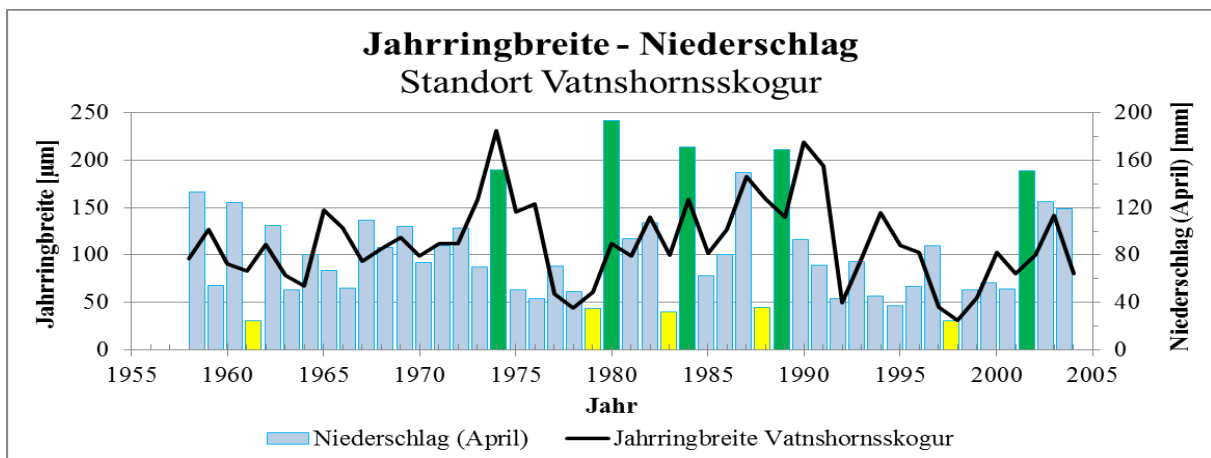


Abbildung 53: Jahrringbreiten des Standorts Vatnshornsskogur, zusammen mit den Niederschlagsmengen (Monat April) für die Jahre 1958 - 2004.

10.3. Isotopenanalyse

Die Eruption des Eyjafjallajökulls soll durch Isotopenmessungen ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) an den beiden Standorten Eyjafjallajökull und Vatnshornsskogur genauer analysiert werden. Die Auswertung der Messungen ergab kein eindeutiges Signal für den Ausbruch des Eyjafjallajökulls im 2010. Anhand des Studentent-Tests ($\alpha=0.01$) wurden weder für $\delta^{13}\text{C}$ noch für $\delta^{18}\text{O}$ signifikante Veränderungen von einem Jahr zum anderen festgestellt. Die Kurven des Kontrollstandortes Vatnshornsskogur und des Standortes am Eyjafjallajökull zeigen einen ähnlichen Verlauf. Da Schwankungen in den Isotopenmessungen beider Standorte auftreten, dürfte dies auf die generell vorherrschenden Klimabedingungen während der Vegetationsperiode zurückzuführen zu sein. Jeder Jahrring erhält seine Prägung durch das CO_2 in der Luft, O und H stammen vom Bodenwasser. Je nach Ursprung der Komponenten, zeigen sie unterschiedliche Isotopenzustände, welche im Holz eingebaut und somit gespeichert werden (McCarroll & Loader, 2004).

Der Anteil an $\delta^{18}\text{O}$ im Baumring ist keine direkte Messung des $\delta^{18}\text{O}$ der Wasserquelle des Baumes, da diese Verhältnis auch von der Evapotranspiration der Blätter abhängt. Diese wiederum hängt von der Leitfähigkeit der Stomata und des Dampfdruckdefizits ab, welche beide von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängen. Die resultierende Fraktionierung wird durch das $\delta^{18}\text{O}$ Verhältnis des Wasserdampfes ausserhalb des Blattes beeinflusst (Roden et al., 2000). Wie die Breite eines Jahrringes, ist das Verhältnis der Isotope aufgrund der vorherrschenden Umweltbedingungen zustande gekommen. So wird $\delta^{18}\text{O}$ als Signal für Niederschlagsmenge und Luftfeuchtigkeit im Sommer beschrieben (McCarroll & Loader, 2004). Wie von Battipaglia et al. (2007) beschrieben, hängt der Anteil an $\delta^{18}\text{O}$ stark mit den Niederschlagswerten zusammen. Erhöhte Niederschlagsmengen bedeuten auch ein Absinken der Temperaturen, wie es von Levanič & Eggertsson (2008) festgehalten wird. Da keine signifikanten Veränderungen in den Isotopenverhältnissen des $\delta^{18}\text{O}$ gemessen wurden, konnte dieser Effekt im Falle Islands nicht bestätigt werden.

Auch beim $\delta^{13}\text{C}$ konnte kein eindeutiges Signal zu den Klimabedingungen ausgemacht werden. Die Werte scheinen dem allgemeinen Klimatrend zu folgen, sprich bei höheren Temperaturen reichert sich ^{13}C an. Durch Aerosole und Aschepartikel in der Luft kühlt die Atmosphäre ab, wie es nach einem Vulkanausbruch der Fall sein kann (Kulmala et al., 2004). Die Anreicherung an ^{13}C in der Zellulose der Bäume hängt stark mit dem Feuchtigkeitsverlust aufgrund der Stomata Aktivität zusammen (McCarroll & Loader, 2004). Bei hoher Verdunstung, sprich höheren Temperaturen, verdunstet das leichtere ^{12}C einfacher als das schwerere ^{13}C . Ist

die Stomata geöffnet, wie es bei hoher Luftfeuchtigkeit der Fall ist, kann vermehrt ^{12}C gemessen werden (Battipaglia et al., 2007). Wie Gu et al. (2003) oder Farquhar & Roderick (2003) beschreiben, kann ^{13}C auch durch eine verstärkte Photosynthese Aktivität in der organische Substanz der Bäume angereichert werden. Nach der Eruption des Pinatubo Vulkans (Philippinen) wurden von Gu et al. (2003) tiefere CO_2 Konzentrationen in der Atmosphäre gemessen, welche durch die erhöhte Photosynthese Aktivität erklärt werden. Während der Photosynthese wird CO_2 und H_2O zu Glucose und Sauerstoff umgewandelt (von Sengbusch, 1977). Dieser biologische Prozess tendiert dazu das ^{12}C dem schwereren ^{13}C zu bevorzugen, was dann zur Anreicherung des ^{13}C in den Zellen führt (McCarroll & Loader, 2004).

Die Veränderungen der klimatischen Bedingungen im Jahr 2010 aufgrund der Eruption des Eyjafjallajökulls scheinen nicht genügend stark gewesen zu sein, um sich in einem Signal in den Isotopenverhältnissen niederzuschlagen. Wie die Abbildung 40 aufzeigt, ist die Streuung der Resultate der Isotopenmessungen innerhalb der Standorte (von Baum zu Baum) recht gross (siehe Abbildung 40). Um ein eindeutigeres Signal zu erhalten, müssten weitere Isotopenmessungen gemacht werden. Ob dann aber ein Signal für den Ausbruch des Eyjafjallajökull zu finden ist, kann nur schwer abgeschätzt werden. Die Eruption scheint die klimatischen Bedingungen in Island nicht prägend verändert zu haben.

10.4. Chemische Zusammensetzung des Holzes

Pearson et al. (2005) fanden erhöhte Werte für die Elemente Aluminium, Magnesium, Nickel, Zink und Kupfer, Strontium, Cadmium, Barium, Lanthan und Ruidium, was als Signal für den Ausbruch des Tamboras im Jahr 1815 interpretiert wurde. Bei dessen Eruption wurden enorme Mengen an Asche ($100 - 300 \text{ km}^3$) und Magma (rund 30 km^3) gefördert (Self et al., 1984, 2004). Das Ausmass dieses grossen Vulkanausbruchs war global spürbar und wird als Grund für das „Jahr ohne Sommer“ genannt (Auchmann et al., 2012). Wie auch die Forschungsarbeit von Watt et al. (2007) am Vulkan Etna in Italien zeigt, konnten in Island ebenfalls kein Signal festgestellt werden. Die Messungen der chemischen Zusammensetzung des Holzes zeigen keine Anzeichen für den Ausbruch des Eyjafjallajökulls im Jahr 2010. Die Eruption hat also keinen erkennbaren Einfluss auf die Aufnahme von gewissen Elementen der Birken. Wie Cruz-Muñoz (2008) ausführen, haben vom Vulkan ausgestossene Gase einen grösseren Einfluss auf die Zusammensetzung des Holzes, als die Asche. Da kein Signal in den Jahrringen der Birken am Eyjafjallajökull zu finden ist, dürften die Bäume nicht durch die eruptionsbedingten Gaszusammensetzung beeinträchtigt worden sein. Die Resultate der Messung der

chemischen Bestandteile der Birken stützen die Analysen der Isotopenmessungen insofern, da ebenfalls keine Veränderung aufgrund der vulkanischen Aktivität festgestellt werden konnte. Interessant dürfte allenfalls sein, ob sich die Zusammensetzung der Stoffe ändert, die via Wurzelsystem in die Pflanze gelangen. Da keine auffälligen Änderungen für die Jahre 2010 – 2012 gefunden wurden, deutet dies auf eine längere Zeitspanne hin, die das Aschematerial gebraucht um via Boden in die Pflanze zu gelangen. Ein allfälliges Signal dafür hängt stark von den Bestandteilen des Tephramaterials ab (Bagnato et al., 2013).

11. Synthese

Die dendrochronologischen Untersuchungen der Birkenproben aus Island zeigen auf, dass anhand der Jahrringe der Bäume auf die vorherrschenden Umweltbedingungen geschlossen werden kann. Je nach Standort und Jahr konnte ein limitierender Faktor für das Wachstum der Birken identifiziert werden. In den meisten Jahren kommt die Temperatur als limitierender Faktor zu tragen. In einzelnen Jahren, wo die Temperatur genügend hoch gewesen ist und nur wenig Niederschlag gefallen ist, kann der Mangel an Wasser limitierender Faktor wirken. Dies ist aber die Ausnahme, da in den meisten Jahren genügend Wasser zur Verfügung gestanden ist.

Die Analysen der Isotopenverhältnisse für $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ lassen keinen Einfluss des Vulkanausbruchs im Jahr 2010 auf die klimatischen Bedingungen erkennen. Die Messungen zeigen keine signifikanten Veränderungen der Isotopenverhältnisse. Dass keine grosse Veränderungen in den von den Birken aufgenommenen Stoffen auftritt, wird durch die Messung der chemischen Zusammensetzung bestärkt.

T1: Wie beeinflusst die räumliche Distanz zum Vulkan ein allfälliges Signal im Wachstum des Baumes?

Anhand der Jahrringe der untersuchten Birken konnte festgestellt werden, dass die räumliche Distanz zum Ausbruchsherd einen grossen Einfluss auf ein allfälliges Signal in den Baumringbreiten hat. Eine Reduktion des Wachstums ist nur dann aufgetreten, wenn das Gebiet in dem sie wachsen, von einer Ascheschicht bedeckt worden ist. Diese Asche wird durch den Wind verfrachtet und kommt dementsprechend nicht bei jedem Ausbruch an demselben Ort zu liegen. Es konnte jeweils nur am Standort, der am nächsten zum Eruptionsherd liegt, ein Signal gefunden werden. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Zeitpunkt des Vulkanausbruchs, denn die Ascheschicht blockiert die Photosynthese Aktivität der Birken in den Sommermonaten (Juni – August), nicht jedoch während der Wintermonate.

T2: Welche der beiden Hypothesen von Battipaglia et al. (2007) und Gu et al. (2003) treffen auf Island zu?

Battipaglia et al. (2007) gehen davon aus, dass ein Vulkanausbruch entweder zu einer Veränderung der Strahlungsbilanz, sprich zu einer Abkühlung führt, was sich negativ auf die Photosynthese Aktivität der Vegetation auswirkt. Gu et al. (2003) hingegen beschreiben eine Erhöhung der diffusen Strahlung aufgrund der Aerosole in der Atmosphäre, was sich wiederum positiv auf die Photosynthese Aktivität der Vegetation auswirkt. Diese Veränderung der klimatischen Rahmenbedingungen würde dann in den Jahrringbreiten, als auch in den Isotopenverhältnissen von $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ nachvollzogen werden können.

Für das Jahr 1947 könnte die Hypothese von Battipaglia et al. (2007) durchaus zutreffen. Es wurden schmalere Jahrringe gefunden, die weder durch eine aufliegende Ascheschicht, noch durch klimatische Effekte erklärt werden können. Ansonsten wurden schmalere Baumringe in den Eruptionsjahren durch klimatische Einflüsse oder die Auswirkungen einer Ascheschicht begründet. Eine Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit im Jahr 2010 konnte aufgrund der Messung der Isotopenverhältnisse ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) nicht nachgewiesen werden. Die Hypothesen von Battipaglia et al. (2007) kann also nur teilweise auf Island angewendet werden. Klimatische Auswirkungen sind denkbar, wurden aber von den Isotopenmessungen nicht bestätigt.

Ein verstärktes Wachstum aufgrund der erhöhten diffusen Strahlung, wie es Gu et al. (2003) beschrieben, konnte nicht gefunden werden. Auch die Messungen der Isotopenverhältnisse ($\delta^{13}\text{C}$) zeigten diesen Effekt nicht. Es wurde keine signifikante Zunahme des Isotops ^{13}C in der Zellulose der Birken gemessen. Somit ist die Hypothese von Gu et al. (2003), im Falle von Island, nicht zutreffend. Keiner der Vulkanausbrüche (Hekla und Eyjafjallajökull) führten zu einem positiven Signal in den Jahrringbreiten der Birken.

