

# Mechanische Stabilität von Bäumen im Dischmatal (Davos)

## Artenspezifische Auswirkungen des Höhengradienten und erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft

Masterarbeit  
von  
**Roland Mende**

Zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur der  
Alpinen Naturgefahren (Dipl.-Ing)



**Erstprüfer:**

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hübl  
Institut für Alpine Naturgefahren  
Department für Bautechnik und Naturgefahren

**Zweitprüfer:**

Dr. Peter Bebi  
Eidg. Institut für Schnee- und  
Lawinenforschung Davos (SLF)

eingereicht im Januar, 2013

Institut für Alpine Naturgefahren

Department für Bautechnik und Naturgefahren

der Universität für Bodenkultur Wien

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	4
Zusammenfassung .....	5
Abstract .....	7
Abbildungsverzeichnis .....	9
Tabellenverzeichnis .....	10
1 Einleitung.....	11
1.1 Ziellsetzung und Forschungsfragen.....	11
2 Stand des Wissens .....	14
2.1 Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren.....	14
2.2 Auswirkung des Klimawandels an der Waldgrenze .....	14
2.3 Elastizitätsmodul und Baumstabilität .....	15
2.4 Baumwachstum und Auswirkung auf die Holzeigenschaften in den alpinen Höhenstufen .....	16
2.5 Einfluss von CO <sub>2</sub> auf Baumwachstum und Holzeigenschaften.....	17
2.6 Stabilität von Waldgrenzbäumen-Begriffserklärung.....	18
2.6.1 Belastung durch Schnee.....	18
2.6.2 Belastung durch eine Lawine.....	20
2.6.3 Belastung durch einen Steinschlag.....	20
2.6.4 Belastung durch Wind .....	21
3 Material und Methoden .....	23
3.1 Untersuchungsgebiet .....	23
3.1.1 Standortfaktoren Untersuchungsgebiet .....	23
3.1.2 Versuchsaufbau CO <sub>2</sub> Begasung und Erwärmung .....	24
3.2 Feldarbeit .....	26
3.3 Vorbereitung und Sägen des Holzes .....	28
3.3.1 Holz Trocknung und Messung der Holzfeuchte .....	29
3.3.2 Abmessung der Holzprobe und Holzdicke .....	29
3.3.3 Bestimmung der Ästigkeit .....	30
3.3.4 Bestimmung der mittleren Jahrringbreite .....	30
3.3.5 Bestimmung der Faserabweichung .....	31

3.4	Durchführung der Biegeversuche: .....	32
3.5	Statik und Materialkennwerte der Holzproben .....	33
3.6	Statistische Analysen.....	36
4	Ergebnisse .....	39
4.1	Einflüsse der Variablen aus den Biegeversuchen .....	39
4.2	Kennwerte der mechanischen Holzeigenschaften.....	41
4.3	Einfluss des CO <sub>2</sub> .....	42
4.4	Einfluss der Höhenstufen.....	45
4.5	Bergföhre und Lärche .....	50
4.6	Mechanische Eigenschaften in den unterschiedlichen Höhen eines Baumes .....	50
4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	51
5	Diskussion.....	52
5.1	Korrelationen der Variablen .....	52
5.3	Einfluss von experimentell erhöhten CO <sub>2</sub> Konzentrationen und Temperaturen .....	54
5.4	Einfluss des Höhengradienten.....	55
5.5	Baumartenvergleich.....	56
5.6	Bedeutung für die Schutzwälder der Zukunft .....	57
5.7	Diskussion der Methodik .....	58
6	Schlussfolgerung .....	60
7	Ausblick.....	62
8	Literaturverzeichnis.....	63
9	Anhang.....	71
9.1	Modelle zur Berechnung der Schneedrucke am Stillberg .....	71
9.2	Veränderung der Lufttemperatur und Schneeschmelze im Untersuchungsgebiet .....	73
9.3	Residuenanalyse der Kovarianzmodelle.....	74
9.4	Abweichung der mechanischen Eigenschaften innerhalb eines Baumes .....	76
9.5	Beispiel für den Output eines Kovarianzmodells in R .....	76

## Danksagung

Mein Dank gilt zahlreichen Personen, die mich während meiner Arbeit an der Diplomarbeit unterstützt haben. Zunächst möchte ich mich bei Univ. Prof. Dr. DI. Johannes Hübl bedanken, der mir während der Arbeit immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Außerdem möchte ich mich ganz herzlich für die sehr gute Betreuung von Dr. Peter Bebi bedanken, der mich mit zahlreichen Ideen und Kritik unterstützte und mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Arbeit am Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos zu schreiben.

Bei Peter Bebi, Melissa Dawes, Patrick Fonti, Christian Rixen, Alba Anadon Rosell, Albena Ivanova, Adele Ferrari und Jonas Schwaab möchte ich mich für die großartige Hilfe, Zusammenarbeit, Unterstützung, und das entspannte Leben in der kleinen Berghütte am Stillberg bedanken. Das Entnadeln, Fällen und Tragen der Bäume sowie das Ausgraben der Wurzeln haben in dieser Gruppe viel Freude bereitet und bleiben unvergessen.

In Birmensdorf möchte ich mich beim Schreiner Walter Godli bedanken, der beim Zusägen der Proben super Arbeit geleistet hat, sich sehr viel Zeit genommen hat und mir mit Tipps bei der Holzbearbeitung und Trocknung zur Seite stand.

Ausserdem danke ich Werner Gerber und Christian Rickli für die Einweisung und die Betreuung der technischen Anlage an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in Birmensdorf. Vielen Dank besonders für die schnelle Hilfe, wenn eine der Maschinen einmal streikte.

Weiterer Dank gilt Melissa Dawes, die mir bei statistischen Problemen in R immer weiterhalf und mir viele Fragen rund um meine Analysen beantwortete. Ein großer Dank gilt auch Frank Graf der mir R von Grund auf erklärte und mir vor allem bei der graphischen Darstellung meiner Ergebnisse immer eine große Hilfe war.

Zum Schluss gilt mein Dank natürlich noch meiner Familie und vor allem meinen Eltern für all die vielen Dinge, die zum Gelingen meiner Arbeit und meines Studiums beigetragen haben.

Besonders gefallen hat mir in meiner sehr lehrreichen Zeit am SLF in der Schweiz natürlich auch die Arbeitsatmosphäre sowie die gemeinsame Freizeitgestaltung in der Landschaft rund um Davos. Darum möchte ich mich zum Schluss auch bei allen Mitarbeitern und Freunden am SLF für die schöne Zeit bedanken.

## Zusammenfassung

Mechanische Einwirkungen durch Naturprozesse wie Schneedruck, Steinschlag, Wind, und Lawinen, haben Einfluss auf die Ausdehnung und das Wachstum des Gebirgswaldes. Gleichzeitig beeinflusst oder verhindert der Wald die Naturprozesse und dient so dem Schutz der Bevölkerung. Die mechanische Stabilität des Holzes ist ein wesentlicher Einflussfaktor in dieser Interaktion zwischen dem Baum und den verschiedenen Prozessen. Die Daten für die Analyse der mechanischen Stammeigenschaften von Bäumen aus dem Dischmatal bei Davos wurden mit Hilfe von 3 Punkt Biegeversuchen gewonnen. Die 180x10x10mm grossen Holzproben stammen aus vier verschiedenen Höhenstufen von 1700 bis über 2200 m. ü. M.. Jeweils ausgesägt aus dem Splintholzbereich von 30cm-50cm langen Stammabschnitten. Sie sind aufgeteilt auf die 3 Baumarten *Larix decidua*, *Picea abies* und *Pinus uncinata*. Dies ermöglicht eine artenspezifische Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Bäume in den verschiedenen Höhenlagen. In der oberen Höhenstufe 150m über der aktuellen Waldgrenze stammen die Proben zur Hälfte aus 9 Jahren mit  $CO_2$  (+200 ppm) begasten Lärchen und Bergföhren. Parallel wurde bei der Hälfte der Bäume zusätzlich die Bodentemperatur erhöht. Dadurch können zusätzlich die mechanischen Eigenschaften des Holzes in einem Klima untersucht werden, wie es für das Dischmatal im Jahr 2050 erwartet wird. Die 121 Holzproben wurden nach DIN 52180-6 bearbeitet und bis zum Bruch belastet. Aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven der Messungen konnte das Elastizitätsmodul, die Biegefestigkeit, die maximale Dehnung und die Elastizitätsgrenzen berechnet werden. Für die Auswertung der Daten wurden multivariate Kovarianzmodelle verwendet. Die Werte der Holzdicke, Jahrringbreite, Holzfeuchte, Faserabweichung und Astigkeit wurden dafür von jeder Holzprobe bestimmt. Zusätzlich wurden die Koordinaten, die Höhe des Baums, das Alter und der Durchmesser des Abschnitts beim Fällen vermerkt. Die Einflüsse dieser Variablen auf die mechanischen Eigenschaften wurde in den Modellen berücksichtigt.

Experimentell mit zusätzlichem  $CO_2$  begaste Lärchen wiesen signifikant höhere Werte der maximalen Dehnung auf. Sie zeigten auch tendenziell höhere Werte für Biegefestigkeit, Jahrringbreite, und E-Modul im Vergleich zu den nicht begasten Kontrollbäumen. Auf die Holzdicke war kein Einfluss durch die erhöhten  $CO_2$ -Konzentrationen festzustellen. Erhöhte Temperaturen hatte keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes. Die mechanischen Eigenschaften des Holzes können also in Zukunft durch die veränderten Umweltbedingen beeinflusst werden. Die untersuchten Lärchen bildet einen stabileren Stamm aus. Sie sind damit in der Lage, in Kombination mit dem höheren Wachstum durch das  $CO_2$ , schneller stabilere Bestände zu bilden. Die Höhenlage hat signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Das E Modul und die Biegefestigkeit fallen mit steigender Höhe während die Dehnbarkeit steigt. Die Elastizitätsgrenze der Spannung fällt mit der Höhe, gleichzeitig steigt die der Dehnung an. Das bedeutet, die Bäume können den äusseren Einflüssen weniger Widerstand leisten, dafür lassen sie sich aber weiter biegen bis es zu irreversiblen Schäden im Stamm kommt. Die Prozesse wie Schneedruck und Steinschlag stellen andere Anforderungen an das Holz und haben in den Höhenstufen unterschiedliche Bedeutung. Die veränderten mechanischen Eigenschaften können somit Anpassung an z.B. einen steigenden Schneedruck mit der Meereshöhe sein.

Die drei untersuchten Baumarten zeigen sehr unterschiedliche mechanische Holzeigenschaften. Das Holz der Fichte weist im Verhältnis zur Lärche eine geringere Stabilität auf. Es zeigt bei geringerer Dehnung eine irreversible Verformung, die maximal mögliche Spannung ist geringer und das E Modul und damit der Widerstand gegen Verformung ist ebenfalls niedriger. Die Lärche hält den höheren Kräfte stand und besitzt ein flexibleres Holz. Sie ist damit insgesamt besser an die mechanischen Einwirkungen in schneereichen Lagen angepasst als die Fichte. Die Bergföhre reagiert anders auf äussere Umwelteinflüsse, sie zeigt den geringsten Widerstand gegen Verformung und die geringste Festigkeit dafür aber das grösste Dehnungsvermögen. Eigenschaften, die vor allem an der schneereichen Waldgrenze von Vorteil sein können.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Kohlenstoffdioxid, *Larix decidua*, *Picea Abies*, *Pinus uncinata*, Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul, Höhengradient

## Abstract

Mechanical impacts caused by natural processes, such as weight of snow, rockfall, wind and avalanches, have an influence on the expansion and growth of mountain forests. At the same time, the forest affects or prevents the natural processes and therefore protects the residential area. The mechanical stability of the wood is an important factor in the interaction between the tree and the various processes. The data for the analysis of the mechanical properties of trees from the Dischmatal at Davos were obtained by 3 point bending tests. The 180 x 10 x 10 mm large wood samples were taken from four different altitudes from 1700 to 2200 m a. s. l. Each cut of the sapwood of 30 to 50cm long stem sections. They are divided among the 3 species: *Larix decidua*, *Picea abies* and *Pinus uncinata*. The highest samples were taken 150m above the current tree line, where half of the trees were treated in a free-air  $CO_2$ (+ 200 ppm) enrichment experiment. In addition to that, the soil in half of the trees was warmed. This allowed the mechanical properties of wood to be studied in a climate that is to be expected for the Dischmatal in 2050. The 121 wood samples were processed in accordance with DIN 52180-6 and loaded till failure. The modulus of elasticity, the modulus of rupture, the maximum elongation, and the limits of elasticity were then calculated out of the stress-strain curves of the measurements. For the analysis of the data, multivariate covariance models were used. The values of the wood density, tree-ring width, wood moisture, fiber deviation, and knots were determined for each of the samples. Additionally, the coordinates, the height of the tree, the age, and the diameter of the portion were noted during the cutting. The effects of these variables on the mechanical properties were also observed in the models.

Trees grown in a higher  $CO_2$  concentration show a significant higher maximum ductility. There is also a trend towards higher values for tree ring width, bending strength and modulus of elasticity. The mechanical properties of the trees may therefore be affected in the future by changing environmental conditions. The analyzed larch forms a more stable trunk, which, combination with the higher growth rates can form a stable forest stand in a shorter time. No influence on the wood density was observed with increased  $CO_2$  concentrations. Increased temperatures did not affect the mechanical properties of the wood. The altitude has significant influence on the mechanical properties. The modulus of elasticity and the bending strength fall with increasing altitude, while the ductility increases. The limit of elasticity for the strain increases with higher altitude. All of that applies to the spruce and the larch. This means that trees in a higher altitude show less resistance to external influences, but they have the capability to bend more until it comes to irreversible deformations in the stem. The processes, such as snow gliding and falling rocks, have a different impact on the wood. The importance of the processes changes with elevation, such as rising snow pressure for example. The altered mechanical properties can be an adaption to that change.

The wood density does not change with altitude, whereas the tree-ring width measured on the samples decreases significantly. Both of these variables had the biggest influence on the mechanical properties of the wood. The three studied species show very different mechanical wood properties. The wood of the larch has a lower stability compared to the spruce, the limits of elasticity are lower the maximum strength is reduced as well as the modulus of elasticity.. That means the larch can withstand higher forces and has a more flexible wood. It

is therefore generally better adapted to the mechanical effects in snowy locations than the spruce. The mountain pine reacts differently to external environmental influences. It shows the lowest resistance against deformation and the lowest strength yet the wood shows the greatest ductility. Such properties may be an advantage over heavy snow loads at the forest line. The results describe the tree stability and the resistance against the different environmental mechanical impacts for now and future, which must be considered as one of the many aspects driving the growth and mortality of trees in higher elevations.