T3: Kann in den Isotopenverhältnissen ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) ein Signal für die Eruption des Eyjafjallajökull im Jahr 2010 gefunden werden?

Es wurde kein Signal in den Messungen der Isotope $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ für einen Vulkanausbruch gefunden. Die Isotopenverhältnisse zeigen keine signifikante Veränderung auf den Ausbruch des Eyjafjallajökulls im Jahr 2010. Der Vulkanausbruch scheint kein grosser Einfluss auf die klimatischen Bedingungen gehabt zu haben. Es konnten weder tiefer $\delta^{13}\text{C}$ – Werte, aufgrund erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit, noch höhere $\delta^{13}\text{C}$ – Werte, aufgrund der erhöhten Photo-

synthese Aktivität gemessen werden. Die Resultate der Isotopenmessung zeigen allerdings eine grosse Streuung, was das Identifizieren eines eindeutigen Signals für den Vulkanausbruch des Eyjafjallajökulls verunmöglicht. Durch eine Erhöhung der Anzahl Messungen, könnte ein möglicherweise vorhandenes Signal identifiziert werden.

T4: Veränderte sich die chemische Zusammensetzung des Birkenholzes nach dem Ausbruch des Eyjafjallajökull im Jahr 2010?

Die Analyse der chemischen Bestandteile des isländischen Birkenholzes ergab kein Signal für einen Vulkanausbruch im Jahr 2010. Keines der gemessenen Elemente zeigte eine erhöhte Konzentration an, wie dies Pearson et al. (2005) gelungen haben.

12. Schlussfolgerung

In Island konnte eine Reduktion der Baumringbreiten auf Vulkanausbrüche in jenen Jahren festgestellt werden, in welchen eine Ascheschicht die Vegetation bedeckte. Diese Asche hatte zur Folge, dass die Photosynthese Aktivität, als auch der Gasaustausch der Stomata und der Wurzeln der Birken gehemmt wurde (Biondi et al., 2003, Tognetti et al., 2012). Eine Wachstumsreduktion aufgrund einer lokalen Abkühlung der klimatischen Bedingungen, infolge der Aerosole und Aschepartikel in der Luft, konnte nachgewiesen werden (Battipaglia et al., 2007). In den Isotopenverhältnissen $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ konnten keine Signale für einen Vulkanausbruch gefunden werden. Verstärkte Photosynthese Aktivität und somit breitere Jahrringe aufgrund vermehrter diffuser Strahlung, konnte in den Isotopenverhältnissen ebenfalls nicht nachgewiesen werden (Farquhar & Roderick, 2003, Gu et al., 2003). Die Messungen der Isotope ergaben keine Hinweise auf einen Einfluss der Vulkane auf die vorherrschenden klimatischen Bedingungen. Desweiteren konnte keine Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des Birkenholzes, aufgrund der Eruption des Eyjafjallajökull gefunden werden (Pearson et al., 2005). Die Baumringbreiten korrelieren hingegen gut mit den klimatischen Bedingungen, die während der Vegetationsphase (Juni bis August) herrschten. So haben hohe Sommertemperaturen nachweislich einen positiven Einfluss auf das Wachstum der Birken Islands. Zudem optimieren genügend grosse pflanzenverfügbare Wassermengen im Frühling (Monat April) die Wachstumsbedingungen (Levanič & Eggertsson, 2008).

13. Ausblick

Auch in Zukunft wird es in Island regelmässig zu Vulkanausbrüchen grösseren oder kleineren Ausmasses kommen. Wie die Bewohner der Insel, so hat auch die Vegetation einen Weg gefunden, mit den Folgen von Eruptionen klar zu kommen. Neben der Beeinträchtigung durch Vulkanausbrüche haben vor allem die Menschen mit ihren Rodungstätigkeiten einen massiven Schnitt in die Vegetationsbedeckung Island vorgenommen. Aufgrund der harschen Umweltbedingungen, erholt sich die Natur nur sehr langsam. Wiederbepflanzungen mit *B. pubescens* und *Pinus sylvestris* L. (Schweingruber, 1993) von ehemals von Birkenwäldern bedeckte Gebiete zeigen nur mässigen Erfolg. Trotzdem gibt es grosse Bemühungen, des Waldforschungsinstituts in Mógliá, die Wälder wieder aufzuforsten und so der Erosion des Bodens Einhalt zu gebieten (mündliche Mitteilung von Aðalsteinn Sigurgeirsson und Þorbergur Hjalti Jónsson, 2013).

Die vorliegende Masterarbeit erweitert den Blick auf die Folgen der Vulkanausbrüche der neusten Zeit. Durch den Untersuchungsstandort weit im Norden der Erde, zeigt sie auf, wie die Vegetation des hohen Nordens auf vulkanische Aktivität reagiert.

Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit sind drei, gut 90 jährige, Baumringchronologie für *B. pubescens*, aus dem Süden Islands, welche für weitere Forschungen zur Verfügung stehen werden.

Mir persönlich hat diese Masterarbeit die Möglichkeit eröffnet, ein mir unbekanntes Land zu bereisen, zu erfahren und zu erkunden. Ich habe interessante Personen getroffen, und eine grossartige Zeit in Island verbringen können. Die Möglichkeit, einen Vortrag an der *Nordic Forest Research – Conference* halten zu dürfen und so mit Fachleuten vor Ort meine Resultate durchgehen, hat mir viele Inputs und mich auch persönlich weiter gebracht. Dies und die Analyse des mit nach Hause gebrachten Probenmaterials, haben meinen Horizont erweitert und es erfüllt mich mit grosser Freude und auch ein wenig mit Stolz, die fertige Arbeit nun endlich vor mir zu sehen.

14. Danksagung

Ich möchte Dr. Paolo Cherubini für seine Unterstützung bei meiner Masterarbeit danken und dass er mir die Möglichkeit gab, ein so wunderbares und spektakuläres Land, wie es Island ist, zu besuchen. Seine inspirierende Art und die mitreissenden Gespräche über die Dendrochronologie haben mich dieser Forschungsrichtung näher gebracht und mich motiviert, in diesem Gebiet meine Abschlussarbeit zu schreiben.

Dank Ólafur Eggertsson und Þorbergur Hjalti Jónsson, des Forschungsinstituts für Forstwirtschaft in Mógli­­sá, war es mir erst möglich, an die entlegenen Untersuchungsstandorte zu gelangen. Die zwei haben mir auch bei der Beprobung der Birken enorm geholfen. Zudem wurde ich von Ólafur Eggertsson an die *Nordic Forest Research – Conference*, welche im Oktober 2013 in Hvol­­svöllur, Island stattgefunden hat, eingeladen. Dort konnte ich meine Arbeit vorstellen was eine sehr bereichernde Erfahrung.

Für die Messung der Isotopenverhältnisse am Paul Scherer Institut danke ich Dr. Matthias Saurer, der die Messungen für mich gemacht hat.

Andrea Mancini war meine Kontaktperson zum Institut für Geochemie und Petrologie der ETHZ. Vielen Dank für die durchgeführten Analysen und dessen Darstellung.

Prof. Dr. Markus Egli, der meine Arbeit durchgelesen und mich auf allfällige Fehler und Formulierungsschwierigkeiten aufmerksam gemacht hat, war eine grosse Hilfe.

Speziellen Dank geht auch an die Mitarbeiter der Gruppe Dendroökologie an der WSL, die immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind. Durch die erhaltenen Tipps und Inputs war es mir erst möglich, die Jahrringe zu erkennen und sie dann korrekt zu datieren.

Ich möchte auch bei meinen Eltern von ganzem Herzen bedanken, dass sie mich während der gesamten Studienzzeit so grossartig unterstützt haben.

Danke meiner Schwester Désirée Eichmann, die für mich die Flüge nach Island und zurück so hervorragend organisiert hat.

Mein Bruder Cédric Eichmann hat mich bei Darstellungsproblemen der Resultate tatkräftig unterstützt, nochmals vielen Dank dafür.

Speziellen Dank geht an Mércia Diniz Silva, welche mich an die Konferenz in Island begleitet hat und mich durch ihre positive Art inspiriert, angetrieben und vorwärts gebracht hat.

Meine Arbeitgeber, das Staatsarchiv Kanton Schwyz und NDD Medizinaltechnik AG, hat mir grosse Freiheiten bezüglich Arbeitszeiten gegeben, was mir speziell während des Schreibens meiner Abschlussarbeit zugute kam.

Zu guter Letzt danke ich meinen Freunden Fabian Bamert und Philipp Suter, die als Lektoren meine Arbeit durchgesehen haben.

Literaturverzeichnis

- Aðalsteinn Sigurgeirsson, Director of Icelandic Forest Research, Mógilsá, Iceland.
- Alsing, I., 2002: Lexikon Landwirtschaft: pflanzliche Erzeugung, tierische Erzeugung, Landtechnik/Bauwesen, ökologischer Landbau, Betriebslehre, landwirtschaftliches Recht 4. überarb. und erw. Aufl.
- Arnalds, O., 2004: Volcanic soils of Iceland. *Catena*, 56(1), 3-20.
- Arnalds, O., 2013: The Influence of Volcanic Tephra (Ash) on Ecosystems. *Advances in Agronomy*, 121, 331.
- Auchmann, R., Brönnimann, S., Breda, L., Bühler, M., Spadin, R., Stickler, A., 2012: Extreme climate, not extreme weather: the summer of 1816 in Geneva, Switzerland. *Climate of the Past*, 8(1).
- Bagnato, E., Aiuppa, A., Bertagnini, A., Bonadonna, C., Cioni, R., Pistolesi, M., Pedone, M., Hoskuldsson, A., 2013: Scavenging of sulphur, halogens and trace metals by volcanic ash: The 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 103, 138-160.
- Battipaglia, G., Cherubini, P., Saurer, M., Siegwolf, R. T., Strumia, S., Francesca Cotrufo, M., 2007: Volcanic explosive eruptions of the Vesuvio decrease tree-ring growth but not photosynthetic rates in the surrounding forests. *Global change biology*, 13(6), 1122-1137.
- Biondi, F., Estrada, I. G., Gavilanes Ruiz, J. C., Torres, A. E., 2003: Tree growth response to the 1913 eruption of Volcán de Fuego de Colima, Mexico. *Quaternary Research*, 59(3), 293-299.
- Biondi, F., Waikul, K., 2004: DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 30(3), 303-311.
- Black, R. A., Mack, R. N., 1986: Mount St. Helens ash: recreating its effects on the steppe environment and ecophysiology. *Ecology*, 67(5), 1289-1302.
- Borella, S., Leuenberger, M., Saurer, M., Siegwolf, R., 1998: Reducing uncertainties in $\delta^{13}\text{C}$ analysis of tree rings: pooling, milling, and cellulose extraction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 103(D16), 19519-19526.
- Briffa, K. R., Schweingruber, F. H., Jones, P. D., Osborn, T. J., Shiyatov, S. G., & Vaganov, E. A., 1998: Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, 391(6668), 678-682.

- Briffa, K. R., Jones, P. D., Pilcher, J. R., Hughes, M. K., 1988: Reconstructing summer temperatures in northern Fennoscandia back to AD 1700 using tree-ring data from Scots pine. *Arctic and Alpine Research*, 385-394.
- Briffa, K. R., Jones, P. D., Schweingruber, F. H., Osborn, T. J., 1998: Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 393(6684), 450-455.
- Chen, J., Saunders, S. C., Crow, T. R., Naiman, R. J., Broszofski, K. D., Mroz, G. D., Brookshire, B. L., Franklin, J. F., 1999: Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape Ecology Variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. *BioScience*, 49(4), 288-297.
- Cruz-Muñoz, A. R., Rodríguez-Fernández, L., Calva-Vázquez, G., Ruvalcaba-Sil, J. L., 2008: Effects due to Popocatepetl volcano eruptions on the elemental concentrations in tree growth rings. *X-Ray Spectrometry*, 37(2), 163-168.
- Diaz, F., Jimenez, C. C., & Tejedor, M., 2005: Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation. *Agricultural water management*, 74(1), 47-55.
- Einarsson, M. A., 1984: Climate of Iceland. *World survey of climatology*, 15, 673-697.
- Erhardt, W., Götz, E., Bödeker, N., Seybold, S., 2002: Zander. *Handwörterbuch der Pflanzennamen*. Verlag E. Ulmer Stuttgart, 17. 231.
- Farquhar, G. D., & Roderick, M. L., 2003: Pinatubo, diffuse light, and the carbon cycle. *Science*, 299(5615), 1997-1998.
- Flaathen, T. K., Gislason, S. R., 2007: The effect of volcanic eruptions on the chemistry of surface waters: The 1991 and 2000 eruptions of Mt. Hekla, Iceland. *Journal of volcanology and geothermal research*, 164(4), 293-316.
- Fritts, H. C., 1971: Dendroclimatology and dendroecology. *Quaternary Research*, 1:419-449.
- Fritts, H. C., 2012: *Tree rings and climate*. Elsevier.
- 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*, 28(2), 85-92.
- Glenn, M. S., & Woo, M. K., 1997: Spring and summer hydrology of a valley-bottom wetland, Ellesmere Island, Northwest Territories, Canada. *Wetlands*, 17(2), 321-329.
- Grissino-Mayer, Henri D., Homepage: <http://web.utk.edu/~grissino/index.htm> (Zugriff 31.03.2014)
- Gronvold, K., Larsen, G., Einarsson, P., Thorarinsson, S., Saemundsson, K., 1983: The Hekla eruption 1980–1981. *Bulletin volcanologique*, 46(4), 349-363.

- Gu, L., Baldocchi, D. D., Wofsy, S. C., Munger, J. W., Michalsky, J. J., Urbanski, S. P., Boden, T. A., 2003: Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. *Science*, 299(5615), 2035-2038.
- Gudmundsson, M. T., Thordarson, T., Höskuldsson, Á., Larsen, G., Björnsson, H., Prata, F. J., Oddsson, B., Magnússon, E., Högnadóttir, T., Petersen, G. N., Hayward, C. L., Stevenson, J. A., Jónsdóttir, I., 2012: Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Scientific reports*, 2.
- Grissino-Mayer, H.D., 2001: Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-ring research*, 57:205-221.
- Gronvold, K., Larsen, G., Einarsson, P., Thorarinsson, S., Saemundsson, K., 1983: The Hekla eruption 1980–1981. *Bulletin volcanologique*, 46(4), 349-363.
- Gu, L., Baldocchi, D. D., Wofsy, S. C., Munger, J. W., Michalsky, J. J., Urbanski, S. P., Boden, T. A., 2003: Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. *Science*, 299(5615), 2035-2038.
- Gudmundsson, A., Oskarsson, N., Gronvold, K., Saemundsson, K., Sigurdsson, O., Stefansson, R., Gislason, S. R., Einarsson, P., Brandsdóttir, B., Larsen, G., Johannesson, H., Thordarson, T., 1992: The 1991 eruption of Hekla, Iceland. *Bulletin of Volcanology*, 54(3), 238-246.
- Gudmundsson, M. T., Pedersen, R., Vogfjörd, K., Thorbjarnardóttir, B., Jakobsdóttir, S., Roberts, M. J., 2010: Eruptions of Eyjafjallajökull Volcano, Iceland. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 91(21), 190-191.
- Haas, H. D., Mosimann, T., Paesler, R., 1997: *DIERCKE-Wörterbuch Allgemeine Geographie*. Braunschweig, Germany: Westermann.
- Hayward, John A. Stevenson, Jónsdóttir, I., 2012: Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Scientific reports*, 2.
- Hinckley, T. M., Imoto, H., Lee, K., Lacker, S., Morikawa, Y., Vogt, K. A., Grier, C. C., Keyes, M. R., Teskey, R. O., Seymour, V., 1984: Impact of tephra deposition on growth in conifers: the year of the eruption. *Canadian Journal of Forest Research*, 14(5), 731-739.
- Historische Karte Islands. Homepage: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blaeu_1645_-_Tabula_Islandi%C3%A6.jpg , (Zugriff: 15.03.2014).
- Holmes, R.L., 1983: Computer- assisted quality control in tree -ring dating and measurement. *Tree -Ring Bulletin* 43:69 -78.

- Höskuldsson, Á., Óskarsson, N., Pedersen, R., Grönvold, K., Vogfjörð, K., Ólafsdóttir, R., 2007. The millennium eruption of Hekla in February 2000. *Bulletin of Volcanology*, 70(2), 169-182.
- Hotes, S., Poschlod, P., Takahashi, H., Grootjans, A. P., Adema, E., 2004: Effects of tephra deposition on mire vegetation: a field experiment in Hokkaido, Japan. *Journal of ecology*, 92(4), 624-634.
- Hreinn Óskarsson, Förster der Þórsörk, Icelandic Forest Institute, Mógilsá, Iceland.
- Hughes, M. K., 2002: Dendrochronology in climatology—the state of the art. *Dendrochronologia*, 20(1), 95-116.
- Hynynen, J., Niemistö, P., Viherä-Aarnio, A., Brunner, A., Hein, S., Velling, P., 2010: Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry*, 83(1), 103-119.
- Icelandic Meteorological Office, Homepage: <http://en.vedur.is/climatology/data> (Zugriff: 17.03.2014)
- IWG, WRB, 2006: World reference base for soil resources 2006—a framework for international classification, correlation and communication. World soil resources reports. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 128.
- Jones, P. D., Bradley, R. S., 1992: 13 Climatic variations in the longest instrumental records. *Climate Since AD 1500*, 246.
- Kaennel, M., Schweingruber, F. H., 1995: Multilingual glossary of dendrochronology. Paul Haupt AG Bern.
- Kartengrundlage, Koordinaten Zürichs, Homepage: <https://map.geo.admin.ch> (Zugriff: 06.03.2014).
- Kharuk, V. I., Ranson, K. J., Oskorbin, P. A., Im, S. T., Dvinskaya, M. L., 2013: Climate induced birch mortality in Trans-Baikal lake region, Siberia. *Forest Ecology and Management*, 289, 385-392.
- Krakauer, N. Y., Randerson, J. T., 2003: Do volcanic eruptions enhance or diminish net primary production? Evidence from tree rings. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4).
- Krüssman, G., 1976: *Handbuch der Laubgehölze*, Band I. 247.
- Kulmala, M., Suni, T., Lehtinen, K. E. J., Maso, M. D., Boy, M., Reissell, A., Rannik, Ü., Aalto, P., Keronen, P., Hakola, H., Bäck, J., Hoffmann, T., Vesala, T., Hari, P., 2004: A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(2), 557-562.

- Lacasse, C., Karlsdóttir, S., Larsen, G., Soosalu, H., Rose, W. I., Ernst, G. G. J., 2004: Weather radar observations of the Hekla 2000 eruption cloud, Iceland. *Bulletin of Volcanology*, 66(5), 457-473.
- Larsen, G., Vilmundardóttir, E.G., Thorkelsson, B., 1992: The Hekla eruption of 1991—The tephra fall. *Nátturufraeðingurinn* 61 (3–4), 159–176
- Lucas Jackson, 2010: DISASTER ENVIRONMENT IMAGES OF THE DAY. REUTERS (online Zugriff : 11.11.2013).
- Levanič, T., Eggertsson, O., 2008: Climatic effects on birch (*Betula pubescens* Ehrh.) growth in Fnjoskadalur valley, northern Iceland. *Dendrochronologia*, 25(3), 135-143.
- Luig, U., Schultz H. D. (Hg.), 2001: Vulkane und Gesellschaft. Berliner Geographische Arbeiten.
- McCarroll, D., Loader, N. J., 2004: Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23(7), 771-801.
- Monticelli, D., Di Iorio, A., Ciceri, E., Castelletti, A., Dossi, C., 2009: Tree ring microanalysis by LA-ICP-MS for environmental monitoring: validation or refutation? Two case histories. *Microchimica Acta*, 164(1-2), 139-148.
- National Land Survey of Iceland, Homepage: <http://www.lmi.is/en/okeypis-kort/> (Zugriff: 25.02.2014).
- Natural History of Iceland Site. FLORA OF ICELAND elements: *Betula pubescens*, downy birch. http://www.iceland-nh.net/plants/data/Betula-pubescens/betula_pubescens.html (Zugriff: 11.02.2014).
- NZZ.ch, Onlinearchiv (Zugriff 12.03.2014).
- Pearson, C., Manning, S. W., Coleman, M., Jarvis, K., 2005: Can tree-ring chemistry reveal absolute dates for past volcanic eruptions?. *Journal of Archaeological Science*, 32(8), 1265-1274.
- Peters, L. N., Witherspoon, J. P., 1972: Retention of 44-88 [mu] Simulated Fallout Particles by Grasses. *Health physics*, 22(3), 261-266.
- Press, F., Siever, R., 2003: *Allgemeine Geologie*. Spektrum, Akad. Verlag. Heidelberg
- Rinn, F., 2003: *TSAP-Win User Reference Manual*. Rinntech, Heidelberg.
- Roden, J. S., Lin, G., Ehleringer, J. R., 2000: A mechanistic model for interpretation of hydrogen and oxygen isotope ratios in tree-ring cellulose. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1), 21-35.
- Rose, W. I., Gu, Y., Watson, I. M., Yu, T., Blut, G. J. S., Prata, A. J., Krueger, A. J., Krotkov, N., Carn, S., Fromm, M. D., Hunton, D. E., Ernst, G. G. J., Viggiano, A. A., Miller, T.

- M., Ballenthin, J. O., Reeves, J. M., Wilson, J. C., Anderson, B. E., Flittner, D. E., 2003: The February–March 2000 eruption of Hekla, Iceland from a satellite perspective. *Volcanism and the Earth's Atmosphere*, 107-132.
- Schweingruber, F. H., 1993: Trees and wood in dendrochronology: morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology. Springer-Verlag.
- Schweingruber, F. H., 1996: Tree Rings and Environment. Dendroecology. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Bern, Stuttgart, Vienna, Haupt.
- Self, S., Gertisser, R., Thordarson, T., Rampino, M. R., Wolff, J. A., 2004: Magma volume, volatile emissions, and stratospheric aerosols from the 1815 eruption of Tambora. *Geophysical Research Letters*, 31(20), L20608.
- Self, S., Rampino, M. R., Newton, M. S., Wolff, J. A., 1984: Volcanological study of the great Tambora eruption of 1815. *Geology*, 12(11), 659-663.
- Seymour, V. A., Hinckley, T. M., Morikawa, Y., & Franklin, J. F., 1983: Foliage damage in coniferous trees following volcanic ashfall from Mt. St. Helens. *Oecologia*, 59(2-3), 339-343.
- Sonnenstand und Tageslänge für Zürich, Homepage: www.timeanddate.com (Zugriff: 06.03.2014).
- Speer, J. H., 2010: Fundamentals of tree-ring research. University of Arizona Press.
- Storrer, H. H., 1995: Einführung in die mathematische Behandlung der Naturwissenschaften 2 (Vol. 2). Springer DE.
- Sturkell, E., Einarsson, P., Sigmundsson, F., Hooper, A., Ófeigsson, B. G., Geirsson, H., Ólafsson, H., 2010. 2 Katla and Eyjafjallajökull Volcanoes. *Developments in Quaternary Sciences*, 13, 5-21.
- Thomas, P. A., 2000: Trees: their natural history. Cambridge University Press. 68 – 70.
- Thorarinsson, S., 1950: The eruption of Mt. Hekla 1947–1948. *Bulletin Volcanologique*, 10(1), 157-168.
- Thorarinsson, S., Sigvaldason, G. E., 1972: The Hekla eruption of 1970. *Bulletin of Volcanology*, 36(2), 269-288.
- Thordarson, T., Larsen, G., 2007. Volcanism in Iceland in historical time: Volcano types, eruption styles and eruptive history. *Journal of Geodynamics*, 43(1), 118-152.

- Tognetti, R., Lombardi, F., Lasserre, B., Battipaglia, G., Saurer, M., Cherubini, P., Marchetti, M., 2012: Tree-ring responses in *Araucaria araucana* to two major eruptions of Lonquimay Volcano (Chile). *Trees*, 26(6), 1805-1819.
- Þorvaldur Þórðarson, Professor für Petrologie und Vulkanologie der University of Iceland, Reykjavik, Iceland.
- Universität Island, http://www.hi.is/~oi/climate_in_iceland.htm (Zugriff: 06.03.2014).
- von Sengbusch, P., 1977: Photosynthese. In Einführung in die Allgemeine Biologie (pp. 83-88). Springer Berlin Heidelberg.
- Watt, S. F., Pyle, D. M., Mather, T. A., Day, J. A., Aiuppa, A., 2007: The use of tree-rings and foliage as an archive of volcanogenic cation deposition. *Environmental pollution*, 148(1), 48-61.
- Wilson, T., Cole, J., Cronin, S., Stewart, C., Johnston, D., 2011: Impacts on agriculture following the 1991 eruption of Vulcan Hudson, Patagonia: lessons for recovery. *Natural Hazards*, 57(2), 185-212.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aschewolke während der Eruption des Eyjafjallajökull 2010 (Foto: Ragnar Th. Sigurðsson).	8
Abbildung 2: Die zwei grundlegenden Szenarien nach einem Vulkanausbruch. Hypothese (1) zeigt eine Abkühlung aufgrund der Asche und Aerosole, was zu einem verringerten Pflanzenwachstum und höherer rel. Luftfeuchtigkeit führt. Tiefere Werte für $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ in den Jahrringen der Bäume sind die Folge. Hypothese (2) führt zu verstärkter Photosynthese Aktivität und somit grösserem Pflanzenwachstum, da Pflanzen diffuse Lichtstrahlung effizienter nutzen können. Es werden tiefere Werte für $\delta^{13}\text{C}$ erwartet und keine Veränderung für $\delta^{18}\text{O}$ – Werte (Quelle: Battipaglia et al., 2007, modifiziert).	12
Abbildung 3: Verlauf der Rift Zone im Atlantik (Quelle: Thordarson & Larsen, 2007).....	14
Abbildung 4: Grundsätzliche geologische Formationen Islands, hervorgehoben sind die hauptsächlichen Plattengrenzen und vulkanisch aktiven Zonen (RR: Reykjanes Ridge, RVB: Reykjanes Volcanic Belt, SISZ: South Iceland Seismic Zone, WVZ: West Volcanic Zone, MIB: Mid-Iceland Belt, EVZ: East Volcanic Zone, NVZ: North Volcanic Zone, TFZ: Tjörnes Fracture Zone, KR: Kobeinsey Ridge, ÖVB: Öraefi Volcanic Belt, SVB: Snæfellsnes Volcanic Belt) (Quelle: Thordarson & Larsen, 2007)	15
Abbildung 5: Mt. Hekla im Süden Islands, März 2005 (Foto: Hreggviður Norðdahl).....	16
Abbildung 6: Verteilung und Mächtigkeit der Ascheschicht der Haupteruption des Hekla am 30. März 1947. Grau eingezeichnet ist der Standort Hekla (Quelle: Thorarinsson, 1950, modifiziert).	17
Abbildung 7: Verteilung und Mächtigkeit der Tephraschicht der Hekla Eruption von 1970. Grau eingezeichnet ist der Standort Hekla (Quelle: Thorarinsson et al., 1972, modifiziert).	18
Abbildung 8: Verteilung und Mächtigkeit der Tephraschicht der Hekla Eruption von 1980. Grau eingezeichnet ist der Standort Hekla (Quelle: Gronvold et al., 1983, modifiziert).	19
Abbildung 9: Karte vom Gebiet rund um den Vulkan Hekla. Die eingezeichneten Isolinien (kg/m^2) bezeichnen die Sedimentation der Tephra nach der Hekla Eruption 1991. Als schwarze Markierung ist auch der Untersuchungsstandort nahe der Hekla eingezeichnet (Quelle: Larsen et al., 1992, modifiziert).....	20