Keywords: Climate change, Carbon dioxide, *Larix decidua*, *Picea abies*, *Pinus uncinata*, Modulus of rupture, Modulus of elasticity, Altitude.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bedeutung eines hohen und niedrigen E Moduls für einen Baum.....	15
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Schneedecken Bewegungen.....	19
Abbildung 3: Foto des Steinschlagversuchs nach AMMANN (2006).....	21
Abbildung 4: Schema des CO <sub>2</sub> und Wärme Versuchsaufbaus am Stillberg. ....	24
Abbildung 5: Aufbau der Plots mit den behandelten Bäumen.....	25
Abbildung 6: Aufnahmegebiet im Dischmatal Davos.....	26
Abbildung 7: Schema der Bearbeitung des Holzes .....	288
Abbildung 8: Bestimmung der mittleren Jahrringbreite der Holzproben. ....	30
Abbildung 9: Bestimmung der mittleren Faserabweichung der Holzproben .....	31
Abbildung 10: Prüfmaschine mit Oberem und Unteren Druckkolben und der Auflagervorrichtung.....	32
Abbildung 11: Schema der Momenten und Querkraftverläufe bei der 3 Punkt Belastung .....	33
Abbildung 12: Schema der auftretenden Quer ( $\sigma$ )- und Schubkräfte ( $\tau$ ) .....	34
Abbildung 13: Spannungs Dehnungs Diagramm eines Probeholzes der Lärche mit Darstellung der Hook'schen Gerade und der Elastizitätsgerade.....	35
Abbildung 14: Box-Whisker-Plot der mit CO <sub>2</sub> begasten Bäume und Kontrollbäume auf der Aufforstungsfläche .....	42
Abbildung 15: Darstellung aller Spannungs- Dehnungskurven der begasten Bäume und Kontrollbäume der Lärche auf der Versuchsfläche. ....	44
Abbildung 16: Veränderung der Holzdicke, Jahrringbreite, Baumalter, Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe und Durchmesser mit der Meereshöhe..	45
Abbildung 17: Boxplot mit der Veränderung des mechnischen Eigenschaften über die vier Höhenstufen bei der Lärche, Fichte und Bergföhre .....	46
Abbildung 18: Darstellung aller Spannungs- Dehnungskurven der vier Höhenstufen. ....	49
Abbildung 19: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Modellen der multivariaten Kovarianzanalyse. ....	51
Abbildung 20: Mittlere Lufttemperatur während der Vegetationszeit und mittleres Datum der Schneeschmelze an der Aufforstungsfläche.....	73
Abbildung 21: Resiudenanalyse mit Hilfe des Quantil-Quantil-Diagramms und mit Hilfe desTurkey-Anscombe-Plots. ....	74
Abbildung 22: Resiudenanalyse mit Hilfe des Histogramm der berechneten Residuen. Verteilung der Werte im Box Whisker Plot.....	74
Abbildung 23: Pearson-Residuen gegen die Variablen der Holzeigenschaften. ....	75
Abbildung 24: Abweichung Spannungs- Dehnungskurven innerhalb eines Baumes.....	76

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der in den vier Höhenstufen gefällten Baumarten und den getesteten Holzproben.....	27
Tabelle 2: Übersicht über die verwendeten Variablen mit Abkürzungen und Einheiten .....	38
Tabelle 3: Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho zwischen den aufgenommenen Variablen bei der Lärche auf der Aufforstungsfläche .....	39
Tabelle 4: Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho zwischen den aufgenommenen Variablen bei der Lärche und Fichte in der 1 bis 3 Höhenstufe .....	40
Tabelle 5: Holzdicke, E Modul und Biegefestigkeit der Messungen und Vergleichswerten aus der Holztechnik. ....	41
Tabelle 6: Elastizitätsgrenzen abgeleitet aus den Spannungs -Dehnungskurven und Kraft-Durchbiegungskurven für die unterschiedlichen Baumarten. ....	41
Tabelle 7: Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse des CO <sub>2</sub> Experimentents mit den Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften. ....	43
Tabelle 8: Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen des E Moduls $E(\kappa)$ in den 4 aufgenommenen Höhestufen.. ....	46
Tabelle 9: Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen des Biegefestigkeit $\sigma_{Max}$ in den 4 aufgenommenen Höhestufen.. ....	47
Tabelle 10: Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen der Dehnung $\epsilon_{Max}$ , in den 4 aufgenommenen Höhestufen.. ....	47
Tabelle 11: Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen der Elastizitätsgrenze $P(\epsilon)$ , in den 4 aufgenommenen Höhestufen. ....	48
Tabelle 12: Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen der Elastizitätsgrenze $P(\sigma)$ , in den 4 aufgenommenen Höhestufen... ..	48
Tabelle 13: Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse am Vergleich der Lärche und Bergföhre mit den Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften. ....	50
Tabelle 14: Mittelwerte der mechanischen Holzeigenschaften der 1. bis 3. Höhenstufe bei 5 und 8cm Baumdurchmesser .....	51
Tabelle 15: Output eines Kovarianzmodells am Beispiel der Fichte und Lärche beim E Modul in der ersten bis dritten Höhenstufe. ....	76

# 1 Einleitung

Als markante Vegetations- und Landschaftsgrenze ist die Waldgrenze schon früh Gegenstand wissenschaftlicher Forschung gewesen. Am intensivsten wurde sie in den Alpen untersucht. Durch zahlreiche anthropogene Faktoren wie die Holz- und Weidenutzung kam es schon früh zu einer Depression der Waldgrenze (HOLTMAIR, 1985). Dies führte in Kombination mit der starken Bevölkerungszunahme im Alpenraum zu gehäuft auftretenden Lawinen, Muren, Bodenerosion und Wildbachkatastrophen im Siedlungsraum. Man war also gezwungen, die Zusammenhänge im Schutzwald bis zur Waldgrenze genauer zu verstehen. Nur dann war eine Wiederaufforstung der Hochlagen möglich. Außerdem konnte der Bevölkerung die Bedeutung ihrer Wälder deutlich gemacht werden. Im Laufe der Zeit eröffnen sich neue Forschungsfragen. So tritt mit dem Klimawandel eine neue Komponente hinzu, die das Baumwachstum vor neue Herausforderungen stellt und auch Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Bäume haben kann. Mit der alten und bewährten Methode der Biegeversuche nach DIN 52186 werden diese Eigenschaften von mir untersucht und unter dem Aspekt des Schutzes vor Naturgefahren neu beleuchtet. Neben dem Einfluss des Klimawandels gibt es noch zahlreiche weitere offene Fragestellungen rund um die mechanische Baumstabilität in den alpinen Höhenstufen. Um diese zu erforschen, wurde mein Untersuchungsgebiet auf den gesamten Höhengradienten im Dischmatal bei Davos ausgeweitet. Die Chance, dieses aktuelle Thema im Rahmen meiner Diplomarbeit an einem Beispiel analysieren zu können, wurde mir am Institut für Schnee- und Lawinenforschung in Davos gegeben.

## 1.1 Ziellsetzung und Forschungsfragen

In den 57 Jahren der Versuchsaufforstung am Stillberg konnten viele Fragen über das Anlegen, die Pflege, das Wachstum, und die Ökologie eines Bestandes an der alpinen Waldgrenze gewonnen werden. Erkenntnisse über Pflanztechniken (SCHÖNENBERGER, 1988), Ballenpflanzen (SURBER, 1964), die Rottenpflanzung (SCHÖNENBERGER, 1986) oder Mikrostandorte (TURNER, 1969) haben sich in der Praxis bewährt und dazu geführt, das heute effektivere und erfolgreiche Aufforstungen möglich sind. Das Langzeitmonitoring und die dazugehörigen Arbeiten von SENN (2001) und BEBI (2012) bilden die Grundlage für zahlreiche weitere Untersuchungen. Relevant für meine Arbeit sind beispielsweise die Ergebnisse von VANOMSEN (2000) und HORAK (2004) über den Schneebruch auf der Aufforstungsfläche der die Bäume im großen Ausmaß schädigt. Außerdem zeigen die Arbeiten von LEUENBERGER (1988) und DELLAGIOVANNA (2011) über die temporäre Stützverbauung auf der Fläche die Bedeutung der mechanischen Kräfte auf die Forstpflanzen.

2001 startete dann der 9 Jahre lange  $CO_2$  und Temperatur Versuch am Stillberg. Fragen, die während dieser Zeit beantwortet wurden oder noch ausstehen, sind unter anderem, wie reagiert das Pflanzen- und Baumwachstum, wie werden die zusätzlichen Ressourcen im Baum verteilt und wie verändern sich die Kohlenstoffflüsse im Boden und Baum. Ergebnisse, die für meine Arbeit interessant sind, sind außerdem, wie verändert sich die chemische

Zusammensetzung im Baum. Insbesondere die Konzentrationen an Cellulose und Lignin sind für meine Analysen relevant. Interessant ist auch die Holzdichte und Verteilung des Spät- und Frühholzanteils, sowie die Zellwanddicke und Größe des Zellinnenraumes. Ein weiterer Punkt ist die Frostempfindlichkeit der Bäume und die Anzahl der Frostringe im Baum, die wie die anderen Punkte Grundlage für die Diskussion meiner Ergebnisse sind. Da wir die Bäume im August 2012 gefällt haben, konnten bis zum Abschluss meiner Arbeit im Dezember 2012 noch nicht alle Forschungsfragen geklärt werden. Der Fokus meiner Arbeit liegt auf der Analyse des Einflusses des  $CO_2$  und des Höhengradienten. Der Einfluss der Temperatur wird von ebenfalls analysiert. Aufgrund der geringeren Versuchslaufzeit von nur 4 Jahren sowie den geringeren nachgewiesenen Einflüssen auf das Baumwachstum (DAWES, 2010) ist nicht mit starken Unterschieden zu rechnen. Zumal die Erwärmungskabel am Boden verliefen und die Wurzeln häufig nicht im erwärmten Bereich wuchsen. Dies konnte beim Ausgraben der Wurzeln festgestellt werden.

Neben dem Einfluss der Temperatur und des  $CO_2$  hat der Höhengradient großen Einfluss auf das Baumwachstum. Meine Aufnahmen wurden deshalb auf alle Höhenstufen des Dischmatalts ausgeweitet. Untersuchungen zeigen eine Veränderung der Holzeigenschaften mit der Höhe (MAYR, 2006, KÖRNER, 2012). Welche Faktoren aber genau die Festigkeit und Flexibilität einer Baumart mit der Höhe steuern ist aber noch unklar.

Die Feldaufnahmen und die Gewinnung meiner Proben bauen auf der Arbeit der Mitarbeiter beim Projekt am Stillberg der letzten 9 Jahre auf und wären ohne die ständige Kontrolle und Pflege nicht möglich gewesen. Ebenso ist die Diskussion meiner Daten nur in Verbindung der Ergebnisse der anderen Analysen sinnvoll und möglich. Ziel meiner Arbeit ist es, mittels Biegeversuchen die mechanischen Holzeigenschaften der Bäume des  $CO_2$  Experiments zu analysieren. Darüber hinaus wird von mir untersucht, wie sich diese mit der Höhe und in Abhängigkeit von der Baumart ändern. Mit Hilfe von statistischen Analysen soll aufgezeigt werden, welche Eigenschaften des Baumes und des Holzes einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ausüben.

## Forschungsfragen und Hypothesen

1. Welchen Einfluss haben experimentell erhöhte  $CO_2$ -Konzentrationen und erhöhte Temperaturen auf die mechanische Baumstabilität?

Das Baumwachstum wird entscheidend durch die limitierenden Faktoren bestimmt. Durch das zusätzliche  $CO_2$  kommt es zu einem schnelleren Wachstum, wodurch sich z.B. die Zellen erweitern, die Holzdichte abnimmt und somit die Festigkeit und das E Modul abnimmt. Zusätzlich wird das Holz durch den höheren Anteil an Cellulose und den geringeren Anteil an Lignin flexibler. Das bedeutet, dass das Holz eine geringere Stabilität aufweist, die durch ein größeres Wachstum aber kompensiert werden kann.

2. Wie verändern sich die Flexibilität, Biegefestigkeit, die Elastizitätsgrenzen und das E Modul des Holzes mit der Meereshöhe?

Aus zahlreichen Pflanzversuchen weiß man, dass Bäume aus Provinzen aus niedrigeren Höhen schlechtere Überlebenschancen aufweisen. Dies liegt neben vielen anderen Gründen auch an der größeren Anfälligkeit gegenüber den extremen mechanischen Einwirkungen. Dies muss anhand der mechanischen Kennwerte des Holzes nachweisbar sein. Mit zunehmender Höhe nimmt das Baumwachstum ab. Die Jahrringe werden enger und die Holzdicke nimmt zu. Dadurch erhöht sich die Festigkeit, Elastizität und Flexibilität des Holzes zum Schutz vor stärker werdenden mechanischen Umwelteinflüssen.

3. Welche Eigenschaften des Holzes und des Baumes wirken sich auf die mechanischen Eigenschaften aus, und besitzen unterschiedliche Baumhöhen andere Werte?

Die nach DIN52186 bestimmten Werte wie Astigkeit, Faserabweichung, Krümmung und Holzfeuchte haben Einfluss, werden aber bei der Bearbeitung vermieden. Die Holzdicke steigt mit der Höhe aufgrund der kleineren Jahrringbreite und hat den größten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Das Holz weiter oben im Baum besitzt andere Eigenschaften als das alte Holz am Stammfuß. Es ist flexibler und besitzt weniger Festigkeit.

4. Wie unterscheiden sich die Baumarten *Larix decidua*, *Picea Abies* und *Pinus uncinata* bezüglich ihrer Festigkeit, Flexibilität und Elastizität? Verfolgen die Baumarten unterschiedliche Strategien der Anpassung an mechanische Einwirkungen im Hinblick auf Flexibilität und Festigkeit? Gibt es Baumarten, die an bestimmte Prozesse besser angepasst sind.

Die Bergföhre und die Lärche sind am besten an die Bedingungen an der Waldgrenze im Dischmatal angepasst und gehören zur natürlichen Vegetation in dieser Höhenstufe (ELLENBERG, 2010). Die Lärche weist nach den Versuchen von VANOMSEN (2000) und HORAK (2004) die geringere Anfälligkeit für Schneebruch auf und besitzt daher eine höhere Festigkeit und Elastizität. Während die Bergföhre ein sehr flexibles Holz besitzt, um die Schäden zu minimieren, setzt die Lärche eher auf eine Minimierung der Oberfläche durch den Nadelverlust und eine höhere Biegefestigkeit. Das Holz der Fichte hat ein geringeres E Modul und Biegefestigkeit (KOLLMANN, 1951), was sich auch in größeren Höhen nachweisen lässt und die generell größere Anfälligkeit gegenüber mechanischen Schäden beweist.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren

Der Gebirgswald erfüllt neben seinen zahlreichen Umweltleistungen und der Bereitstellung der Ressource Holz, auch die Funktion des Schutzes von Häusern und Infrastrukturen vor Naturgefahren. Besteht keine ausreichende Sicherheit im Gebiet, muss die permanente Schutzwirkung durch den Einsatz von aktiven Schutzmaßnahmen erhöht werden. Laut dem Risikokonzept für Naturgefahren der Schweiz (BRÜNDL, 2009) und Österreich (HÜBL, 2011) sind gegenüber technischen Maßnahmen forstlich biologische Eingriffe soweit wie möglich zu bevorzugen. Für ein verlässliches Risikokonzept setzt dies fundierte Kenntnisse über die Wirkungen des Waldes einerseits und die Naturgefahrenprozesse andererseits voraus (RICKLI, 2004). Dadurch kann der Einfluss der Vegetation in die Konzepte des integralen Risikomanagements mit einfließen und helfen, den Einsatz von technischen Maßnahmen zu minimieren. Beim Ursache-Wirkungs-Gefüge von Wäldern ist zwischen den Wirkungen von ganzen Beständen und Einzelbäumen zu unterscheiden. Die Interaktion zwischen Einzelbäumen, Naturgefahren und anderen Hangprozessen ist Bestandteil meiner Arbeit. Der Fokus wird dabei auf die Prozesse gelegt, bei denen die mechanische Stabilität der Bäume von Bedeutung ist. Dazu gehören der Steinschlag, Lawinen, Wind sowie Schneegleiten und Kriechen. Beim Langzeitversuch am Stillberg wird außerdem von mir untersucht, wie sich die Stabilität in Zukunft verändert.

### 2.2 Auswirkung des Klimawandels an der Waldgrenze

Die Waldgrenze markiert den Übergangsbereich zwischen den höchst gelegenen geschlossenen Waldbeständen, und der Krummholzzone. Ab dieser etablieren sich nur einzelne Baumindividuen, und es erfolgt nur noch gelegentlich eine generative Verjüngung (HOLTMEIER, 1985, KÖRNER, 2012). Die wichtigsten Einflussfaktoren auf das Baumwachstum in diesen Höhen sind die Dauer der Vegetationsperiode, die Durchschnitts- und Extremtemperaturen, die Exposition, die Bodenverhältnisse und die Topographie mit all ihren Aspekten (WIESER, 2007, AULITZKY, 1963, LEIBOLD, 2012). Hinzu kommen seit Jahrhunderten anthropogene Einflüsse wie Holz- und Weidenutzung, sportliche Nutzung und zu hohe Wilddichten. An der Waldgrenze wirken sich diese Faktoren noch stärker und entscheidender aus als in tieferen Lagen (LEIBUNDGUT, 1986). Als neuer Einflussfaktor kommt nun die Klimaerwärmung hinzu. Die  $CO_2$  Konzentration ist so hoch wie seit 25 Millionen Jahren nicht mehr (PEARSON, 2000, IPCC, 2007). Ob dadurch die Naturkatastrophen zunehmen, ist noch umstritten. ALEXANDER et. Al. (2006) weist aber einen globalen Anstieg der Extremtemperaturen nach. Auch die Messreihen der Klimastation im Untersuchungsgebiet zeigen einen signifikanten Anstieg der Durchschnittstemperatur und ein früheres Datum der Schneeschmelze (siehe Abb.9, Anhang). Die kombinierte Wärme und  $CO_2$  Behandlung am Stillberg repräsentiert Bedingungen wie sie in der Region in 50 Jahren erwartet werden und entsprechen den doppelten Werten der vorindustriellen Zeit (HÄTTENSCHWILER, 2002, DAWES, 2011). Untersuchungen belegen bereits einen Anstieg der Waldgrenze in den letzten 50 Jahren (NICOLUSSI, 2005, DULLINGER, 2005,

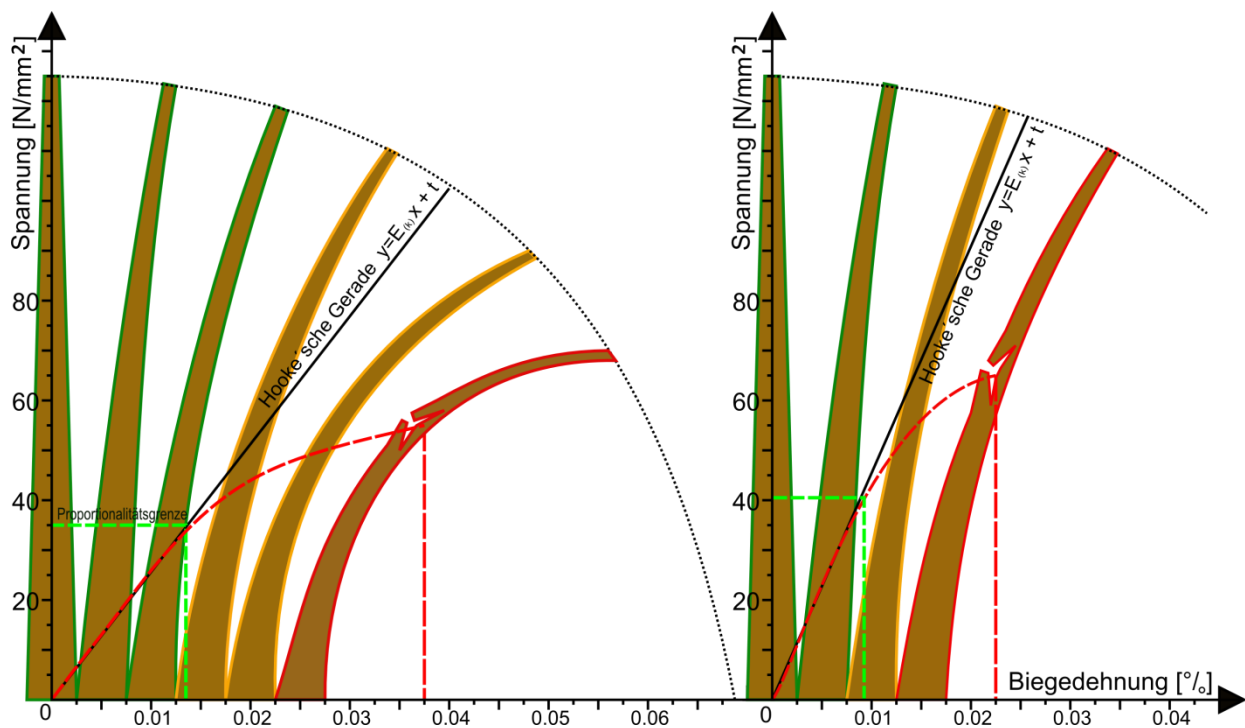
LEIBOLD, 2012), dies ist jedoch lokal sehr unterschiedlich (HARSCH, 2009). Weniger gut erforscht sind die Auswirkungen eines erhöhten  $CO_2$  Gehalts der Luft auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Bäume an der Waldgrenze und ihre Bedeutung im Hinblick auf die Wechselbeziehungen mit den äußeren Umwelteinflüssen.

## 2.3 Elastizitätsmodul und Baumstabilität

Unter Elastizität versteht man, dass feste Stoffe bei niedriger Belastung ihre Form ändern, nach der Beanspruchung ihre alte Form aber wieder annehmen (KOLLMANN, 1951). Diese elastischen Eigenschaften sind charakteristisch für jedes Material und gelten bis zur Elastizitätsgrenze. Sie stellt den Übergang zur plastischen Verformung dar, die zu dauerhaften Schäden bis hin zum Bruch des Holzes führt. Bis hin zu dieser Grenze gilt das Hook'sche Gesetz.

$$\varepsilon = \sigma E$$

Das bedeutet die Spannung  $\sigma$  und Dehnung  $\varepsilon$  nehmen direkt proportional miteinander zu. In Abbildung 1 ist dies der lineare Bereich bis zur grünen Markierung. Die Steigung der Geraden durch diesen Bereich ist definiert als das E Modul eines jeden Materials. Für den Baum bedeutet ein hohes Emodul des Holzes eine höhere Widerstandskraft gegenüber mechanischen Einwirkungen. Die Einzelbaumstabilität ist erhöht, da der Baum bei einer geringeren Dehnung einer höheren Kraft Widerstand leistet bzw. eine höhere Spannung im Stamm aufgebaut wird.



**Abbildung 1:** Bedeutung eines hohen (links) und niedrigen E Moduls für einen Baum. Dargestellt ist das Spannungs-Dehnungsdiagramm für zwei Bäume. Die Steigung der Hook'schen Gerade ist das E Modul. Grün dargestellt ist die Elastizitätsgrenze.

Die Elastizitätsgrenze, auch Proportionalitätsgrenze genannt, ist ein umstittener Begriff. Allein für den Werkstoff Holz gibt es zahlreiche Definitionen. NORÉN (1968) definiert sie an der Stelle, wenn der Lastzuwachs bezogen auf 1.0mm Verformung weniger als 10% beträgt. Nach WEGENER (2012) befindet sie sich an der Stelle, bei welcher nach Entlastung 0.2% bleibende Dehnung vorliegen. Meine Definition der Elastizitätsgrenze lehnt an die amerikanische Prüfnorm für Festigkeiten an. Gleich welche Definition verwendet wird, gemeint ist immer die Grenze hin zu einer irreversiblen Verformung.

Augrund der großen Anisotropie des Holzes kommt es zu großen Abweichungen des E Moduls quer und längs zur Faser. Diese versucht man bei Biegeversuchen durch exaktes Sägen längs zur Faser zu vermeiden. Laut KOLLMANN (1951) gibt es neben der Faserabweichungen weitere Einflussfaktoren. Positiv wirkt sich eine steigende Holzdicke aus, negativen Einfluss haben Äste, und eine höhere Holzfeuchte und Temperatur. Eine Messung des frischen Holzes würde zwar Werte liefern, die näher an denen in der Natur liegen, allerdings würde das aufgrund der starken Schwankungen im Feuchtigkeitsgehalt des Holzes (unterschiedliche Durchmesser, Baumarten und Trockenzeiten bis zur Messung) zu ungenauen Messergebnissen führen. Ein Unterschied von 1Prozent Holzfeuchtigkeit führt zu einem rund 2% niedrigeren E Modul und zu einer 4% niedrigeren Biegefestigkeit (NOACK, 1976). Die Unterschiede der Baumarten und anderer Parameter können also bei getrocknetem Holz deutlicher analysiert werden. Ein weiterer Faktor, der durch eine einheitliche Behandlung der Hölzer aus dem Spiel genommen werden kann, ist der Einfluss der Temperatur. Die Belastungsgeschwindigkeit variiert natürlich je nach dem einwirkenden Prozess in der Natur und reicht von ständiger Belastung durch Schneegleiten bis hin zur schlagartigen Belastung bei einer Lawine. Diese Belastungsdauer wirkt sich auf die Biegefestigkeit des Holzes aus. So können vom Holz für Sekundenbruchteile Biegefestigkeiten ausgehalten werden, die bis um das Doppelte über den aus genormten Biegeversuchen ermittelten Werten liegen (GRAF, 1926). Die Kraft, der der Baum bei einer kurzzeitigen Belastung durch eine Lawinendruckwelle Widerstand leistet, könnte also bei einer langen Belastung durch Schneedruck schon längst zum Bruch geführt haben. Hinzu kommt das sogenannte „Kriechen“ des Holzes, einer Vergrößerung der Durchbiegung bei lang anhaltender langer Kraft. Die Belastungszeit bei den Biegeversuchen ist jedoch konstant. Bei der Auswertung muss also zwischen den einzelnen Prozessen in der Natur unterschieden werden.

## **2.4 Baumwachstum und Auswirkung auf die Holzeigenschaften in den alpinen Höhenstufen**

Die regelmässig extrem starken Klima- und Witterungsbelastungen (Schnee, Sturm, Kälte usw.) zwingen die Bäume ununterbrochen zur Anpassung und damit zu einer entsprechend hohen Widerstandskraft (OTT,1997). Die Anforderungen an das Baumwachstum werden dabei mit steigender Höhe immer extremer und haben Einfluss auf die Baum und Holzeigenschaften. Maßgebliche Umweltfaktoren, welche sich mit der Höhe verändern, sind die abnehmende durchschnittliche Temperatur, eine höhere thermische Ein- und Austrahlung bei Tag und Nacht, ein höherer Anteil an UV-Strahlung und ein geringer  $CO_2$  und  $O_2$ Partialdruck in der Luft (KÖRNER. 2012, TRANQUILLINI, 1978). Der Baum reagiert

darauf mit einem geringeren Wachstum pro Jahr. Bei den Holzeigenschaften muss also unterschieden werden zwischen dem Einfluss von kleineren Jahrringen und anderen spezifischen Veränderungen wie Tracheidengrößen und Zellwanddicke. Häufig sind diese aber nicht unabhängig voneinander. Laut MAYR (2006) ist die Verkleinerung der Jahrringbreite mit der Höhe weit stärker ausgeprägt als die Veränderung der anderen Parameter. Die Holzdicke korreliert nicht so stark mit der Höhe wie die Jahrringbreite (KÖRNER, 2012). SPECK (1996) und BRÜCHERT (1997) nennen für die Unterschiede zwischen den Baumarten in der Flexibilität des Holzes, die Länge der Holzfasern und den Lignin- sowie Spätholzanteil. Bereits 1937 weist VORREITER einen abnehmenden Lignin Anteil mit der Höhe nach, der wie die genannten anderen Faktoren Einfluss auf die Ergebnisse aus den Biegeversuchen haben könnte.

## 2.5 Einfluss von $CO_2$ auf Baumwachstum und Holzeigenschaften

$CO_2$  gehört zu den für die Pflanze essentiellen Nährstoffen und wird in Zukunft in höherer Konzentration zur Verfügung stehen. Die Auswirkungen auf Ökosysteme sind bereits Grundlage zahlreicher Untersuchungen gewesen. Eine Erhöhung der Photosyntheseleistung und ein stärkeres Baumwachstum konnte an unterschiedlichen Baumarten bereits nachgewiesen werden (CEULEMANS, 1999, NOWAK, 2004, NORBY, 2005, TELEWESKI, 1999, KILPELÄINEN, 2005). Auch beim  $CO_2$  Experiment am Stillberg weist DAWES (2010) nach 9 Jahren Begasung ein höheres Wachstum bei der Lärche nach. COWIE (2007) nennt bei einer Verdopplung der  $CO_2$  Konzentration ein höheres Pflanzenwachstum von 10-25%. Betrachtet man die Allokation der zusätzlichen Ressourcen weist TELEWESKI (1999) einen größeren Spätholzanteil nach KILPELÄINEN (2005) konnte diesen Effekt nicht bestätigen. ZICHE (2004) weist bei seinen Versuchen an der Fichte grössere Zellinnenräume nach. KOSTIAINEN (2007) bestätigt bei Versuchen an der Fichte dickere Zellwände und größere Zellinnenräume. Eine größere Holzdicke wurde von CONROY (1990) nachgewiesen. Er begründet dies mit einer höheren Tracheidendicke. KILPELÄINEN (2005) fand keinen Einfluss auf die Holzdicke, er wies aber eine geringere Cellulose Konzentration nach. Die Festigkeit des Holzes wurde von CEULEMANS (2002) und KÖRNER (2006) untersucht. CEULEMANS (2002) bestätigt eine niedrigere Druckfestigkeit und begründet dies ebenfalls mit einer signifikant größeren Tracheidengröße und größeren Zellinnenwänden. KÖRNER (2006) weist bei Biegeversuchen eine höhere Festigkeit bei der Fichte nach. Sie zeigten jedoch keine signifikanten Ergebnisse beim E Modul. Die Holzeigenschaften werden also durch die  $CO_2$  Konzentration beeinflusst. Die meisten der genannten Untersuchungen fanden in Gewächshäusern statt oder bei Feldversuchen, bei denen optimale Nährstoffversorgung und Umweltbedingungen gewährleistet waren. Der Versuch am Stillberg bietet die einmalige Gelegenheit, die Einflüsse direkt in dem empfindlichen Ökosystem der Waldgrenze zu untersuchen.