Abbildung 10: Karte vom Gebiet rund um den Vulkan Hekla. Die eingezeichneten Isolinien (kg/m^2) bezeichnen die Sedimentation der Tephra nach der Hekla Eruption im Jahr 2000. Eingezeichnet ist auch der Untersuchungsstandort nahe der Hekla (Quelle: Flaathen & Gislason, 2007, modifiziert).	21
Abbildung 11: Eyjafjallajökull, Mai 2012 (Foto: Camille Eichmann).	22
Abbildung 12: Gesamte Tephraablagerung während der Eruption vom 14. April – 22. Mai 2010. Die rote ausgezogene Linie bezeichnet die Ablagerungsmächtigkeit an Land und die geschätzte Ablagerungsmenge im Meer ist mit einer rote gestrichelten Linie eingezeichnet. Die Mächtigkeit der Tephra Ablagerung ist in cm angegeben (rote Ziffern). Als grüner Punkt eingezeichnet ist der Untersuchungsstandort am Eyjafjallajökull (Quelle: Gudmundsson, 2012, modifiziert).	23
Abbildung 13: Ozeanströme, welche das Klima Islands beträchtlich beeinflussen (Quelle: Universität Island).....	25
Abbildung 14: Jahresmitteltemperatur (1961 – 1990), Standorte: a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island, modifiziert).....	25
Abbildung 15: Mittlere Julitemperaturen (1961 – 1990), Standorte: a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island, modifiziert).....	26
Abbildung 16: Mittlere Januartemperaturen (1961 – 1990), Standorte: a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island, modifiziert).....	26
Abbildung 17: Mittlere Jährliche Niederschlagsverteilung für die Periode 1931-1960: 1: < 600 mm, 2: 600 – 1199 mm, 3: 1200 – 1999 mm, 4: 2000 – 3999 mm und 5: > 4000 mm. Standorte: a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island, modifiziert).....	27
Abbildung 18: Historische Karte Islands aus dem Jahr 1645. Es ist kein Wald auf dieser historischen Karte vermerkt (Quelle: http://commons.wikimedia.org , Original von Willem und Joan Blaeu).	29
Abbildung 19: <i>Betula pubescens</i> am Standort nahe dem Eyjafjallajökull (Foto: Camille Eichmann).	30
Abbildung 20: Karte Islands mit den drei Untersuchungsstandorten a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: National Land Survey of Iceland, modifiziert).	32
Abbildung 21: Standort Hekla, Feldarbeit Mai 2013 (Foto: Camille Eichmann).	32
Abbildung 22: Standort Eyjafjallajökull, Feldarbeit Mai 2013 (Foto: C. Eichmann).	33

Abbildung 23: Bodenkarte Islands mit den Standorten a) Hekla, b) Eyjafjallajökull und c) Vatnshornsskogur (Quelle: National Land Survey of Iceland, modifiziert).....	34
Abbildung 24: Kontrollstandort Vatnshornsskogur am Ufer des Skorradalvatn, nördlich von Reykjavik gelegen (Foto: Camille Eichmann).....	34
Abbildung 25: Ólafur Eggertsson (rechts) und Þorbergur Hjalti Jónsson (links) im Untersuchungsgebiet in der Nähe des Eyjafjallajökull unterwegs, Mai 2013 (Foto:Camille Eichmann).	36
Abbildung 26: Borhkernentnahme (Camille Eichmann) am Standort Eyjafjallajökull, Mai 2013 (Foto: Ólafur Eggertsson).	36
Abbildung 27: Zum Trocknen aufgereichte Stammscheiben und Bohrkern im <i>Guesthouse</i> (Foto: Camille Eichmann).	37
Abbildung 28: Klimadiagramm für Süd-Island, erstellt aus den Daten der meteorologischen Stationen Hæll und Hella.	47
Abbildung 29: Jahrringchronologien aller drei Standorte Hekla (rot), Eyjafjallajökull (grün) und Vatnshornsskogur (blau).	48
Abbildung 30: Jahrringchronologie für den Standort an der Hekla, bestehend aus neun Bäumen (H01, H04, H05, H09, H10, H18, H19, H20 und H21), dem Mittelwert und den als graue Balken eingezeichneten Eruptionsjahre der Hekla Vulkans (1947/48, 1970, 1980/81, 1991, 2000).	49
Abbildung 31: Jahrringchronologie für den Standort am Eyjafjallajökull, bestehend aus zehn Bäumen (E01, E02, E07, E09, E10, E11, E12, E14, E17 und E18), dem Mittelwert und als graue Balken eingezeichnet ist die Eruption des Eyjafjallajökulls im Jahr 2010.....	50
Abbildung 32: Jahrringchronologie für den Kontrollstandorts Vatnshornsskogur, bestehend aus neun Bäumen (V01, V02, V03, V04, V10, V17, V20, V23 und V24) und dem Mittelwert.....	51
Abbildung 33: Jahre mit <i>missing rings</i> , Standort Hekla. Je grösser das blaue Viereck, desto mehr Bäume zeigten diesen fehlenden Jahrring.	55
Abbildung 34: Jahre mit <i>missing rings</i> , Standort Eyjafjallajökull. Je grösser das blaue Viereck, desto mehr Bäume zeigten diesen fehlenden Jahrring.	56
Abbildung 35: Jahre mit <i>missing rings</i> , Standort Vatnshornsskogur. Je grösser das blaue Viereck, desto mehr Bäume zeigten diesen fehlenden Jahrring.	57
Abbildung 36: Analysen der Temperatur und der Jahrringbreite, mit der Software Dendroclim 2002 für die Standorte Hekla, Eyjafjallajökull und Vatnshornsskogur. Monate, die eine signifikante Korrelation aufwiesen, sind mit schwarz eingefärbten Balken	

gekennzeichnet. Monate für die die Response Funktion signifikant ausfiel, sind durch ein rotes Viereck hervorgehoben.	58
Abbildung 37: Analysen der Niederschlagsmenge und der Jahrringbreite, mit der Software Dendroclim 2002 für die Standorte Hekla, Eyjafjallajökull und Vatnshornsskogur. Monate, die eine signifikante Korrelation aufwiesen, sind mit schwarz eingefärbten Balken gekennzeichnet. Monate für die die Response Funktion signifikant ausfiel, sind durch ein weisses Viereck hervorgehoben.....	59
Abbildung 38: Gemittelte Juni – August Temperaturen, Daten von den beiden meteorologischen Stationen Hæll (blaue Kurve) und Hella (rote Kurve), beide liegen im Süden Islands.	61
Abbildung 39: Niederschlagsmengen für den Monat April, mit den Daten der meteorologischen Stationen Hella (1958 – 2004) im Süden Islands.	62
Abbildung 40: Auswertung der Isotopenmessungen, links: Werte der $\delta^{13}\text{C}$ und rechts: Werte der $\delta^{18}\text{O}$ Messung für die beiden Standorte Eyjafjallajökull (blau) und Vatnshornsskogur (rot), mit den Standardabweichungen.....	63
Abbildung 41: Auswertung der Isotopenmessungen von $\delta^{13}\text{C}$ für die beiden Standorte Eyjafjallajökull (links) und Vatnshornsskogur (rechts).....	64
Abbildung 42: Auswertung der Isotopenmessungen von $\delta^{18}\text{O}$ für die beiden Standorte Eyjafjallajökull (links) und Vatnshornsskogur (rechts).....	64
Abbildung 43: LA–ICP–MS Messung der Probe V04R, vom Standort Vatnshornsskogur, roter Balken markiert das Ausbruchsjahr 2010. Die Kurven der einzelnen Elemente zeigt das Verhältnis des gemessenen Elements zum ^{13}C (Quelle: Andrea Mancini).	66
Abbildung 44: LA–ICP–MS Messung der Probe E11R, vom Standort Eyjafjallajökull, roter Balken markiert das Ausbruchsjahr 2010. Die Kurven der einzelnen Elemente zeigt das Verhältnis des gemessenen Elements zum ^{13}C (Quelle: Andrea Mancini).	67
Abbildung 45: Verlauf der Niederschlagsmengen für den Monat April (meteorologische Station Hella) für die Jahre 1958 - 2004. Die grünen Balken markieren die Ausbruchsjahre des Vulkans Hekla.	71
Abbildung 46: Die Jahrringbreiten für den Standort Hekla mit positiven Weiser Jahre (grün) und negativen Weiser Jahre (rot) zusammen mit den Temperaturen (Jun - Aug) und dessen Maximalwerten (hohe Temperatur: orange, tiefe Temperatur blau).....	71
Abbildung 47: Die Jahrringbreiten für den Standort Eyjafjallajökull mit positiven Weiser Jahre (grün) und negativen Weiser Jahre (rot) zusammen mit den Temperaturen (Jun - Aug) und dessen Maximalwerten (hohe Temperatur: orange, tiefe Temperatur blau).	72

Abbildung 48: Die Jahrringbreiten für den Standort Vatnshornsskogur mit positiven Weiser Jahre (grün) und negativen Weiser Jahre (rot) zusammen mit den Temperaturen (Jun - Aug) und dessen Maximalwerten (hohe Temperatur: orange, tiefe Temperatur blau). 72	
Abbildung 49: Der Temperaturverlauf (Jun – Aug) für den Abschnitt der vulkanischen Aktivität der beiden Vulkane Hekla und Eyjafjallajökull. 76	
Abbildung 50: Verlauf der Temperatur (Jun – Aug) mit den Niederschlagsmengen (Monat April) von 1958 – 2004. Die Ausbruchsjahre der Hekla (1970, 1980 / 81, 1991 und 2000) sind als grüne Balken mit den schwarzen Pfeilen markiert..... 76	
Abbildung 51: Jahrringbreiten des Standorts Eyjafjallajökull, zusammen mit den Niederschlagsmengen (Monat April) für die Jahre 1958 – 2004..... 77	
Abbildung 52: Jahrringbreiten des Standorts Hekla, zusammen mit den Niederschlagsmengen (Monat April) für die Jahre 1958 – 2004..... 77	
Abbildung 53: Jahrringbreiten des Standorts Vatnshornsskogur, zusammen mit den Niederschlagsmengen (Monat April) für die Jahre 1958 - 2004. 77	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sonnenscheindauer und Sonnenstand für Island, als Vergleich jene Werte für Zürich (Quelle: Einarsson, M. A. 1984, map.geo.admin.ch, www.timeanddate.com)...	24
Tabelle 2: Klimatische Kennzahlen des Standortes an der Hekla (Quelle: Universität Island).	28
Tabelle 3: Klimatische Kennzahlen des Standortes am Eyjafjallajökull (Quelle: Universität Island).	28
Tabelle 4: Klimatische Kennzahlen des Standortes Vatnshornsskogur (Quelle: Universität Island).	28
Tabelle 5: Anzahl Proben am jeweiligen Standort.....	35
Tabelle 6: Überlappende Jahre (OVL), Gleichläufigkeit (Glk), Signatur der Gleichläufigkeit (GSL) und Cross Date Index (CDI) für die Messungen für die Standorte Hekla (H01L bis H21R) Eyjafjallajökull (E01L bis E18R) und Vatnshornsskogur (V01L bis V24R). Die Buchstaben L und R bezeichnen zwei verschiedene Radian desselben Baumes. Die Werte beziehen sich jeweils auf die Mittelkurve der Messungen des jeweiligen Standortes.....	52
Tabelle 7: Jahre mit sogenannten Weiser Jahren für die drei Untersuchungsstandorte (Teil 1: 1925 – 1956). Jahre mit positivem Wachstum sind mit +1 (grün) markiert, jene mit negativem Wachstum mit -1 (rot) markiert. Die Eruptionsjahre des Vulkans Hekla sind dunkelgrau markiert.	53
Tabelle 8: Jahre mit sogenannten Weiser Jahren für die drei Untersuchungsstandorte (Teil 2: 1957 – 2012). Jahre mit positivem Wachstum sind mit +1 (grün) markiert, jene mit negativem Wachstum mit -1 (rot) markiert. Die Eruptionsjahre des Vulkans Hekla sind dunkelgrau, die Eruption des Eyjafjallajökull ist hellgrau markiert.	54
Tabelle 9: Eingefügte <i>missing rings</i> in der Baumringchronologie am Standort Hekla. L / R bezeichnet die zwei Radian links und rechts der Probe.....	55
Tabelle 10: Eingefügte <i>missing rings</i> in der Baum-ringchronologie am Standort Eyjafjallajökull. L / R bezeichnet die zwei Radian links und rechts der Probe.....	56
Tabelle 11: Eingefügte <i>missing rings</i> in der Baumringchronologie am Standort Vatnshornsskogur. L / R bezeichnet die zwei Radian links und rechts der Probe.....	57

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.