## 2.6 Stabilität von Waldgrenzbäumen-Begriffserklärung

Die Stabilität von Bäumen und Beständen kennt viele Aspekte, sie kann die Resistenz gegenüber biotischen und abiotischen Schäden, das genetische Reaktionsvermögen auf Umweltveränderungen oder rein wirtschaftliche Interessen wie stabile Zuwachsraten beschreiben. Thema meiner Arbeit ist die mechanische Einzelbaumstabilität, also die Fähigkeit den Prozessen möglichst ohne bleibende Schäden Widerstand leisten zu können. Diese mechanischen Schäden an Stamm und Ästen sind vor allem an der Waldgrenze von grosser Häufigkeit und Bedeutung (WIESER, 2007). Die Stabilität des Baumes setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen:

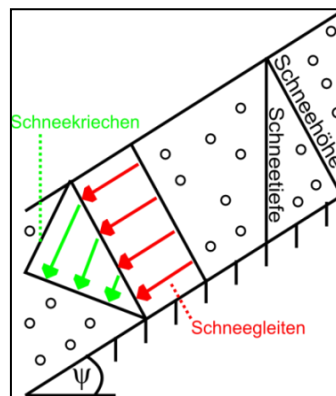
1. Die Flexibilität ist ein Maß für die reine Biegsamkeit des Holzes.
  - Gemessen durch die maximale Durchbiegung der Proben.
2. Die Festigkeit steigt mit der Kraft, die das Holz aushalten kann.
  - Gemessen durch die maximale Kraft beim Bruch.
3. Unter Elastizität versteht man, dass feste Stoffe bei niedriger Belastung ihre Form ändern, nach der Beanspruchung ihre alte Form aber wieder annehmen. Maß für die Elastizität ist der Widerstand gegen diese Belastung.
  - Berechnet durch das E Modul (Steigung der Hook'schen Geraden).  
An den Grenzen der Elastizität tritt eine irreversible Verformung ein
  - Berechnet durch die Elastizitätsgrenzen der Kraft und Durchbiegung

Die genannten Begriffe werden in meiner Arbeit zur Beschreibung der Holzeigenschaften verwendet. Die einwirkenden Kräfte werden unterteilt in das Eigengewicht des Baumes, selbstinduzierte Wachstumsspannungen im Holz und jene aus Naturgefahrenprozessen oder anderen Umwelteinflüssen. Da die ersten beiden vernachlässigbar und stetig sind, liegt der Fokus meiner Arbeit auf den Naturgefahrenprozessen. Die Möglichkeit, auf irreversible oder reversible Schäden, die im Holz entstehen, zu reagieren, spricht die Resilienz des Systems, gehört nicht zur mechanischen Stabilität. Die äusseren Umwelteinflüsse stellen unterschiedliche Anforderungen an die Stabilität der Bäume. Die Dauer und Wiederholungen der Einwirkung, die Grösse der Kraft und die räumliche Ausdehnung variieren stark und belasten das Holz unterschiedlich. Die Einwirkungen auf den Baum sind meist hoch dynamisch, nicht linear und komplex. Aus dem Grund stellen die beschreibenden physikalischen Modelle und Analysen nur ein vereinfachtes Bild der Realität dar. Dabei ist die Interaktion zwischen der Wurzel, der Stammform oder auch dem Bestandaufbau und den Naturgefahren wie Wind und Schnee bereits gut erforscht. Weniger Beachtung wurde bisher dem Einfluss der Holzeigenschaften auf die Stabilität von Bäumen in Gebirgswäldern gegeben. Im folgenden werden die Prozesse beschrieben, bei denen das Holz des Stammes in Interaktion mit der Einwirkung tritt.

### 2.6.1 Belastung durch Schnee

Eine Schneedecke hat große ambivalente Auswirkungen auf die Bäume im Gebirgswald. Eine späte Ausaperung im Frühling fördert die Bildung von Schneeschimmel kann aber auch die Gefahr einer Frosttroknis verhindern und schützt die Pflanze vor tiefen Temperaturen. Der

Schnee schützt vor Schäden durch den Wind, belastet die Bäume aber auch durch sein Gewicht und seine Bewegungen (OTT, 1997). Unterteilt wird hier wie in Abbildung 2 ersichtlich in Schneekriechen und Schneegleiten. Ein Schneekriechen entsteht durch das Setzen der Schneedecke in horizontaler und vertikaler Richtung und erreicht seine grösste Bewegung an der Schneeoberfläche. Unter Schneegleiten versteht man das Abrutschen der kompletten Schneedecke auf der Hangoberfläche. Da alle Schneebewegungen durch Waldbestände stark vermindert werden, ist an Gleitschneehängen ohne Bestand eine Aufforstung ohne technische Schutzmassnahmen nur sehr schwer möglich. Gleitschneehänge befinden sich an schneereichen, nach Süden exponierten, glatten, mit Gras bewachsenen steilen Hängen (Hangneigung  $\psi$  grösser  $30^\circ$ )(OTT,1997).



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Schneedecken Bewegungen

Die Fläche am Stillberg ist also als mittel bis stark gefährdet einzustufen (SCHÖNENBERGER, 1988). 1999 wiesen auf der Aufforstungsfläche am Stillberg im Schnitt 30% der Zirben und 3,2% der Lärchen einen Schneebruch auf (VANOMSEN,2000) Der mechanisch schwächste Punkt lag dabei meist am Stammfuss, und der kritische Durchmesser der Bäume liegt zwischen 6 und 10cm (Horak, 2004). Für kritische Baumhöhen werden Werte zwischen 1 und 5 Meter angegeben (AULITZKY ,1982: 1-5m, bei weniger als 1m werden die Bäume nur gebogen)(SCHILCHER,1964: 2-4m) (ZENKE, 1985: 2-5m) (OTT, 1997: Dichtung bis Stangenholz). Der Schneedruck nach dem Modell von MCCLUNG und LARSEN (1993) ergibt für die Aufforstungsfläche eine Kraft, die auf einen Baum wirkt zwischen 3,01 und 6,02 kN. Der Wert schwankt je nach Breite des Baumes mit Ästen (0,5-1m). Das entspricht dem Gewicht von 306 bis 613 kg, die auf einen Baum wirken, wenn die durchschnittliche maximale Schneedecke am Stillberg erreicht ist (1.46m siehe Kapitel 3.1.1). Das Modell der schweizerischen (MARGRETH, 2007) und österreichischen Richtlinien (SUDA, 2011) zeigt eine noch höhere Kraft von 5,32 bis 10,65 kN pro Baum je nach Breite (0,5-1m). Das ergibt ein Gewicht von 542 bis 1084 kg. (Berechnung siehe Anhang). In Zukunft ist sogar noch mit einer Zunahme von kritischen Witterungsbedingungen für Schneebruchereignisse zu rechnen. Aktuelle Klimaszenarien gehen für den 2. Teil des 21. Jh. eher von einer leichten Zunahme der Winterniederschläge in der Schweiz aus (CH, 2011).Zusammen mit den höheren Temperaturen führt das in Höhenlagen über 1000m.ü.M. zu einem größeren Regenanteil im Winter (BEBI, 2012).

## 2.6.2 Belastung durch eine Lawine

Die Bremswirkung des Waldes bei Lawinen, die hoch über der Waldgrenze anbrechen, ist sehr gering. Die auftretenden Kräfte bei großen Lawinen von mehr als 60000m<sup>3</sup> können 500kN/m<sup>2</sup> übersteigen (MARGRETH, 2004). Diese Kraft hängt unter anderem von der Geschwindigkeit und der Wirkungshöhe ab. Vor allem Staublawinen, deren Fließhöhen die Äste erreichen, haben aufgrund der Angriffsfläche große Auswirkungen. Zwar verliert eine Lawine Energie durch das Brechen und umbiegen von Bäumen, aber durch das Entrainment von Holz erhöht sich die zerstörerische Kraft wieder. Modelle von SALM (1979) und BARTELT (2001) berücksichtigen in ihren Modellen zur Berechnung der Auslauflänge von Lawinen die Bremswirkung von Wäldern. Einfluss haben das Ausreißen der Wurzelstöcke, das Brechen des Holzes und das Entrainment. Laut LORENZATO (2001) durchschlägt eine Lawine einen Wald, wenn seine Widerstandsenergie nur der Hälfte der Lawine entspricht. Aufgrund der komplexen Wirkung des Waldes auf Lawinen und den vielen Einflussfaktoren bieten diese Modelle aber keine exakten Ergebnisse. TEICH (2012) untersuchte die Bremswirkung des Waldes bei Lawinenanbrüchen oberhalb der Waldgrenze. Bei diesen Lawinenmodellen hatte die Bestandesstruktur bei größeren Lawinen keinen Einfluss auf die Auslauflänge, aber Wälder im Allgemeinen bewirkten eine Bremsung dieser Lawinen und eine Verringerung der Auslauflänge. Festzuhalten ist, dass der Wald nur bei kleinen Lawinen bis 10000m<sup>3</sup> einen größeren Einfluss hat und der Einfluss der Holzeigenschaften im Vergleich zu anderen Faktoren, wie der Größe der Angriffsfläche bei Laub- und Nadelbäumen, wohl eher zu vernachlässigen ist.

## 2.6.3 Belastung durch einen Steinschlag

Beim Einschlag eines Steins kann der Baum hohe Energien von bis zu 400 kJ aufnehmen ohne komplett zu brechen (AMMANN, 2006, JONSSON, 2007). Diese Einwirkung wird als Bruchschlagarbeit bezeichnet da sie sehr kurz wirkt und doppelt so hoch sein kann wie bei längeren Belastungen (KOLLMANN, 1951). Trifft ein stürzender Stein auf einen Baum, verliert der Stein durch den Kontakt mit dem Baum an kinetischer Energie und wird abgebremst oder sogar gestoppt. Es kommt zur Biegung, zum Bruch oder Entwurzelung des Stammes. LUNDSTRÖM (2010) konnte bei seinen Versuchen feststellen, dass 75% der Energie des Steins oberhalb der Oberfläche absorbiert werden und nur 25% von der Wurzel. 53% und damit der wichtigste Anteil werden im Stamm durch Biegeverformungen absorbiert. Diese teilen sich auf in 20% elastische und 33% plastische Verformung. Die restlichen 22% gehen als Trägheits- und Deformationsenergie im Holz verloren. 12 von 15 Bäumen sind bei seinen Versuchen am Stamm gebrochen nur 3 sind entwurzelt worden. Das deutet auf den grossen Einfluss der Festigkeitseigenschaften des Holzes beim Schutz vor Steinschlag hin.



**Abbildung 3:** Steinschlagversuch nach LUNDSTRÖM (2010).

JONSSON (2007) gibt für die vom Stamm absorbierte Energie rund 66% an. Den größten Einfluss auf die absorbierte Energiemenge hat der Baumdurchmesser, die Holzdicke, der horizontale und vertikale Einschlagpunkt und das Elastizitätsmodul des Holzes (DORREN, 2005, LUNDSTRÖM, 2010). Laubbäume zeigen eine höhere Absorptionskraft als Nadelbäume (STOKES, 2005, DORREN, 2005). Wenn der Baum gut verwurzelt ist und der Stamm weder anreißt oder bricht, pflanzt sich eine sinusförmige Welle bis zur Kronenspitze fort. Der Baum beginnt zu schwingen und verliert häufig die Spitze seiner Krone (AMMANN, 2006). Abbildung 3 zeigt den Einschlag eines Probekörpers in einen Baum.

Sichtbar ist die Biegung des Stammes und der Bruch auf der Zugseite des Holzes. Das Holz unterliegt also auch beim Steinschlag einer Biegebelastung, die mitunter entscheidend sein kann für das Aufhalten eines Steines.

#### 2.6.4 Belastung durch Wind

Von allen mechanischen Einwirkungen auf den Baum ist die des Windes am besten erforscht. Dies liegt vor allem an den immensen Schäden in Millionen Höhe, die die vergangenen Sturmereignisse wie z.B. Wiebke 1990, Vivian 1990 und Lothar 1999 verursacht haben. Eine klimabedingte Erhöhung der Sturmgefährdungen ist nicht eindeutig, aber aufgrund von stärkerem Wachstum und der größeren Eintrittswahrscheinlichkeit von Winterstürmen bei nicht gefrorenem Boden ebenfalls plausibel (BEBI, 2012). Untersuchungen von NICOLL (2005) und PELTOLA (2000) und COUTTS (1986) zeigen, dass die meisten Bäume durch Windbelastung entwurzelt werden. Die Resultate von SELLIER (2009) zeigen, dass die Holzeigenschaften nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Biegefestigkeit des Holzes ist im Sommer also nicht das primäre Stabilitätskriterium, da die Wurzeln meist vorher versagen. Bei den Versuchen von PELTOLA (2000) am stehenden Baum versagen in gefrorenem Boden 100% durch Stammbruch und in ungefrorenem Boden nur 20%. Ein Sturm im Winter hätte also andere Folgen für den Bestand als im Sommer. Die Haupteinflussfaktoren auf die Widerstandskraft sind Baumart, Baumhöhe und Durchmesser, Kronenfläche und Masse, Bestandesdichte, Bodentyp und Topographie. Beim Einfluss der Topographie zeigen die

Versuche von NICOLL (2005) eine Abhängigkeit der Widerstandskräfte von der Windrichtung am Hang aufgrund des Verlaufs der Hauptwurzeln und der Bildung von Druckholz im Stamm. Das Dämpfungsvermögen im Stamm wiederum ist in einem linearen Zusammenhang mit dem Stammdurchmesser zu sehen ist (GARDINER,1995). Nimmt man all diese Faktoren als konstant an, hängt der Widerstand der Wurzel von der Verankerung ab, und der des Stammes von der Biegefestigkeit (PELTOLA, 2006). FÜHRER (2001) unterscheidet 3 Dämpfungskomponenten einer Baumschwingung, nämlich die Interferenz zwischen Ästen benachbarter Bäume, die aerodynamische Abbremsung durch das Blattwerk und die Dämpfung in Stamm und Wurzeln. Bäume reagieren bei mehrmaliger Belastung durch Wind mit verstärktem Zuwachs in den unteren Stammteilen und Starkwurzeln, einem abnehmendem h/d Verhältnis und Reaktionsholzbildung (NIELSEN, 1990). Auch dies zeigt indirekt die Bedeutung der Biegeeigenschaften des Baumes. Die Belastungszeit bei Sturmereignissen unterscheidet sich ebenfalls von anderen Prozessen, da sie hier länger andauert und ständig schwankt. Dies führt wie in Kapitel 2.3 angesprochen zu einer langsamen Schwächung des Holzes und der Wurzeln. Die untersuchten Bäume auf der Aufforstungsfläche sind nach OTT (1997) noch zu klein, um vom Wind gebrochen zu werden.

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Untersuchungsgebiet

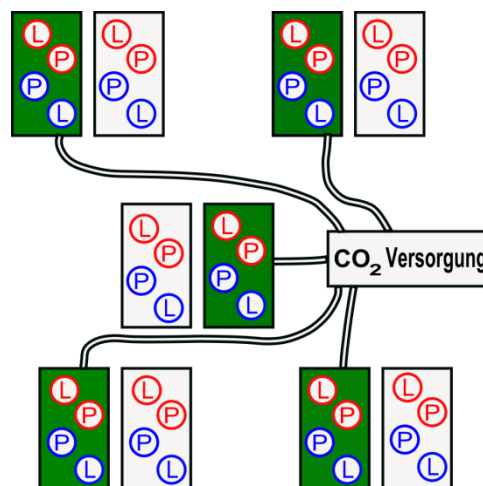
Der zerstörerische Lawinenwinter 1951/52 und der schlechte Zustand der Schweizer Wälder führten zu Diskussionen über die Ursachen und potentiellen Maßnahmen zum Schutz von Menschenleben, Siedlungen und Infrastrukturen durch einen intakten Schutzwald. Es wurde eine interdisziplinäre Forschungsinitiative gegründet mit dem Namen „Wiederherstellung der oberen Waldgrenze“. Ziel war es, finanzierbare biologisch und technisch machbare Methoden zu entwickeln, die eine Wiederaufforstung von Lawinenanrissgebieten möglich machen (SCHÖNENBERGER, 1988). 1955 wurde zu diesem Zweck die Versuchsfläche am Stillberg in der Nähe von Davos angelegt (47°28'N, 7°30'E). Von 1960 bis 1970 wurden zahlreiche Grundlagenuntersuchungen durchgeführt. Ziel war es, passende Baumarten und Pflanzmethoden zu finden, sowie die wichtigsten Standortfaktoren für das Pflanzenwachstum in diesen Höhen zu determinieren. 1975 wurden 92000 Bäume (20000/ha, Topflanzen) auf der 5ha grossen Fläche gepflanzt (Abstand 70 mal 70 cm in Gruppen von 25 Bäumen einer Art). Der Erfolg der Aufforstung wurde ständig überwacht und spiegelt sich in der Überlebensrate der Baumarten wieder. Diese veränderte sich zwischen den Baumarten im Laufe der Jahre ständig. 1995 hatten 71,5 % der Lärchen 32,5 % der Bergföhren und 15,6 % der Arven überlebt (BEBI, 2009).

#### 3.1.1 Standortfaktoren Untersuchungsgebiet

Da sich mein Untersuchungsgebiet (4 Höhenstufen) von den Bäumen der Aufforstungsfläche auf 2235m in einer Linie bis hin zum Talboden auf 1660m erstreckt, muss bei den Standortfaktoren differenziert werden. Das Dischmatal liegt im Kanton Graubünden in der Schweiz und erstreckt sich von Davos aus gegen Südosten. Es herrscht das gemäßig kontinentale Klima der Zentralalpen. Die subalpine Zone reicht hier von 1600 bis 2200m (FREHNER, 2005). Die Waldgrenze liegt bei 2000-2100m. Das Relief ist reich strukturiert und von zahlreichen Lawenstrichen, die bis runter ins Tal reichen, durchzogen. Von 1959 bis 1982 gingen auf der Aufforstungsfläche durchschnittlich 42 Lawinen pro Winter ab. Die Hangneigung  $\psi$  schwankt zwischen 35 und 50%. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 2.8°C in Davos und fällt bis zur Aufforstungsfläche auf 2.0°C ab (Mittelwert: 1975-2005) (BEBI, 2009). Allerdings kann der Temperaturgradient im Sommer auf bis zu 1°C/100m ansteigen (URFER, 1981). Die Vegetationsperiode (Bodentemperatur 10cm Tiefe > 2°Celsius) liegt auf der Aufforstungsfläche bei 137 Tagen (1.Juni bis 15.Oktober) und nimmt zum Tal hin zu. In den höheren Lagen sind in jedem Monat des Jahres Frosttage und Schnee möglich. Der mittlere Jahresniederschlag ist mit 1150mm für diese Höhe eher gering, im Tal in Davos liegt er bei 1007mm. Die durchschnittliche maximale Schneehöhe liegt im Tal bei 120cm (WÜTHRICH et Al., 2010) und auf der Aufforstungsfläche bei 146cm (variiert zwischen 60cm auf Windflächen und 420cm in Lawinenrutschen)(SENN, 2001). Die mittlere saisonale kontinuierliche Schneedecke von 6,5 Monaten unterliegt starken reliefbedingten Schwankungen und nimmt zum Tal hin stark ab. Die Windgeschwindigkeit ist im Jahresgang ausgeglichen mit einem Stundenmittel von 10 bis 12m/s ((Messreihe von 1975 bis 84)). Es

gibt große tagesperiodische Schwankungen der Windrichtung und -stärke aufgrund der Lee- und Hanglage mit einem Maximum zu den Mittagstunden. Den Untergrund bilden die Paragneise des Silvretta Kristallins. Im oberen Teil kommen die Bodenformen Podsol und flachgründige Ranker mit Rohhumus oder Moderauflage vor. Weiter im Tal wird der Boden tiefgründiger und die Podsolidierung findet in der schwer abbaubaren Streu der Nadelwälder auf der kalten Nordseite vermehrt statt (VÖGELE, 1984). Die Hauptbaumarten sind Larix Decidua, Picea Abies und Pinus Cembra. In den unteren Lagen dominiert der Heidelbeer-Fichtenwald (*Piceetum subalpinum myrtilletosum*) und der Preiselbeer-Fichtenwald (*Piceetum subalpinum vaccinietosum*), in den höheren Lagen gehört der Lärchen-Arven-Wald (*Larici-Pinetum cembra*) zur natürlichen Vegetation (ELLENBERG, 2010, SCHÖNENBERGER, 1988). Die 4 Aufnahmepunkte der Höhenstufen liegen knapp über dem Talboden auf ca. 1700m, auf ca. 1850m, bei der Waldgrenze auf ca. 2024 und in der Aufforstungsfläche auf ca. 2235m.

### 3.1.2 Versuchsaufbau CO<sub>2</sub> Begasung und Erwärmung



**Abbildung 4:** Schema des CO<sub>2</sub> – und Wärme Versuchsaufbaus am Stillberg. Grün: Blöcke mit erhöhtem CO<sub>2</sub>. Rot: Bäume mit einer erhöhten Temperatur im Boden. L: Lärche, P: Bergföhre

Im Juni 2001 wurden 40 hexagonale 1.1m<sup>2</sup> große Flächen am oberen Rand der Aufforstungsfläche am Stillberg auf einer Höhe von 2235m ü.d.M. angelegt. 20 Lärchen und 20 Bergföhren stehen in der Mitte jeder Einzelfläche. Das 2500m<sup>2</sup> Areal ist aufgeteilt in 5 Blöcke (siehe Abbildung) mit je 8 Bäumen von denen 2 begast, 2 erwärmt, 2 erwärmt und begast und 2 nicht behandelt wurden. Dadurch ist es möglich, jeden Einflussfaktor separat und in Kombination miteinander auf verschiedene Variablen hin zu überprüfen. Das Areal wurde ausgewählt, weil es knapp über der gegenwärtigen Waldgrenze liegt, ein homogenes Mikorelief besitzt, die CO<sub>2</sub> und Stromversorgung von der nahe gelegenen Stillberg Hütte möglich ist und sich nur die 1975 gepflanzten Bäume auf der Fläche befinden (BEBI, 2009). 9 Jahre lief die CO<sub>2</sub> Behandlung von 2001 bis 2009. Neben <sup>14</sup>C-Atomen wurde die Konzentration an <sup>13</sup>C-Isotopen erhöht, um den Weg des CO<sub>2</sub> im Stoffkreislauf nachzuverfolgen. Die CO<sub>2</sub> Konzentration lag im Tagesmittel bei allen Einzelflächen bei 578,5±78µmol/mol. Aufgrund von schlechter Witterung und technischen Defekten wurden

die Bäume in 73-87% der Zeit begast. Bei den Kontrollbäumen blieb die Konzentration unverändert bei  $367\mu\text{mol/mol}$ . Zur Kontrolle, wieviel zusätzliches  $\text{CO}_2$  von den Bäumen aufgenommen wurde, wurden Isotopenanalysen in den Nadeln durchgeführt. Die Ergebnisse ergaben eine konstante  $\text{CO}_2$  Aufnahme der Pflanzen im Zeitraum des Versuchs (Dawes, 2011). Der Mindestabstand der Flächen beträgt 2m zueinander und 0.8m zum Nachbarbaum. Es wurden Bäume mit nur einem intakten Hauptstamm einer Höhe zwischen 0.8 und 1.5m und keinen Anzeichen von Krankheiten ausgewählt. Dies ergibt eine unregelmäßige Verteilung der Bäume auf der Fläche. Die Bodenvegetation besteht aus den Zwergsträuchern *Vaccinium myrtillus*, *V. uliginosum*, *V. vitis-idea* und *Empetrum nigrum*, sowie verschiedenen Gräsern und krautigen Arten (HÄTTENSCHWILER, 2002). Das reine  $\text{CO}_2$  Gas strömte aus den perforierten Schläuchen in Richtung der Bäume von 10-14Uhr pro Tag. Von 2001 bis 2007 hingen die 24 Schläuche wie in Abb. \_\_\_ von einem Stahlrahmen senkrecht nach unten mit einem Abstand von 15cm. Der Stahlrahmen wurde von drei Holzpflocken gehalten und war über einen Schlauch mit der Versorgungsanlage verbunden. Ab 2007 wurden die Schläuche aufgrund der Größe um die Bäume gewickelt. Die Versorgungsplattform befand sich an der oberen Stillberghütte und wurde per Helikopter mit neuen  $\text{CO}_2$  Gasflaschen versorgt.

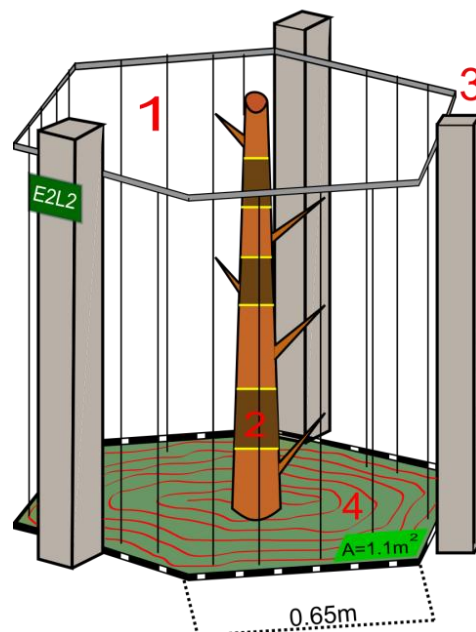


Abbildung 5: Aufbau der Plots **1**: 24 in Richtung des Baumes perforierte Schläuche für die  $\text{CO}_2$  Begasung **2**: Baum mit markierten Abschnitten für die Stabilitätsmessungen **3**: Metallrahmen zur Befestigung der Schläuche **4**: Heizkabel auf der Bodenoberfläche

Im Frühling 2007 wurde bei je 10 zufällig ausgewählten Lärchen und Bergföhren der Boden mit Heizkabeln erwärmt. Die Bodentemperatur wurde dabei konstant Tag und Nacht in der Vegetationsperiode um  $4^\circ\text{C}$  erhöht. Dieser Versuch lief bis zur Ernte der Bäume im Sommer dieses Jahres. Die Boden und Luftverhältnisse wurden während des gesamten Zeitraums in einem breit angelegten Monitoring laufend kontrolliert.

## 3.2 Feldarbeit

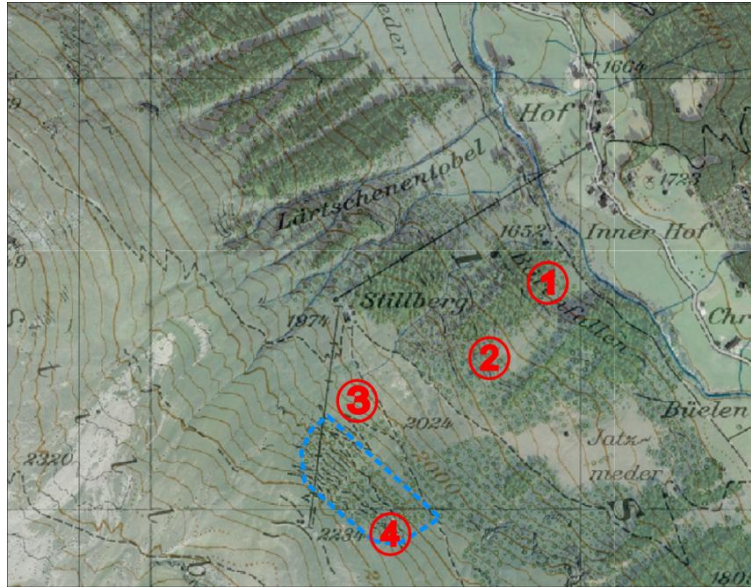


Abbildung 6: Aufnahmegebiet im Dischmatal Davos, **Blau:** Aufforstungsfläche, **Rot:** Die Aufnahmepunkte der 4 Höhenstufen

Die gesamten Aufnahmen und Arbeiten am Stillberg dauerten vom 10. Juli bis zum 29. August 2012. Vor der Arbeit in der Versuchsfläche wurden in drei Höhenstufen von 1600 bis 2200m jeweils 5 Fichten und Lärchen gefällt, aus denen ebenfalls Probehölzer gewonnen wurden. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass die Bäume erstens in der vorgegebenen Höhe und relativ nahe nebeneinander liegen und zweitens in etwa dem gleichen Brusthöhendurchmesser entsprechen ( $8 \pm 2$ cm). Um den Einfluss der Exposition und weiterer Standortfaktoren auszuschalten, wurden die Bäume ungefähr in einer Linie hangaufwärts unterhalb der Versuchsfläche ausgewählt. Nur in der untersten Höhenstufe wurden 4 Bäume im Unterwuchs eines Bestandes gefällt, alle anderen Bäume wuchsen ohne Überschildung auf. Nach der Fällung wurden dem Baum die Äste entfernt und die Höhe des Baumes gemessen. Der Durchmesser wurde am Stammfuß und in 1.3m Höhe bestimmt. Danach wurde am Stammschnitt direkt über dem Boden das Alter des Baumes mit Hilfe der Jahrringe gezählt. Die Abschnitte für die Probehölzer wurden bei einem Durchmesser des Stammes von 5 und 8cm entnommen, da dies auch in etwa den Durchmessern der Bäume auf der Versuchsfläche entspricht. Die Höhe jedes Probeabschnitts im Baum und die Anzahl an Jahrringen wurde ebenfalls vermerkt. Die Position der Bäume wurde mit einem mobilen GPS Gerät vor Ort vermerkt. Danach wurden die Abschnitte in die Trockenkammer nach Davos transportiert.