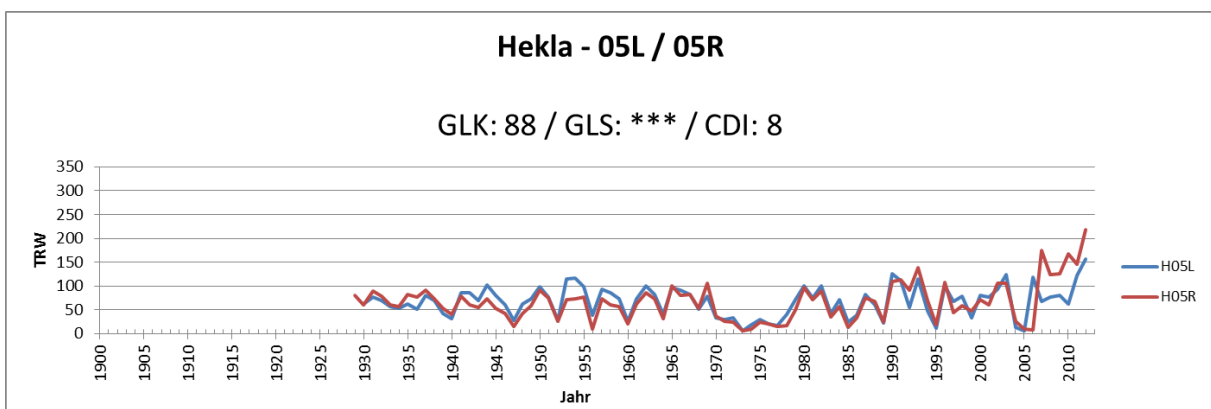
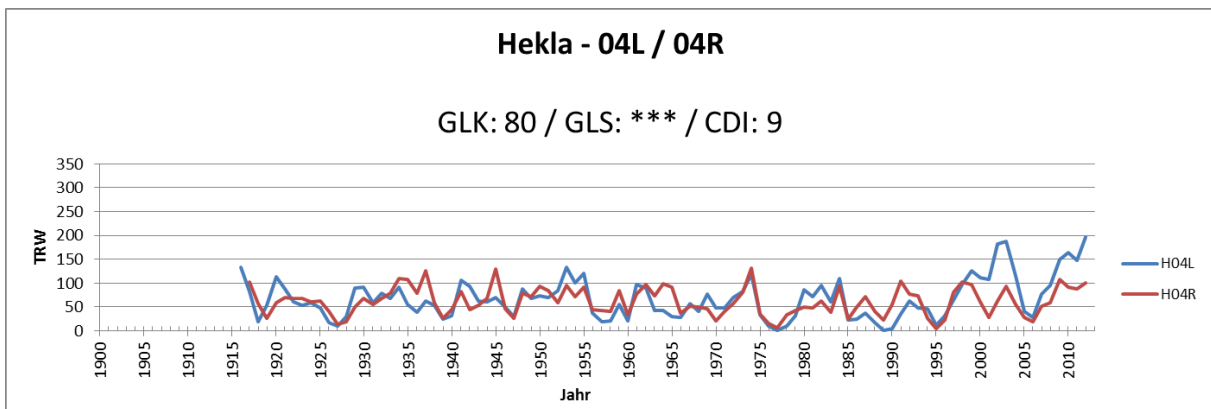
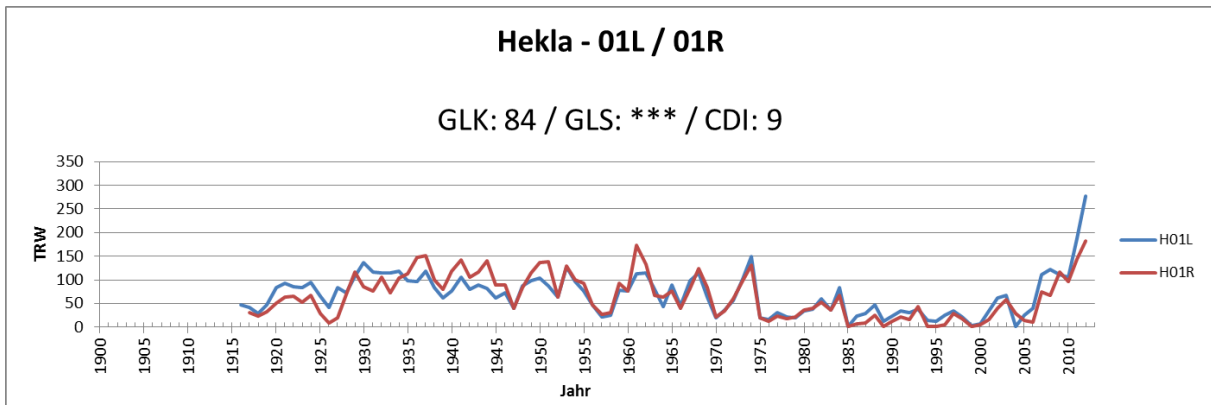
Camille Eichmann

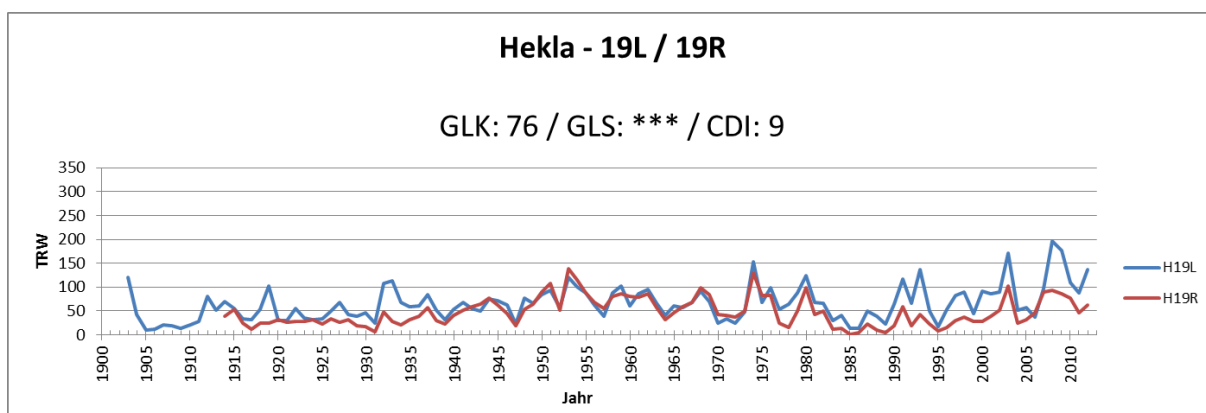
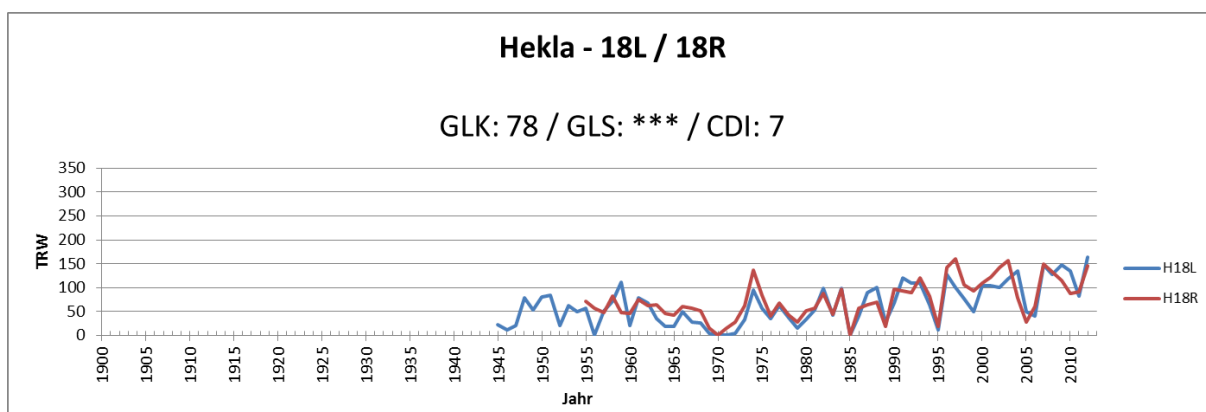
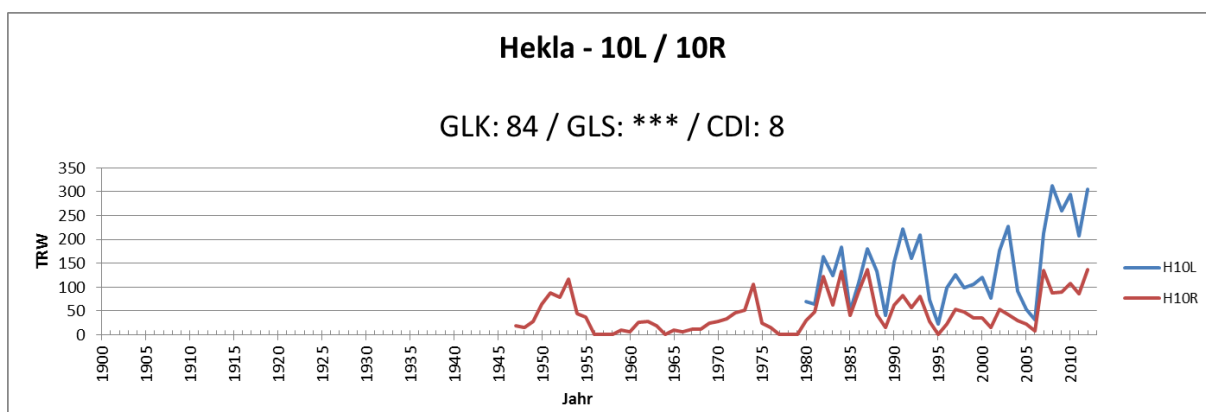
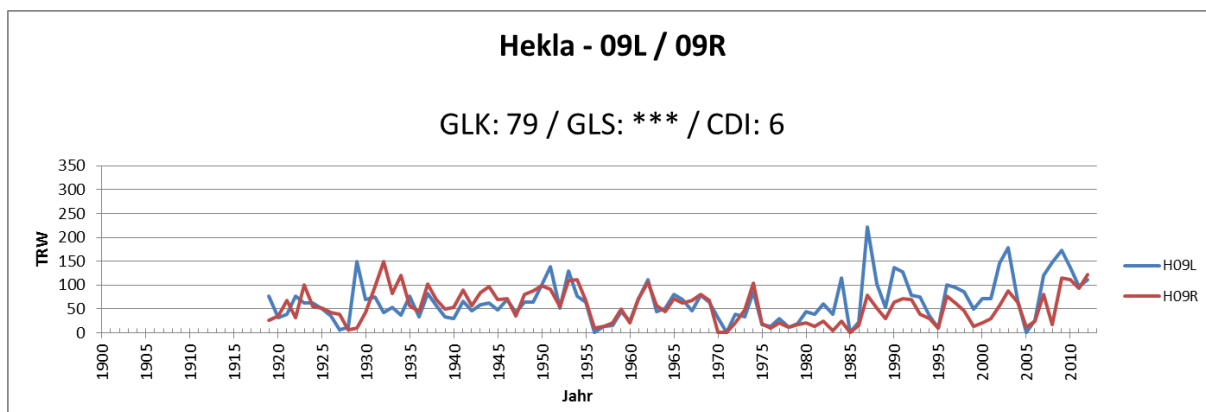
Zürich, 30.04.2014