Um zu Beginn einen Überblick zu bekommen, wie viele Probehölzer aus den Bäumen des  $CO_2$  Experiments zu gewinnen sind und welche Abmessungen diese haben können wurden zunächst die Höhen und die Durchmesser der Bäume bestimmt. Da die meisten Kiefern eine zu verzweigte und gebogene Wuchsform aufwiesen wurde festgelegt, den Fokus der Arbeit auf die Lärchen zu legen. Hinzu kam, dass während des  $CO_2$  Experiments drei Bergföhren mit *Gremmeniella abietina* infiziert wurden und starben. Das reduzierte den das Experiment auf 9 begaste Bäume und 8 Kontrollbäume. Neben meinen Messungen der

Stabilität, werden an den Bäumen der Versuchsfläche noch zahlreiche andere Untersuchungen durchgeführt. An der WSL in Brimensdorf wird an Stamm-, Ast und Wurzelscheiben die Ressourcenverteilung innerhalb eines Baumes sowie seine Jahrringe untersucht. Zusätzliche Stammscheiben werden benötigt für die Messung der  $CO_2$  Isotope im Holz, sowie für Untersuchungen an Zellstrukturen unter dem Mikroskop. Hier wird auch die Dichte der Spätholzzellen gemessen. Um einen Vergleich der Biomasse aller Bäume zu ermöglichen, müssen alle Teile des Baumes inklusive der Wurzeln und Nadeln zusätzlich im trockenen Zustand gewogen werden. Hinzu kommen natürlich noch die Untersuchungen an der Bodenvegetation, sowie zahlreicher Versuche im Boden. Diese vielfältigen Untersuchungen an den unterschiedlichen Teilen des Baumes, erforderte Koordination zwischen den beteiligten Teil-Forschungsprojekten. Begonnen wurde damit von allen Bäumen Fotos zu machen und deren GPS Koordinaten zu bestimmen. Dann wurden alle Äste mit einem Durchmesser von weniger als 1.5cm abgetrennt und zusätzlich mit allen Nadeln vom Stamm in Papiertüten verpackt. Die neuen Triebe von diesem Jahr wurden separat gesammelt. Danach konnte mit dem Beschriften der Stammabschnitte und Äste begonnen werden. Diese wurden vom Stammfuß bis zur Baumspitze durchnummeriert und jeweils die Hangoberseite markiert. Zusätzlich wurde eine Skizze angefertigt, um jedes Teil eines Baumes nach dem Zersägen wieder zuordnen zu können. Danach konnten die Bäume gefällt und ins Tal getragen werden. Auf der Versuchsfläche wurde nun begonnen das vollständige Wurzelsystem auszugraben. Die Lage und der Verlauf der Wurzeln wurde skizziert und mit der Kamera aufgenommen. Zum Ende der Feldarbeit wurden die Wurzeln, und sämtliches Versuchsmaterial noch ins Tal transportiert, und die zerstörte Vegetationsdecke wieder hergestellt.

**Tabelle 1: Übersicht der in unterschiedlichen Höhenstufen gefällten Baumarten und den dazugehörigen untersuchten Abschnitten und Holzproben**

Höhenstufe	Höhe	Baumart	Bäume	Abschnitte	Holzproben	
1	1600-1800m	Larix Decidua	5	10	10	
		Picea Abies	5	10	10	
2	1800-2000m	Larix Decidua	5	10	9	
		Picea Abies	5	10	10	
3	2000-2200m	Larix Decidua	5	10	10	
		Picea Abies	5	10	10	
4	über 2200m	Pinus	CO2	3   1	5   1	7   2
		Uncinata	Kontrollbäume	1   0	1   0	1   0
		Larix Decidua	CO2	6   4	12   8	17   12
			Kontrollbäume	7   3	15   5	16   7

Bei den Lärchen auf der Versuchsfläche konnte aus allen 20 Bäumen mindestens ein Abschnitt mit einer Länge von 20cm genommen werden, bei den Kiefern nur bei 5 Bäumen. Wie in Tabelle 1 ersichtlich ist die Verteilung der mit  $CO_2$  begasten sowie der erwärmten Bäume und deren Kontrollbäume relativ ausgeglichen. Bei der Bergföhre reicht die Anzahl der Probehölzer nicht aus, um den Einfluss des  $CO_2$  zu untersuchen. Zusätzlich wurden in den drei Höhenstufen von 1600 bis 2200m jeweils 5 Fichten und Lärchen gefällt, von denen pro Baum 2 Probehölzer ausgewertet wurden.

### 3.3 Vorbereitung und Sägen des Holzes

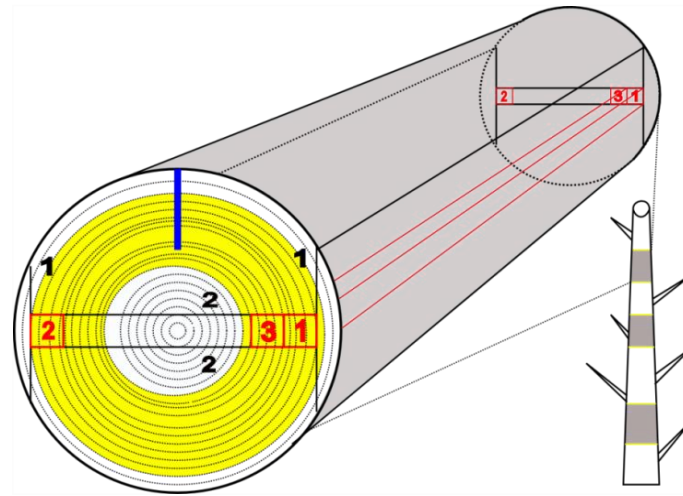


Abbildung 7: Bearbeitung des Holzes: **Blau:** Markierung der Hangoberseite **Rot:** Probehölzer mit Nummerierung **Gelb:** Bereich der Jahrringe mit CO<sub>2</sub> und Wärmebehandlung **Schwarze Nummern:** Abfolge der Bearbeitung

Sehr wichtig für verlässliche Ergebnisse aus Biegeversuchen ist das korrekte und einheitliche Bearbeiten des Holzes dieses wurde in der Schreinerei der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in zusammen Arbeit mit dem Schreiner Walter Godli durchgeführt. Wichtig war eine technisch mögliche und bei den geringen Ausmaßen der Probehölzer ungefährliche Methode zu entwickeln. Die Probehölzer wurden so geschnitten, dass sie einheitlich die gleiche Orientierung der Holzfasern besitzen und aus dem gleichen Bereich im Kreisquerschnitt stammen. Vor der Bearbeitung wurden, wie in Abbildung 7 ersichtlich, an den Stirnflächen der Abschnitte die Jahrringe gelb markiert, die während des CO<sub>2</sub> Experiments entstanden sind. Da die Versuchsapparaturen nach der Vegetationsperiode 2010 nach neun Jahren entfernt wurden, sind die äußeren zwei Jahrringe nicht von Interesse. Je nachdem aus welcher Höhe der Abschnitt im Baum stammt und wie schnell er gewachsen ist, reichen die 9 Jahrringe unterschiedlich weit ins Mark hinein oder füllen auch den ganzen Stammabschnitt aus. Die Markierung wurde auch bei den Abschnitten der Kontrollbäume ohne CO<sub>2</sub>-Begasung durchgeführt. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Probehölzer annähernd die Jahrringe beinhalten, die in den selben Jahren entstanden sind. Die Breite der 9 CO<sub>2</sub>-Jahrringe wurde mit einer Schublehre auf mm genau bestimmt. Die Bearbeitung begann an der Bandsäge, hier wurde der Stammabschnitt auf eine Länge von 20cm zurechtgesägt. Danach wurden an der Hobelanlage beide Seiten bis auf die Seitenkanten der Probehölzer geglättet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Hangoberseite des Baumes nach oben zeigt, um mögliches Druckholz in den Probehölzern zu vermeiden. Wie in Abbildung 7 dargestellt, wurde die Hangoberseite bereits im Feld mit einem blauen Stift markiert. In dem Bereich ohne Druckholz wurde dann darauf geachtet, dass die Stelle gehobelt wird, an der möglichst wenig Astansätze zu sehen waren. Als nächstes wurde mit Hilfe der Kreissäge an der Ober- und Unterseite Schnitt 2 durchgeführt. Die Platte mit den Probehölzern war dann nur 1cm dick, was ein Bearbeiten sehr schwierig macht und an der Kreissäge nur mit Hilfsvorrichtungen möglich ist. Diese Arbeit konnte nur vom Schreiner durchgeführt werden,

da auch darauf geachtet werden musste, die gewünschten Abmessungen der Probehölzer möglichst genau einzuhalten. Danach konnten an der Kreissäge aus der Platte so viele Probehölzer wie möglich gesägt werden. Der mittlere Stammbereich mit dem Mark und der nicht gelb markierte Bereich wurden dabei ausgelassen. Zuletzt wurden die Probehölzer noch von mir auf die richtige Länge von 180mm zurecht gesägt. Wichtig war eine geordnete und immer gleiche Abfolge der Arbeitsschritte, um die Holzstücke nach der Bearbeitung nicht zu verwechseln. Direkt im Anschluss wurden die Proben wieder nach Davos transportiert, um sie dort wieder auf Gewichtskonstanz zu trocknen.

### 3.3.1 Holz Trocknung und Messung der Holzfeuchte

Wesentlichen Einfluss auf die Stabilität des Holzes hat der Feuchtigkeitsgehalt. Dieser ist der Unterschied des Gewichts der feuchten  $G_u$  und der getrockneten Probe  $G_d$  bezogen auf das Gewicht der getrockneten Probe in Prozent. Um diesen Einflussfaktor bei den Messungen auszuschalten, müssen alle Proben vorher auf einen gleichen Feuchtigkeitsgehalt herunter getrocknet werden. Dies erfolgt in der Trockenkammer im SLF in Davos. Die Temperatur wurde konstant auf 40°C und 30-35% Luftfeuchtigkeit gehalten. Laut KOLLMANN (1951) stellt sich nach der Trocknung damit eine Gleichgewichtsfeuchte zwischen dem hygroskopischen Werkstoff Holz und dem Umgebungsklima von rund 6% ein. Überprüft wurde das Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte durch mehrmaliges Wiegen der Proben. Leider musste vor der vollständigen Trocknung mit dem Einsägen der Probehölzer begonnen werden, da der Schreiner nur in dieser Zeit zur Verfügung stand. Bei der restlichen Trocknung krümmten sich leider einige der Hölzer leicht. Der Betrag der Krümmung wurde aufgezeichnet. Nachdem bei allen Proben eine Gewichtskonstanz feststellbar war, konnte mit den Stabilitätstests begonnen werden. Der genaue Feuchtigkeitsgehalt wurde nach der Messung ermittelt. Hierzu wurden die Proben im Trockenschrank laut DIN52183 bei rund 100 Grad vollständig bis auf das Darrgewicht  $G_d$  getrocknet und anschließend gewogen. Da das Gewicht der feuchten Probe  $G_u$  direkt nach dem Biegeversuch auf 0.01 Gramm genau bestimmt wurde kann mit folgender Formel der Feuchtigkeitsgehalt bestimmt werden.

$$u = \frac{G_u - G_d}{G_d} * 100\%$$

### 3.3.2 Abmessung der Holzprobe und Holzdicke

Laut DIN52186 ist eine Probenbreite  $a$  von mindestens 20mm vorgesehen und eine Länge von 18a. Aufgrund der geringen Höhe der Bäume und der zum Teil schiefen und stark verzweigten Wuchsform wurde die Probendicke auf 10mm im Querschnitt festgelegt. Bei Beibehaltung des in der Norm festgelegten Verhältnisses ergibt dies eine Länge von 180mm. Da beim Arbeiten mit der Kreissäge und der Hobelmaschine geringe Abweichungen unvermeidlich sind, weicht das tatsächliche Volumen der Stäbe aber vom genormten Volumen geringfügig ab. Die Stäbe ergeben kein regelmässiges Quader, sondern eine abgestumpfte Pyramide mit geringfügig unterschiedlichen Grundflächen. Um dies zu berücksichtigen wurde die Höhe und Breite der Proben an beiden Enden des Holzstückes sowie in der Mitte gemessen. Die Messung erfolgt auf 0.1mm genau durch eine elektronische Messlehre. Mit Hilfe der Formel eines Pyramidenstumpfes kann dann das genaue Volumen

berechnet werden. Dies geschieht durch Addition des Volumens des oberen und unteren Pyramidenstumpfes.

Formel Pyramidenstumpf:

$$V = h \times \frac{1}{3} (a_1 b_1 + a_2 b_2 + \sqrt{a_1 b_1 a_2 b_2})$$

Addierte Pyramidenstümpfe:

$$V = h \times \frac{1}{3} [a_1 b_1 + 2a_2 b_2 + a_3 b_3 + \sqrt{a_1 b_1 a_2 b_2} + \sqrt{a_2 b_2 a_3 b_3}]$$

Da die Dichte des Holzes Einfluss auf die Biegefestigkeit hat, muss diese vor dem Stabilitätstest für jede Holzprobe bestimmt werden. Sie fließt anschließend als Variable in die Auswertung mit ein. Bestimmt wird die Dichte indem die Masse der Probe durch ihr Volumen geteilt wird. Da die Masse von der Holzfeuchte abhängt, muss das Darrgewicht bei 0% Wassergehalt bestimmt werden.

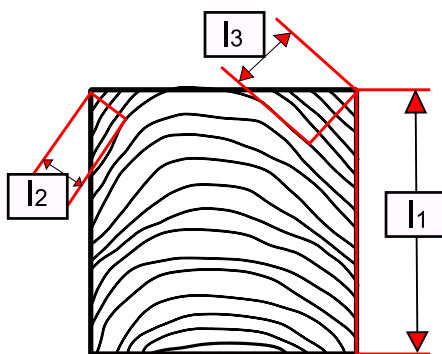
### 3.3.3 Bestimmung der Ästigkeit

Da das Wachstum der Bäume pro Jahr in zunehmender Höhe abnimmt, sind auch die Internodien geringer und die Anzahl der Äste nimmt zu. Bei einem Biegeversuch wirken sich die Äste negativ auf die Festigkeit aus. Daher müssen auch die Abmessungen der Äste in den mittleren 5cm des Stabes in die Auswertung mit einfließen. Gemessen wurde bei einer Probe nach DIN52181 stets der kleinste sichtbare Durchmesser eines Astes. Sind mehrere Äste in die Probe wurden die einzelnen Durchmesser zu einem Gesamtdurchmesser addiert. Nach dem Bruch wurde untersucht ob der Stab an einem Ast gebrochen ist.

### 3.3.4 Bestimmung der mittleren Jahrringbreite

Vor dem Biegeversuch wurde zusätzlich noch die Anzahl der Jahrringe und die mittlere Jahrringbreite bestimmt. Die Jahrringbreite wurde an beiden Seiten senkrecht zu den laufenden Jahrringen ermittelt und anschließend gemittelt.

Diese beiden Längen werden addiert und durch die Summe der durch die Linie geschnittenen Jahrringe  $z_1$  geteilt. Dies ergibt die mittlere Jahrringbreite, welche in die Auswertung mit einfließt.

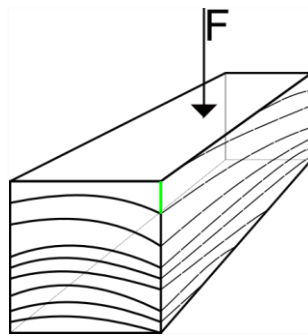


$$b_m = \frac{2l_1 + l_2 + l_3 \dots}{2z_1 + z_2 + z_3 \dots} [mm]$$

Abbildung 8: Bestimmung der mittleren Jahrringbreite der Holzprobennach DIN52181.

Von der Mitte des dem Mark am nächsten gelegenen Jahrringstückes wird eine auf die Jahrringe senkrecht stehende Linie zur gegenüberliegenden Querschnittskante gezogen. Die Länge wird in mm bestimmt und die Jahrringe  $z_{1-3}$  gezählt. Konnten nicht alle Jahrringe mit der Linie  $l_1$  erfasst werden, wird vom selben Jahrring ausgehend eine zweite Linie zur gegenüberliegenden Querseite gezogen. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt bis alle Jahrringe erfasst sind. Die Mittlere Jahrringbreite errechnet sich dann mit Hilfe der Formel.

### 3.3.5 Bestimmung der Faserabweichung



**Abbildung 9:** Bestimmung der mittleren Faserabweichung der Holzproben. Grün: Startwert Rot: Faserabweichung

Aufgrund der geringen Probelänge von nur 180mm wurde lediglich eine Faserabweichung der Jahrringe berücksichtigt. Eine Abweichung durch Drehwuchs wurde nicht berücksichtigt. Bestimmt wurde die Abweichung in mm auf die vollständige Probelänge und auf beiden Seiten. Der Wert wird anschließend gemittelt. Bei den Biegeversuchen wurde zusätzlich darauf geachtet, dass sich das Mark immer unterhalb der Holzprobe befindet.

### 3.4 Durchführung der Biegeversuche:



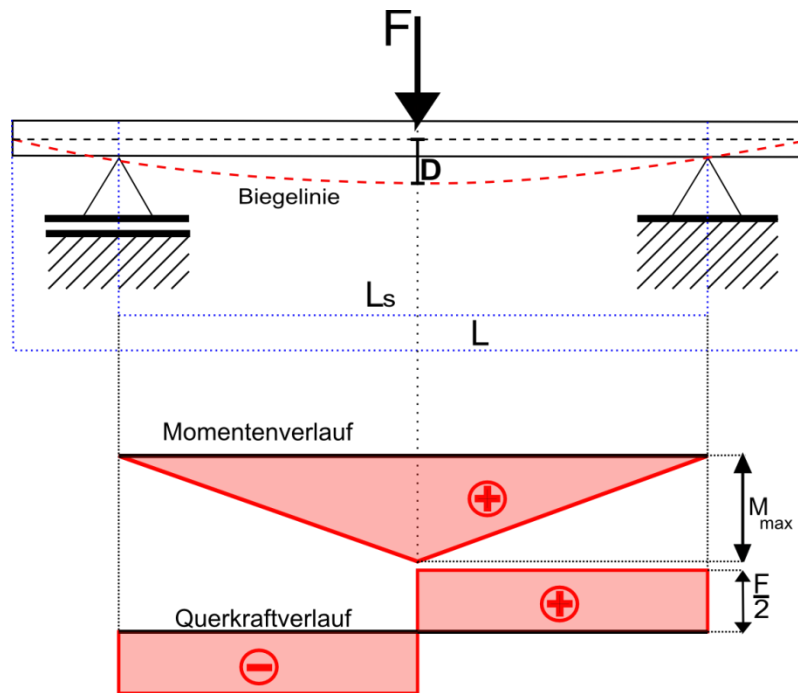
**Abbildung 10:** Prüfmaschine mit oberem und unterem Druckkolben und der Auflagervorrichtung. Bewegliches Auflager links und festes Auflager rechts.

Die Versuche wurden innerhalb von einer Woche in der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL in Brimensdorf durchgeführt. Die erforderliche Druckprüfmaschine steht in der Forschungseinheit für Gebirgshydrologie und Wildbäche. Die obere Druckplatte ist mit einem Sensor ausgestattet, der die gemessene Kraft, die die Holzprobe auf das obere Auflager ausübt, an die Maschine weiterleitet. Von der Maschine aus wird das Signal an einen Computer gesendet, welcher die Werte in dem Programm „LabView“ graphisch darstellt. Pro Sekunde werden ca. 3 Datensätze gespeichert bestehend aus dem Betrag der Auslenkung des unteren Druckkolbens in mm und der Kraft in N. Die Sensorik misst auf 1 N und 0.001mm genau.

Vor jedem Durchlauf ist es wichtig, den unteren Druckkolben so einzustellen, dass der Prüfkörper die obere Druckplatte gerade nicht berührt. Kontrolliert werden kann dies mit der Kraftanzeige an der Maschine. Nach der Einstellung des Druckkolbens, muss der Kraftanzeiger und der Weganzeiger auf Null feinjustiert werden, damit die Maschine die richtigen Daten sendet. Da die Versuche weggesteuert sind, wird anschließend die Amplitude eingestellt, die der Kolben nach oben fährt. Einige Probedurchläufe mit ähnlichen Holzstücken gaben Aufschluss darüber, bei welcher Auslenkung die Proben in etwa brechen. Danach wurde sie auf 20mm eingestellt. Fast alle Holzproben brachen in diesem Bereich, nur bei zwei Proben musste der Druckkolben anschließend noch manuell bis zum Bruch nach oben gefahren werden. 60 Sekunden benötigt der Druckkolben um die 20mm nach oben zu fahren. Dies entspricht einer konstanten Geschwindigkeit von  $0,33 \frac{mm}{s}$ . Da ein Auflager beweglich ist, musste die Holzprobe zwischen 2 rechteckigen Holzklötzen eingespannt werden. Ein Holzklotz berührt dabei das feste Auflager. Das bewegliche Auflager wird bis zum gegenüberliegenden Holzklotz gerollt. Nun ragt das Probestück an beiden Seiten exakt 15mm über den Auflagepunkt hinaus. Dies ergibt eine Stützweite  $s$  zwischen den Auflagern von 150mm und einen Kraftangriffspunkt genau bei der Hälfte der Holzprobe. Da die Größe der Probehölzer nicht der Norm entspricht, mussten die Auflager neu angefertigt werden. Sie haben einen Durchmesser von 3cm.

### 3.5 Statik und Materialkennwerte der Holzproben

Der Biegestab wird durch die aufgrund von Querkraften hervorgerufenen Biegemomente belastet. Abbildung 11 zeigt den Querkraft- und Momentenverlauf wie er mit Hilfe des Schnittprinzips ermittelt wird. Die Kräfte wirken stets senkrecht zur Probenachse. Die Durchbiegung  $D$  wird mittels der Maschine gesteuert, die Kraft  $F$  wird gemessen. Das Moment berechnet sich aus der Kraft multipliziert mit dem Hebelarm. Deshalb wirkt in der Mitte das grösste Moment  $M_{\max}$ , welches das Holz an dieser Stelle brechen lässt.



**Abbildung 11:** Schema der Momenten- und Querkraftverläufe während der 3 Punkt Belastung mit Kraft  $F$  im Stab.  $M_{\max}$  maximales Moment, festes Auflager rechts, bewegliches Auflager links,  $D$  Durchbiegung des Probestückes mit Biegelinie,  $L$  Länge des Stabes,  $L_s$  Abstand der Auflager.

Aus den beiden Parametern der Kraft  $F$  und der Durchbiegung  $D$  kann mit folgender Formel die Spannung  $\sigma$  bestimmt werden. Unter der Spannung versteht man die Kraft pro Flächeneinheit, die in der Schnittfläche des Probekörpers wirkt.

$$\sigma = \frac{3}{2} * \frac{F * L_s}{h^3}$$

Die Dehnung  $\varepsilon$  ist eine maßstabslose Größe die sich aus der Durchbiegung und dem Trägheitsmoment  $I$  berechnet. Sowohl bei der Spannung wie auch bei der Dehnung wird der Einfluss der Probenhöhe, die im Millimeter Bereich schwankt, durch das Teilen in der dritten Potenz minimiert.

$$\varepsilon = \frac{72 D I}{L^2 h^3} \qquad I = \frac{bh^3}{12}$$

Das komplexe E Modul berechnet sich aus

$$E_K = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{D} \left( \frac{L_s^3}{48I} \right)$$

Da bei einem Dreipunktbiegeversuch Querkräfte entstehen, treten auch Schubspannungen auf. Das komplexe E-Modul setzt sich also aus dem Biegemodul und dem Schubmodul zusammen. Das Schubmodul berechnet sich durch folgende Formel.

$$G = \frac{\alpha}{\tau}$$

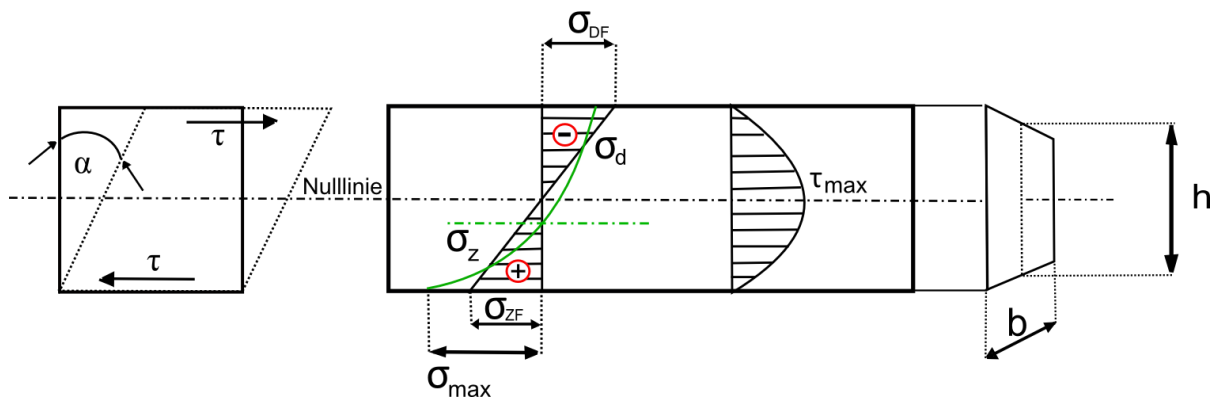
Da eine Messung des Winkels  $\alpha$  während der Versuche nicht möglich ist, wird für den Wert des Schubmoduls eine Konstante angenommen. Nach KOLLMANN (1968) liegt das Verhältnis zwischen Biegemodul und dem Schubmodul  $\frac{E_B}{G}$  im Mittel bei 18, dies gilt für Fichtenholz mit einer Dichte zwischen  $400-600\text{kg/m}^{-3}$  und einer Holzfeuchte von  $u=12\%$  und nur bei Biegeversuchen laut DIN52186. Das Schubmodul lässt sich also über folgende Formel annähernd berechnen.

$$G = \frac{3}{10} \frac{E_B}{G} \frac{L_s}{bh}$$

$E(B)$  kann nun mit folgender Formel berechnet werden.

$$E_B = \frac{F}{D} \left( \frac{L_s^3}{48I} + \frac{3}{10} \frac{E_B}{G} \frac{L_s}{bh} \right)$$

Das E Modul aus reiner Biegung  $E(B)$  ist somit größer als das komplexe E Modul  $E(\kappa)$ . Die Abweichung beträgt bei meinen Messungen 11.3 % mit einer geringen Standardabweichung von nur 0.044. Für die statistische Auswertung wird das komplexe E Modul verwendet, dies ermöglicht einen Vergleich mit anderen Studienergebnissen. Das E Modul aus reiner Biegung  $E(B)$  kann mit den Materialkennwerten aus der Holztechnik verglichen werden.

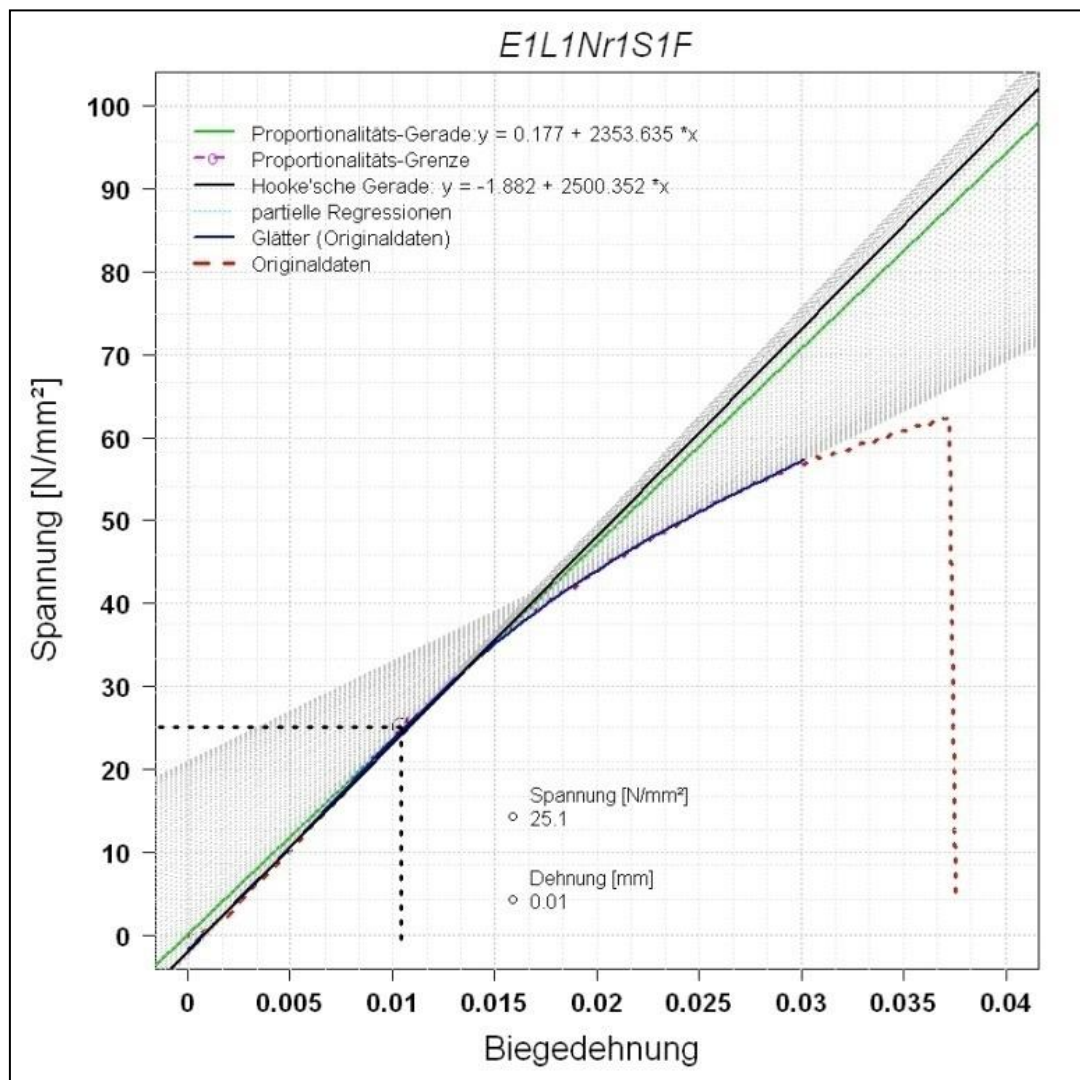


**Abbildung 12:** Schema der auftretenden Quer ( $\sigma$ )- und Schubkräfte ( $\tau$ ) während der 3 Punkt Belastung im Stab mit der Breite  $b$  und Höhe  $h$ .  $\sigma_{\max}$  Biegefestigkeit,  $\sigma_{DF}$  Druckfestigkeit,  $\sigma_{ZF}$  Zugfestigkeit,  $\sigma_d$  Druckspannung,  $\sigma_z$  Zugspannung,  $\tau$  Schubspannung,  $\tau_{\max}$  maximale Schubspannung.

Aufgrund des Biegemoments entstehen, wie in Abbildung 12 dargestellt, im oberen Bereich des Probestücks negative Zug-, im unteren positive Druckspannungen. Dazwischen liegt die Nulllinie an der keine Spannungen herrschen. Die Fließkurven des Holzes für Druck- und Zugbeanspruchung sind nicht symmetrisch. Da die Zugfestigkeit durchschnittlich 2 mal so hoch ist wie die Druckfestigkeit (WAGENFÜHR, 2012), kommt es, wie in Abbildung 11 zu sehen, zu einer Verschiebung der Nulllinie der Spannung hin zur Zugseite. Dies geschieht

solange, bis die Zugspannung die maximale Zugfestigkeit des Holzes erreicht hat, dann bricht das Holz. Diese Zugspannung bezeichnet man als Biegefestigkeit  $\sigma_{\max}$  des Holzes.