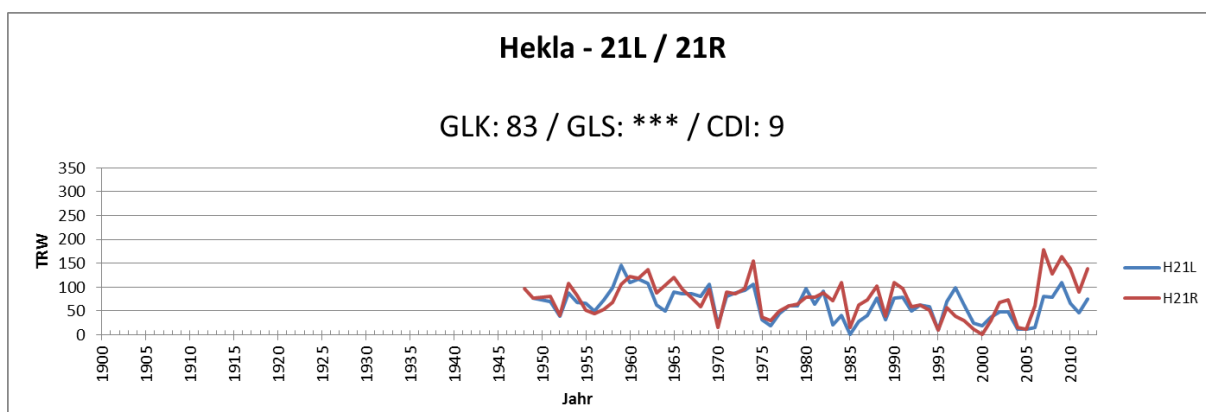
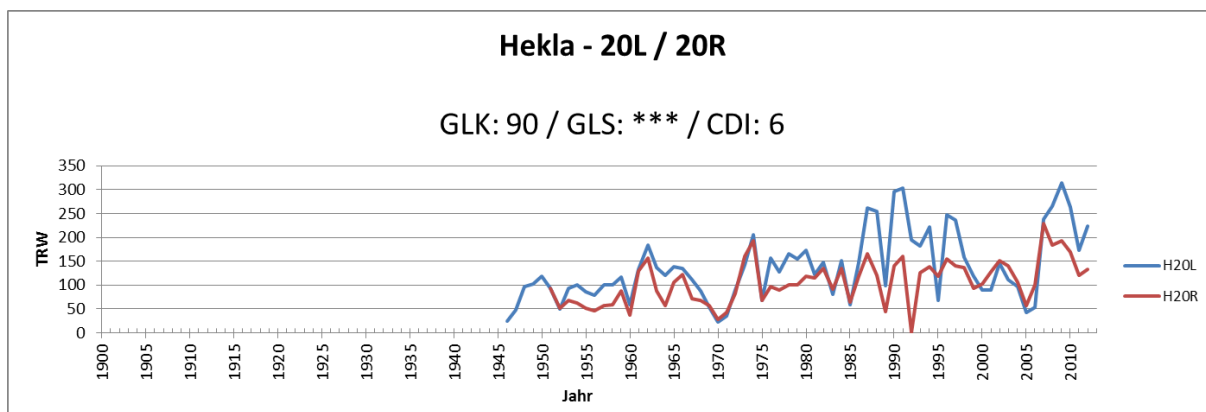
Anhang

Jahrringkurven der beiden Radien für jeden verwendeten Baum. Mit Angaben zur Gleichläufigkeit (GLK), Signifikantsniveau der Gleichläufigkeit (GLS) und Cross Date Index (CDI)

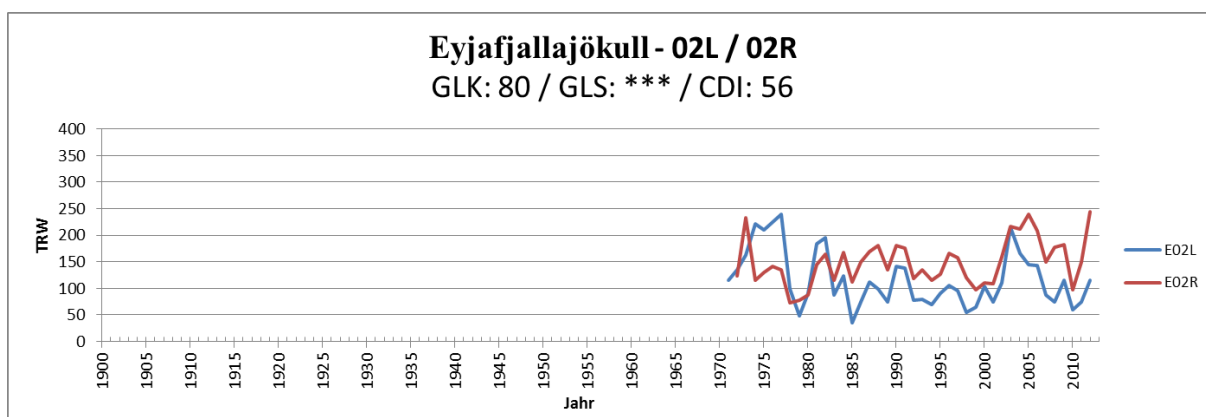
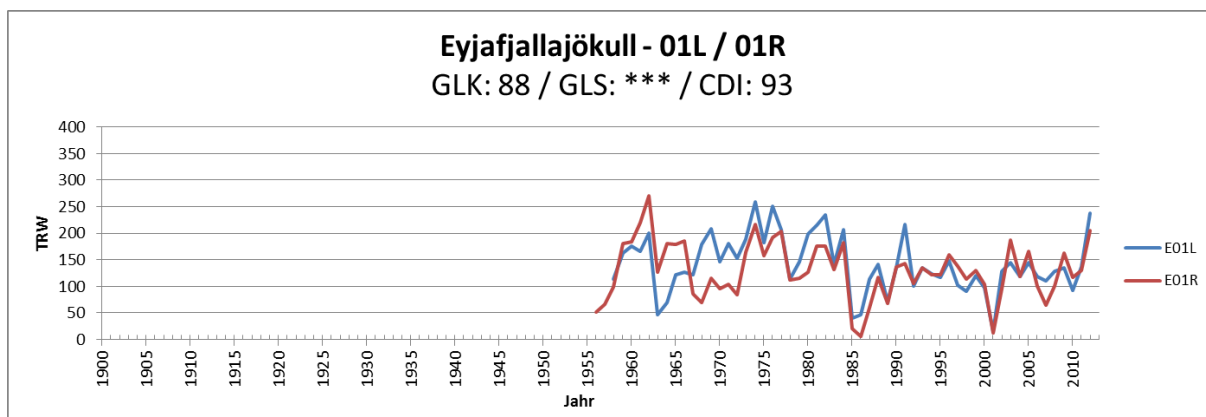
Standort Hekla:

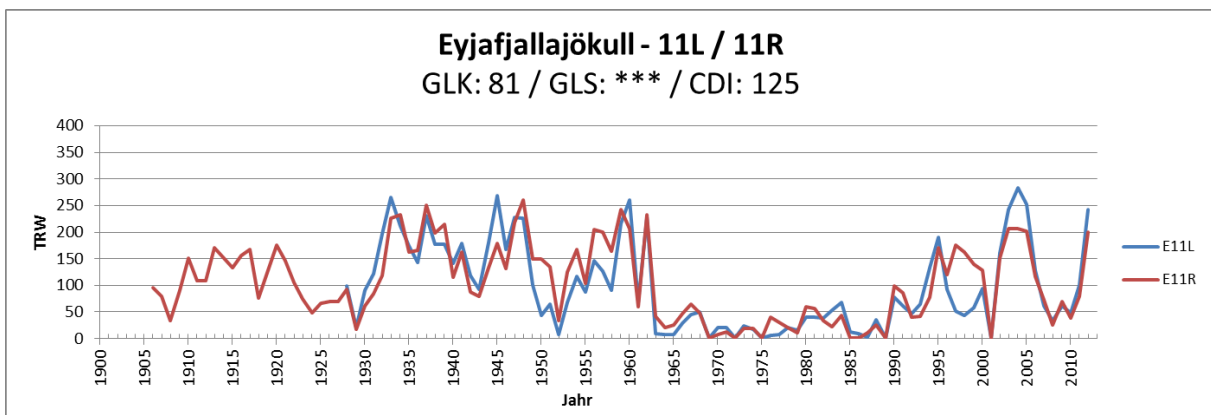
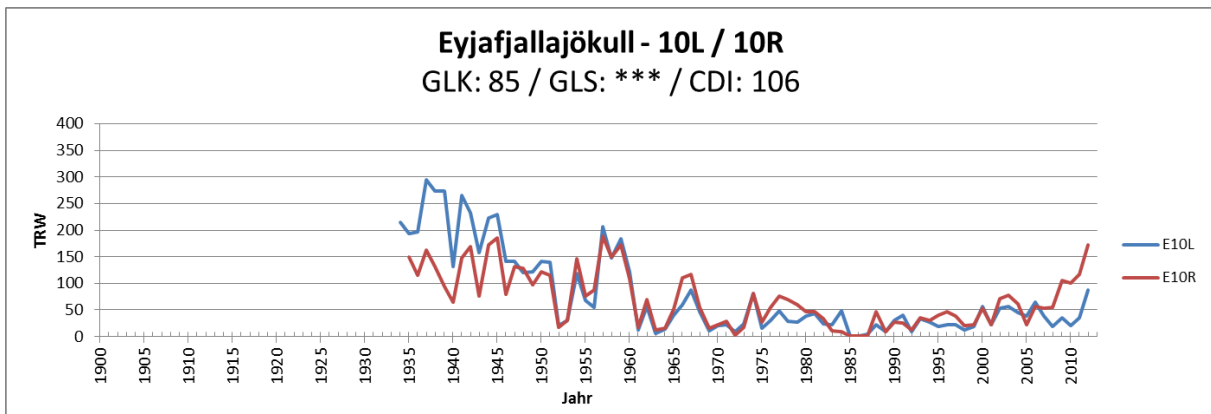
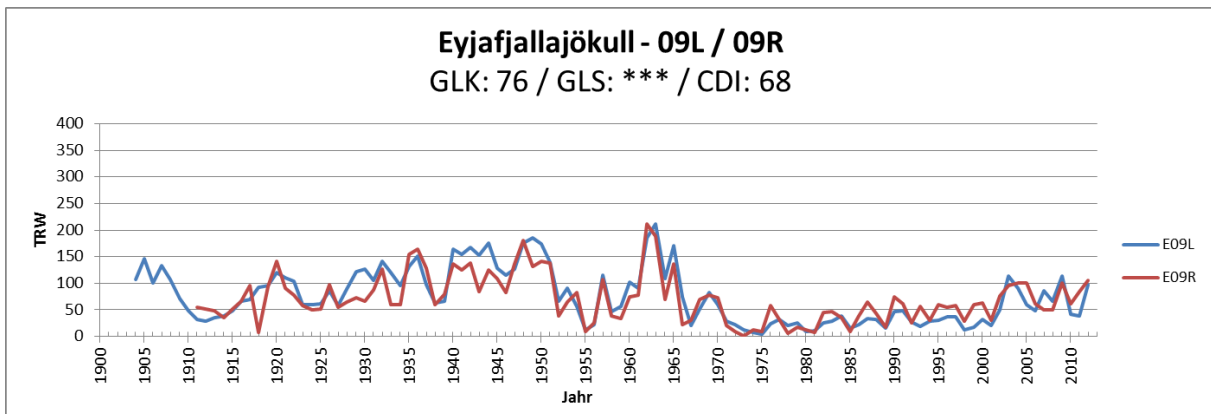
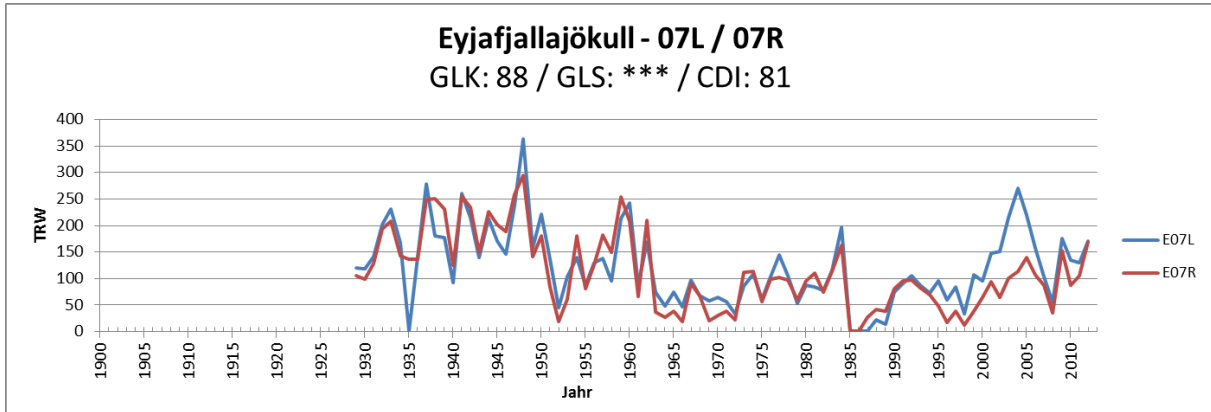


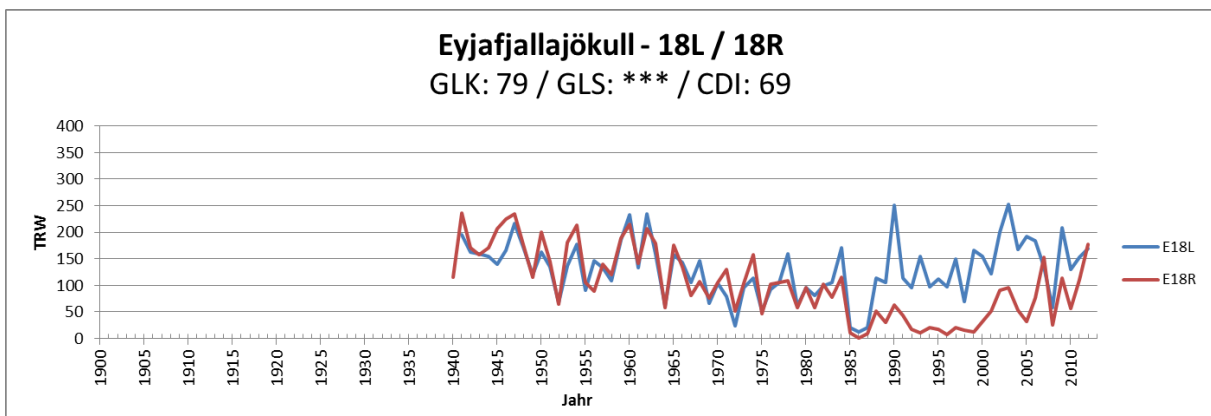
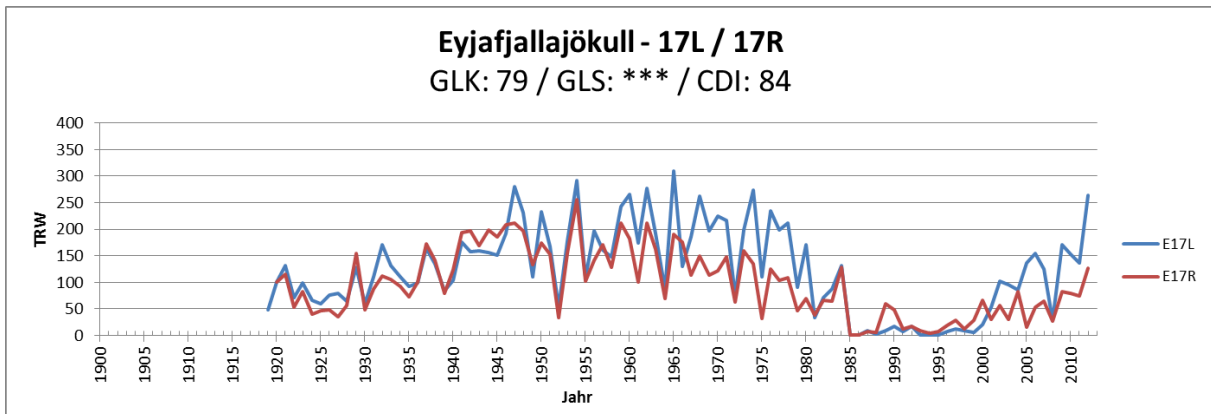
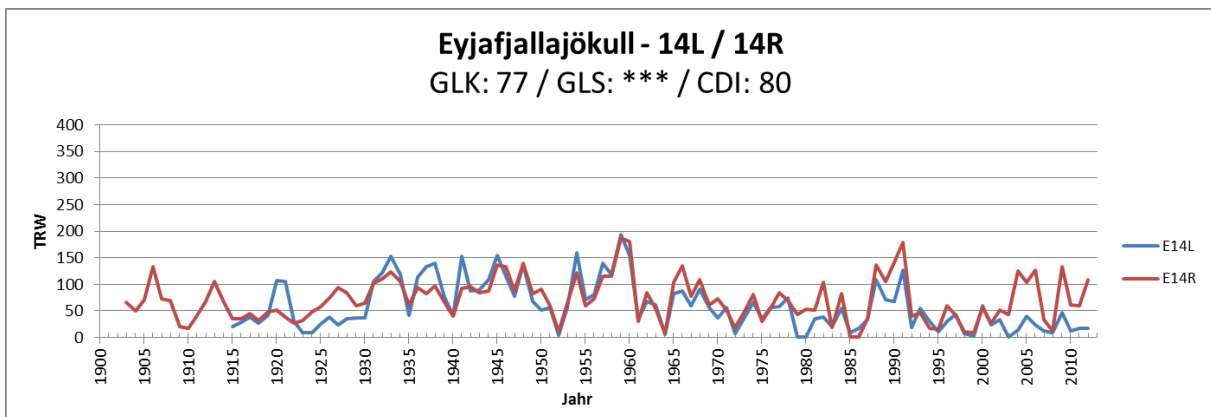
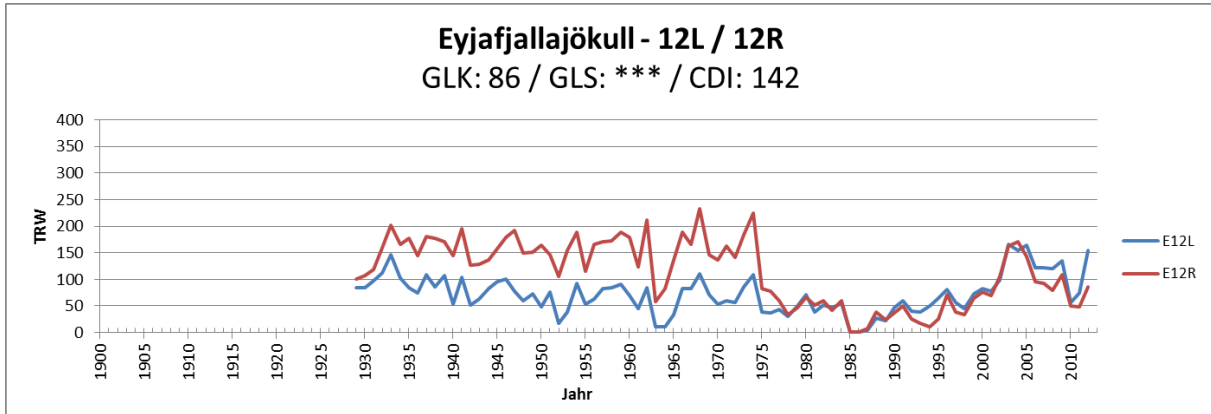




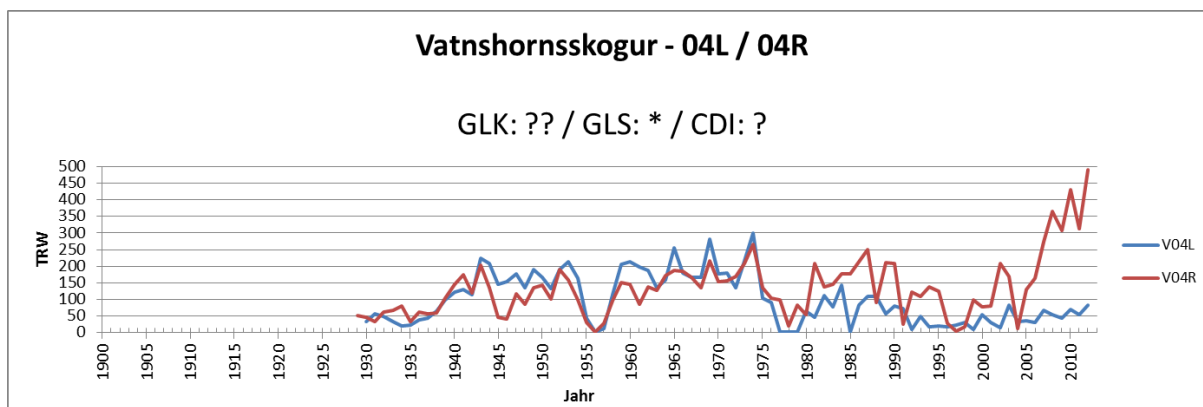
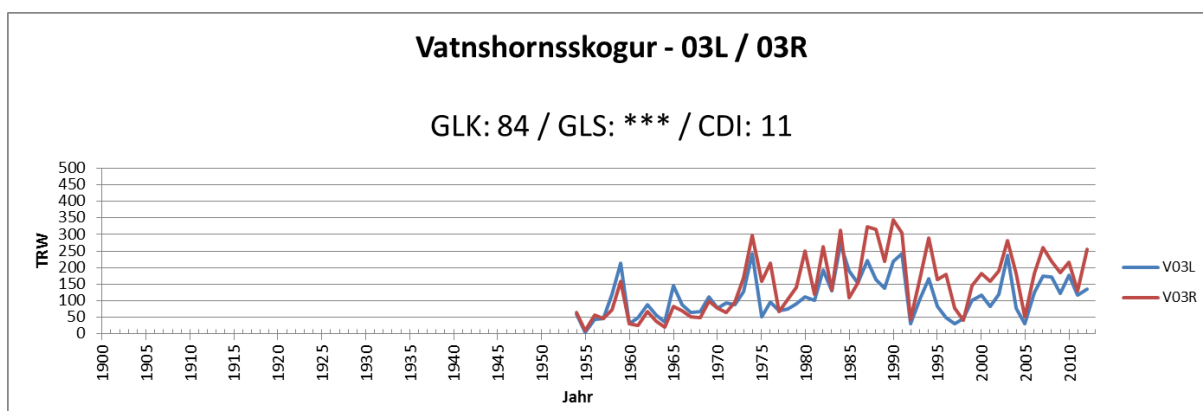
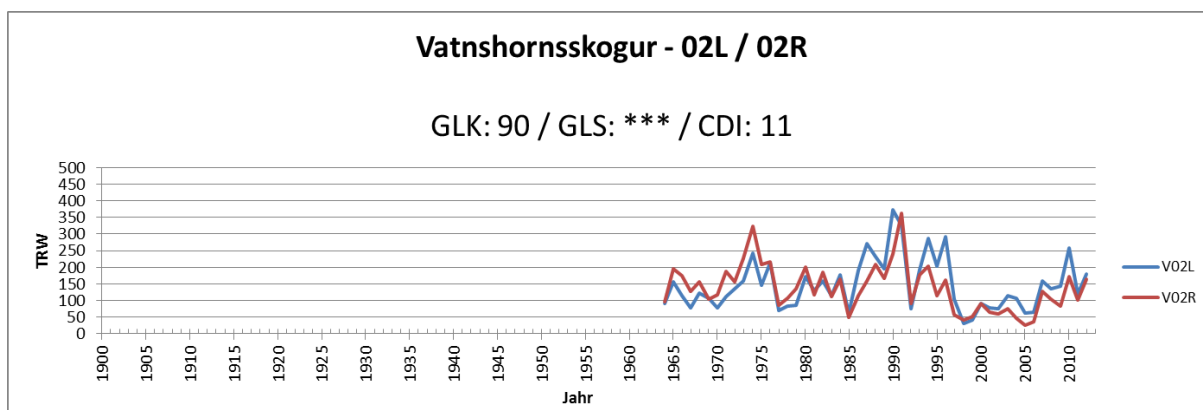
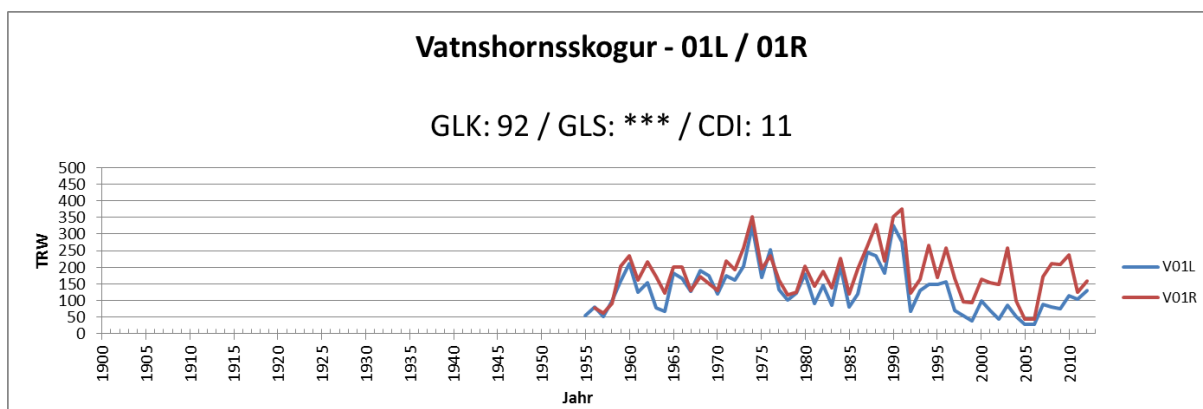
Standort Eyjafjallajökull:

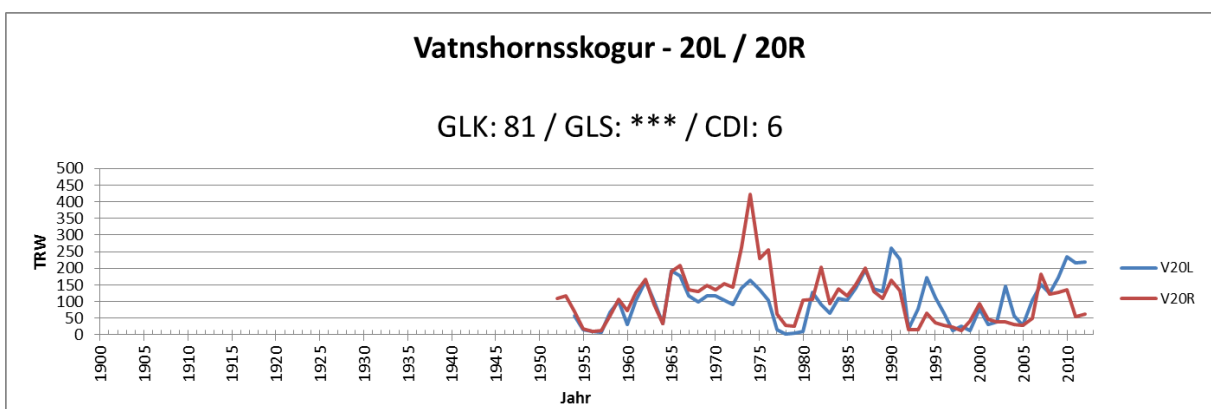
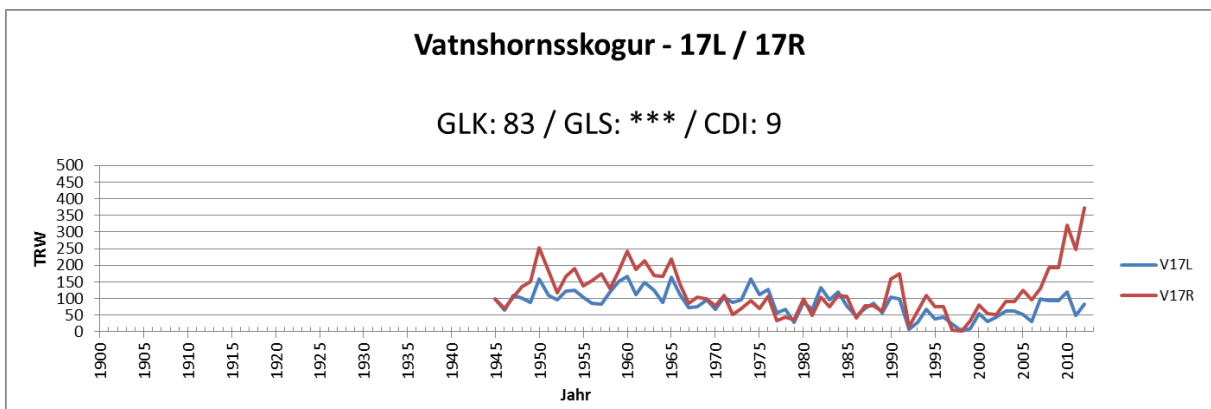
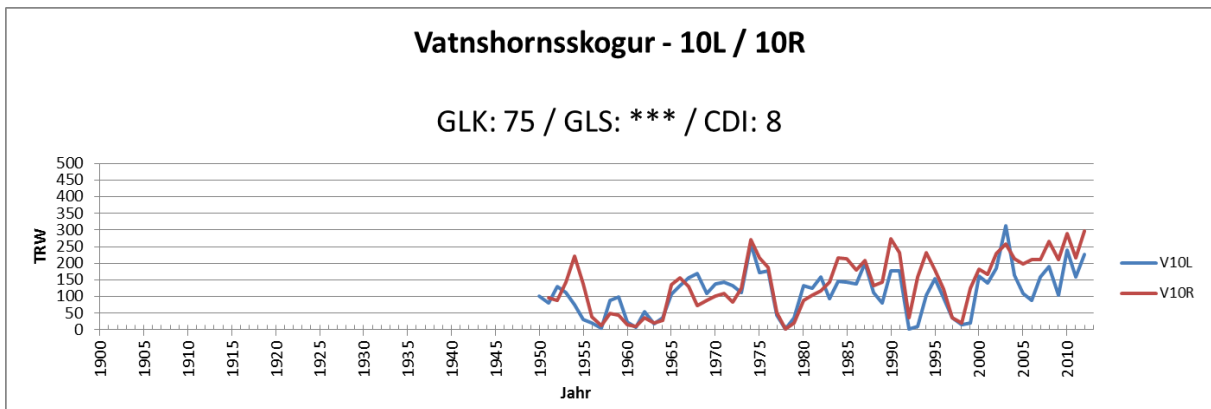
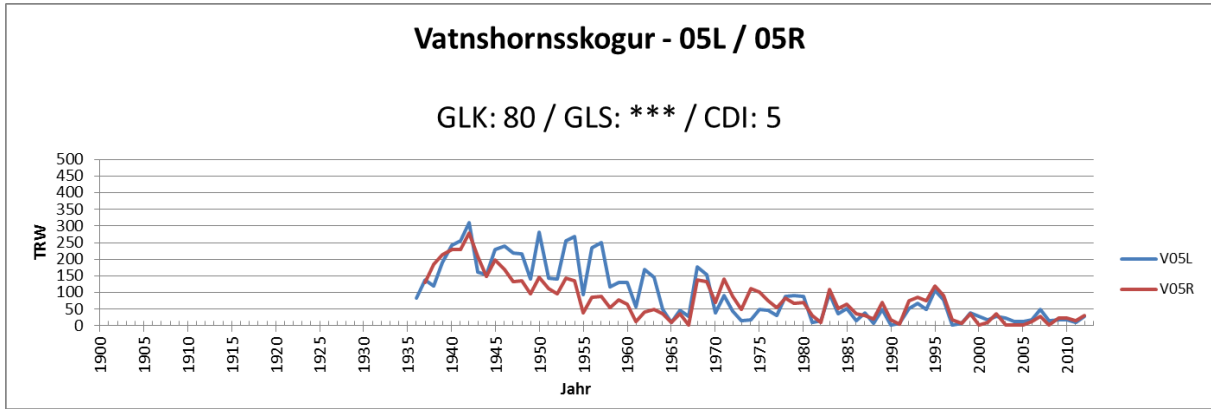


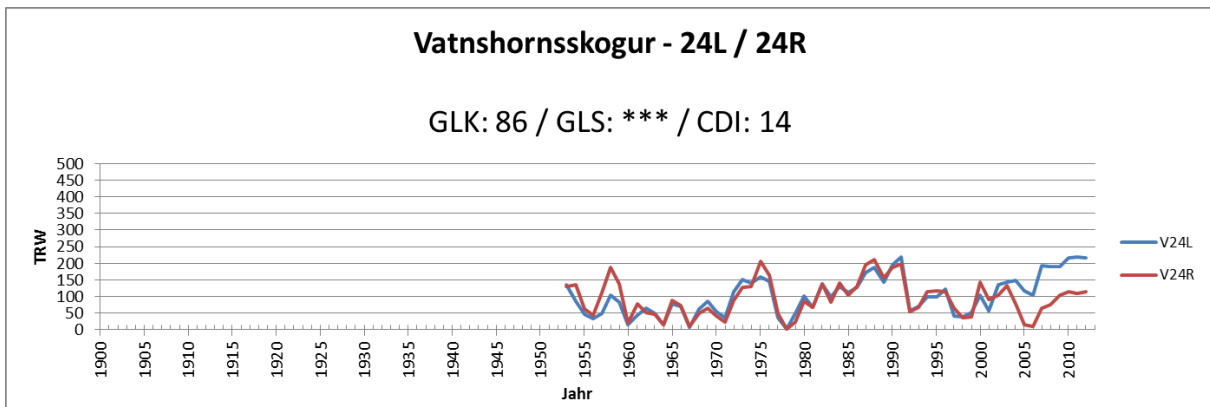
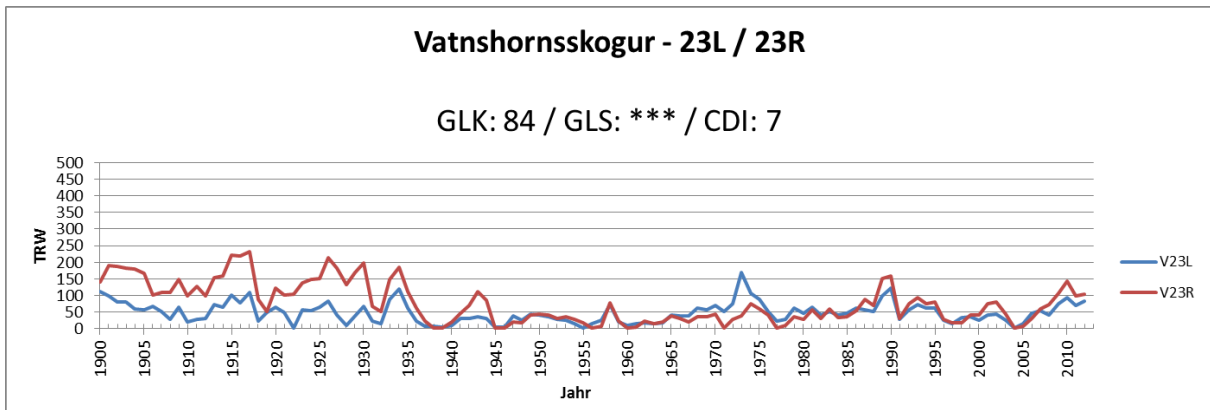




Standort Vatnshornsskogur:







MS-sample form- I							
				File:			
Name: Eichmann Camille Group: Dendroökologie Institute: WSL - Birmensdorf Experiment: Iceland Containment-ID:				Sample material: Wood/Cellulose 1.0–1.2 mg Sampling date: Juni 2013 Weighing date: 21.01.2014 Measurement date: Isotope: (¹⁸ O)			
PCA-pos	Line	Probe	Weight	PCA-pos	Line	Probe	Weight
A 1	1	Standard Merck	1.017	C 1	25	23	1.056
2	2	Standard Merck	1.128	2	26	26	1.088
3	3	Standard Merck	1.169	3	27	Standard Merck	1.041
4	4	Standard Merck	1.069	4	28	27	1.179
5	5	Standard Merck	1.195	5	29	31	1.066
6	6	1	1.116	6	30	32	1.049
7	7	2	1.083	7	31	37	1.069
8	8	3	1.075	8	32	39	1.037
9	9	4	1.117	9	33	40	1.086
10	10	5	1.087	10	34	41	1.015
11	11	6	1.145	11	35	42	1.173
12	12	7	1.110	12	36	43	1.044
B 1	13	8	1.036	D 1	37	44	1.105
2	14	9	1.097	2	38	Standard Merck	1.197
3	15	10	1.155	3	39	45	1.188
4	16	Standard Merck	1.184	4	40	46	1.043
5	17	11	1.183	5	41	47	1.070
6	18	12	1.040	6	42	48	1.021
7	19	13	1.090	7	43	49	1.136
8	20	16	1.026	8	44	Standard Merck	1.067
9	21	17	1.170	9	45	Standard Merck	1.119
10	22	18	1.199	10	46	Standard Merck	1.111
11	23	20	1.144	11	47	Standard Merck	0.544
12	24	21	1.035	12	48	Standard Merck	0.529

MS-sample form- II							
				File:			
Experiment: Containment-ID:				Weighing date: Measurement date:			
PCA- pos	Line	Probe	Weight	PCA- pos	Line	Probe	Weight
E 1	49	Standard Merck	0.558	G 1	73		
2	50	14	0.563	2	74		
3	51	15	0.535	3	75		
4	52	19	0.563	4	76		
5	53	22	0.479	5	77		
6	54	24	0.488	6	78		
7	55	25	0.564	7	79		
8	56	28	0.571	8	80		
9	57	29	0.472	9	81		
10	58	Standard Merck	0.504	10	82		
11	59	30	0.541	11	83		
12	60	33	0.491	12	84		
F 1	61	34	0.458	H 1	85		
2	62	35	0.466	2	86		
3	63	36	0.427	3	87		
4	64	38	0.422	4	88	Standard Merck	
5	65	50	0.566	5	89		
6	66	Standard Merck	0.544	6	90		
7	67	Standard Merck	0.529	7	91		
8	68	Standard Merck	0.558	8	92		
9	69			9	93		
10	70			10	94	Standard Merck	
11	71			11	95	Standard Merck	
12	72			12	96	Standard Merck	

MS-Einwaageblatt- I							
				File:			
Name: Eichmann Camille Gruppe: Dendroökologie Institut: WSL - Birmensdorf Experiment: Iceland Behälter-Bezeichnung:				Probenmaterial: Betula - Celulose (0.4–0.6 mg) Sammeldatum: Juni 2013 Datum Einwaage: 24.1.2014 Datum Messung: zu bestimmende Isotope: 13C			
	Linie	Probe	Einwaage		Linie	Probe	Einwaage
A 1	1	Standard org.	0.526	C 1	25	22	0.595
2	2	Standard org.	0.575	2	26	23	0.542
3	3	Standard org.	0.501	3	27	24	0.542
4	4	1	0.535	4	28	25	0.600
5	5	2	0.450	5	29	26	0.516
6	6	3	0.475	6	30	27	0.537
7	7	4	0.515	7	31	28	0.543
8	8	5	0.520	8	32	29	0.515
9	9	6	0.543	9	33	Standard org.	0.497
10	10	7	0.506	10	34	30	0.462
11	11	8	0.539	11	35	31	0.599
12	12	9	0.487	12	36	32	0.483
B 1	13	Standard org.	0.536	D 1	37	33	0.410
2	14	10	0.576	2	38	34	0.510
3	15	11	0.573	3	39	36	0.450
4	16	13	0.590	4	40	37	0.599
5	17	14	0.532	5	41	40	0.588
6	18	16	0.603	6	42	41	0.603
7	19	17	0.523	7	43	Standard org.	0.443
8	20	18	0.545	8	44	42	0.548
9	21	19	0.471	9	45	43	0.595
10	22	20	0.605	10	46	44	0.559
11	23	Standard org.	0.537	11	47	45	0.581
12	24	21	0.590	12	48	46	0.544

MS-Einwaageblatt- II							
				File:			
Fortsetzung von Blatt I Behälter-Bezeichnung:				Datum Einwaage: Datum Messung:			
	Linie	Probe	Einwaage		Linie	Probe	Einwaage
E 1	49	47	0.517	G 1	73	Standard org.	
2	50	48	0.597	2	74		
3	51	49	0.543	3	75		
4	52	50	0.569	4	76		
5	53	Standard org.	0.531	5	77		
6	54	Standard org.	0.442	6	78		
7	55	Standard org.	0.593	7	79		
8	56	Standard org.	0.180	8	80		
9	57	Standard org.	0.178	9	81		
10	58	Standard org.	0.183	10	82		
11	59	12	0.199	11	83	Standard org.	
12	60	15	0.182	12	84		
F 1	61	35	0.204	H 1	85		
2	62	38	0.194	2	86		
3	63	39	0.201	3	87		
4	64	Standard org.	0.170	4	88		
5	65	Standard org.	0.174	5	89		
6	66	Standard org.	0.188	6	90		
7	67			7	91		
8	68			8	92	Standard org.	
9	69			9	93	Standard org.	
10	70			10	94	Standard org.	
11	71			11	95	Quality control St.	
12	72			12	96	Quality control St.	