Zur Berechnung der Elastizitätsgrenzen wurden die Daten mit Hilfe der Statistiksoftware R in der Version 2.15.1. ausgewertet. Trägt man die Spannung und Dehnung in ein Diagramm ein, zeigt sich ein linearer Anstieg im ersten Teil des Graphen. Das Ende dieses Bereichs bilden die Elastizitätsgrenzen. Zunächst wurden die Datenpunkte geglättet, in der Abbildung\_\_ blau dargestellt, um eine stetig steigende Kurve zu erhalten. Die Hook'sche Gerade wurde dann mit Hilfe einer linearen Regression durch die Punkte 5 bis 15 der Messung gelegt. Die ersten Punkte wurden aufgrund ihrer oft starken Abweichung ausgelassen. Die Steigung der Hook'schen Gerade ist das E Modul. Dieses graphisch bestimmte E Modul weicht nur geringfügig vom rechnerisch bestimmten ab und wurde bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.



**Abbildung 13:** Spannungs- Dehnungs- Diagramm eines Probekörpers der Lärche mit Darstellung der Hook'schen Gerade (schwarz) und der Elastizitätsgerade (grün). Die Regressionsgeraden sind grau schraffiert. Die Geradengleichungen und Elastizitätsgrenzen sind in der Legende angegeben.

Um die Elastizitätsgerade zu bestimmen, wurde von jedem Punkt aus eine Regressionsgerade durch die folgenden 10 Punkte gelegt (siehe Abbildung 13 grauer Bereich). Die

Elastizitätsgrenze wurde auf 5% Abweichung der Steigung der Regressionsgeraden von der Hook'schen Geraden festgelegt. Der fünfte Punkt der ersten Regressionsgeraden, die 5% abweicht, markiert die Elastizitätsgrenzen der Spannung und Dehnung, die als Variablen für die weitere Auswertung verwendet werden.

### 3.6 Statistische Analysen

Ziel der Analyse war es, mittels deskriptiver und explorativer Statistik die Unterschiede der vier Höhenstufen und die Ergebnisse des CO<sub>2</sub>Versuchs zu analysieren und darzustellen. Um die Daten auswerten zu können, mussten die 50-150 Datensätze pro Probeholz vorher bearbeitet werden, damit die Spannungs-Dehnungskurven alle im Ursprung beginnen. Dazu wurde jener Wert der Durchbiegung gleich Null gesetzt, der beim ersten Ausschlag der Kraft verzeichnet wurde. Die restlichen Werte wurden dann um den Betrag subtrahiert. Da die Messung der Datenpaare aus Dehnung und Kraft nicht in konstanten Abschnitten erfolgte, musste für die Bestimmung der Durchschnitts- und Mediankurven eine Interpolation der Werte alle 20N und 0.2mm durchgeführt werden. Die Interpolation wurde jeweils zwischen 5 Punkten berechnet, um die Bedeutung der Abweichung einzelner Werte zu minimieren.

Für die statistischen Untersuchungen zu dieser Arbeit wurde ein Signifikanzniveau von  $\alpha=0.05$  gewählt. Die Korrelationen zwischen den Variablen wurden zunächst mit dem Spearman Rangsummentest (Spearman-rho-Wert) geprüft. Dieser nicht parametrische Test hat den Vorteil, dass die Daten nicht normalverteilt sein müssen und auch nicht lineare Abhängigkeiten bewiesen werden können (FORTIN, 2005). In der weiteren Analyse wird auch das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  verwendet. Es gibt den erklärenden Anteil der Variabilität einer abhängigen Variablen durch ein statistisches Modell an. Es berechnet sich aus dem Korrelationskoeffizienten zum Quadrat.

Aufgrund des komplexen großen Datensatzes und den zahlreichen Einflussfaktoren wurde die Kovarianzanalyse (auch ANCOVA oder Mixed Effect Modells genannt) für eine genauere Betrachtung der Faktoren ausgewählt. Die Kovarianzanalyse verbindet die Varianzanalyse und die lineare Regressionsanalyse. Das Modell besteht aus einer Variablen, deren Abhängigkeit untersucht werden soll (abhängige Variable), einer oder mehrerer Ko-Variablen und einer oder mehrerer unabhängiger Variablen. Ziel ist es den Einfluss der Ko-Variablen auf die abhängige Variable auszublenden, um eine mögliche Abhängigkeit der abhängigen Variablen von der interessierenden unabhängigen Variable zu beweisen (BAAYEN, 2008, STAHEL, 2000). Dabei können nur lineare Zusammenhänge dargestellt werden. Die Kovarianzanalyse liefert verschiedene Ergebnisse. Zum einen den P Wert, er beschreibt die Wahrscheinlichkeit ein solches Ergebnis zu erhalten, wenn die Nullhypothese zutrifft. Ist der P Wert kleiner als  $\alpha$ , kann die Nullhypothese verworfen werden, das heißt die Hypothese über einen Zusammenhang zwischen den Variablen ist bestätigt. Die Größe des p-Werts gibt keine Aussage über die Mächtigkeit und die Richtung des wahren Effekts (VENABLES, 1996). Der F Wert und der Freiheitsgrad hingegen beschreiben die Mächtigkeit des Modells. Je höher ihr Wert, desto stärker die Aussagekraft des Modells. Genau gibt der F Wert an, ob und wie stark sich zwei Stichproben hinsichtlich ihrer Varianz statistisch unterscheiden. Alle Werte über eins sind signifikant (CHAMBERS, 1992). Ein weiterer Output ist der y-Achsen- Abschnitt (auch Intercept oder Startpunkt, siehe Anhang Kapitel 9.5). Er kann als Mittelwert aller

Ergebnisse interpretiert werden, wenn alle Variablen auf null gesetzt werden. Die positive oder negative Abweichung (auch Value oder Steigung) von diesem Wert ist für jede Variable pro gemessene Einheit angegeben. Dadurch läßt sich aus den Modellen die Veränderung der unabhängigen Variablen in Abhängigkeit von den abhängigen Variablen darstellen (siehe Abbildung 19, Kapitel 4.7).

Die Kovarianzanalyse ist ein parametrischer Test, das bedeutet, dass die Daten bestimmte Voraussetzungen erfüllen müssen, damit das Resultat valide ist. Zu den Anforderungen zählen eine bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Daten (z.B. Normalverteilung) und die Homoskedastizität (Varianzhomogenität) Um diese Voraussetzungen zu überprüfen, wurde eine Residuenanalyse durchgeführt. Die Normalverteilung wurde mit dem Quantil-Quantil-Diagramm überprüft, zusätzlich wurde ein Histogramm der Residuen erstellt, um die Schiefe der Verteilung zu beurteilen. Die Varianzhomogenität wurde mit Hilfe des Tukey-Anscombe-Plots überprüft. Hierbei wurde sowohl die abhängige als auch jede Ko-Variablen betrachtet. Mögliche Ausreißer wurden genauer betrachtet. Bei kategorischen Variablen wurde die Verteilung mit Boxplots analysiert. Das Modell wurde nur verwendet, wenn 95% der Werte innerhalb der zweifachen Standardabweichung liegen und 98% innerhalb der dreifachen (die Residuenanalyse ist anhand eines Beispiels im Anhang dargestellt Kapitel 9.3). Da es sich um in der Natur aufgenommene Daten handelt und die Stichprobe mit 122 Messungen relativ klein ist, treffen niemals alle Voraussetzungen vollständig zu. Die Abweichung ist aber bei allen Modellen nicht zu stark. Eine Bearbeitung der Daten durch eine Logarithmische Funktion im Falle von Heteroskedastizität oder einer Quadratischen Funktion bei einer unbestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung war also nicht nötig. Eine weitere Voraussetzung ist, dass keine Abhängigkeit der Ko-Variablen untereinander besteht (FOX, 2002). Um dies zu vermeiden, wurden wie erwähnt, vorher die Korrelationen bestimmt und Variablen wie z.B. die Holzdicke und die Jahrringbreite nie zusammen im Modell analysiert. Die Statistiksoftware R in der Version 2.15.1 wurde für die statistische Auswertung der Daten und deren grafische Darstellung verwendet.

**Tabelle 2:** Übersicht über die verwendeten Variablen mit Abkürzungen und Einheiten

<b>Abhängige Variablen</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Einheit</b>
E-Modul Komplex	$E_{(K)}$	N/mm <sup>2</sup>
E-Modul Biegung	$E_{(B)}$	N/mm <sup>2</sup>
Dehnung	$\varepsilon$	%
Spannung	$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>
Maximale Dehnung	$\varepsilon_{Max}$	%
Maximale Durchbiegung	$D_{max}$	mm
Bruchlast	$F_{max}$	N
Biegefestigkeit	$\sigma_{Max}$	N/mm <sup>2</sup>
Elastizitätsgrenze Dehnung	$P(\varepsilon)$	%
Elastizitätsgrenze Spannung	$P(\sigma)$	N/mm <sup>2</sup>
Elastizitätsgrenze Durchbiegung	$P(D)$	mm
Elastizitätsgrenze Kraft	$P(F)$	N
<b>Unabhängige Variablen</b>		
Baumart	Fichte, Lärche, Bergföhre	F,L,P
$CO_2$	$CO_2$ erhöht,Kontrollbäume	E, A
Erwärmung	Erwärmt, nicht erwärmt	W,U
Höhenstufe	1600-1800m, 1800-2000m, 2000-2200m., >2200m	1,2,3,4
<b>Ko-Variablen Holzprobe</b>		
Holzdicke	$p$	kg/m <sup>3</sup>
Holzfeuchte	$u$	%
Faserabweichung	$f$	mm
Durchmesser Äste	$z$	mm
Jahringbreite	$b$	mm
Durchmesser	$d$	mm
Krümmung	$k$	mm
Ast beim Bruch	$a$	ja/nein
<b>Unabhängige Variablen Baumeigenschaften</b>		
Höhe des Abschnitts im Baum	$H_{(a)}$	m
Alter des Baums	$A_{(b)}$	a
Höhe des Baums	$H_{(b)}$	m
Durchmesser des Abschnitts	$D_{(a)}$	cm
Brusthöhendurchmesser	BHD	cm

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Einflüsse der Variablen aus den Biegeversuchen

Da die Variablen in den unteren drei Höhenstufe andere Korrelationen zeigen als auf der Aufforstungsfläche, werden sie getrennt dargestellt. Das E Modul  $E_{(k)}$  zeigt keine Abhängigkeit von der Dehnung  $\varepsilon_{(B)}$ , aber von der Biegefestigkeit  $\sigma_{(B)}$  im Stab. Gleich verhält es sich mit den Elastizitätsgrenzen  $P$ , auch hier nimmt die Spannung  $P_{(\sigma)}$  mit steigendem E Modul  $E_{(k)}$  zu. Von den Holzeigenschaften hängt das E Modul  $E_{(k)}$  vor allem von der Holzdicke ab. Einen negativen Zusammenhang zeigt das E Modul  $E_{(k)}$  von der Jahrringbreite. Nur einen schwachen bis keinen negativen Zusammenhang haben die Holzfeuchten, die Äste im Stab, die Faserabweichung und die Krümmung. Je höher die maximale Dehnung  $\varepsilon_{(B)}$ , desto höher ist auch die Biegefestigkeit. Die maximale Dehnung  $\varepsilon_{(B)}$  hat keinen Einfluss auf die Elastizitätsgrenzen, ist aber abhängig von den Ästen, der Jahrringbreite und der Holzfeuchte. Die Biegefestigkeit  $\sigma_{(B)}$  hat dagegen einen kleinen Einfluss auf die Elastizitätsgrenze der Spannung und ist abhängig von den Ästen und der Holzdicke. Im Gegensatz zum E Modul und der Biegefestigkeit steigt die maximale Dehnung mit der Jahrringbreite und fällt mit der Holzdicke. Untereinander zeigen die Elastizitätsgrenzen eine große Abhängigkeit voneinander. Das ist der Grund, weshalb bei der weiteren Auswertung nur noch die der Dehnung  $P_{(\varepsilon)}$  betrachtet wird. Die Elastizitätsgrenzen zeigen keine starke Abhängigkeit von den Variablen des Holzes. Es wird ersichtlich, dass insgesamt die Holzdicke den größten positiven Einfluss auf die abhängigen Variablen hat und die Jahrringbreite und die Astigkeit den höchsten negativen. Die Krümmung, Faserabweichung und Holzfeuchte spielen keine entscheidende Rolle. Bei den unabhängigen Variablen der Holzprobe wird eine starke Abhängigkeit der Jahrringbreite von der Holzdicke deutlich. Außerdem trat eine höhere Krümmung der Hölzer auf bei einer größeren Holzfeuchte und kleineren Jahrringbreite. Die Faserabweichung und der Bruch durch einen Ast sind unabhängig von den anderen Variablen.

**Tabelle 3:** Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho zwischen den Variablen bei der Lärche auf der Aufforstungsfläche: Komplexes E Modul  $E_{(k)}$ , maximale Durchbiegung  $D_{(B)}$ , Biegefestigkeit  $\sigma_{(B)}$ , Elastizitätsgrenze Durchbiegung  $P_{(D)}$ , Elastizitätsgrenze Kraft  $P_{(F)}$ , Elastizitätsgrenze Dehnung  $P_{(\varepsilon)}$ , Elastizitätsgrenze Spannung  $P_{(\sigma)}$ , Holzfeuchte  $u$ , Holzdicke  $p$ , Krümmung des Stabes  $k$ , Faserabweichung  $f$ , Ast in der Mitte des Stabes  $a$  und mittlere Jahrringbreite  $b$ .

	$E_{(k)}$	$\varepsilon_{(B)}$	$\sigma_{(B)}$	$P_{(D)}$	$P_{(\varepsilon)}$	$P_{(F)}$	$P_{(\sigma)}$	$u$	$p$	$k$	$f$	$a$
$\varepsilon_{(B)}$	0.00											
$\sigma_{(B)}$	0.54	0.65										
$P_{(D)}$	-0.13	-0.09	0.00									
$P_{(\varepsilon)}$	-0.10	0.18	0.09	0.85								
$P_{(F)}$	0.36	0.00	0.26	0.79	0.68							
$P_{(\sigma)}$	0.49	0.00	0.40	0.64	0.76	0.9						
$u$	-0.25	0.35	-0.06	0.00	0.01	0.13	0.00					
$p$	0.65	-0.15	0.37	0.11	0.00	0.31	0.35	-0.20				
$k$	0.03	-0.22	-0.11	-0.19	0.00	0.12	-0.16	-0.47	0.29			
$f$	-0.11	0.10	0.00	-0.11	0.02	0.00	0.00	0.04	0.04	-0.02		
$a$	-0.14	-0.47	-0.46	-0.23	-0.20	-0.23	-0.19	0.00	0.00	0.21	0.24	
$b$	-0.44	0.35	-0.08	0.27	0.22	-0.41	-0.45	0.12	-0.74	-0.33	0.02	0.11

Bei den Höhenstufen 1-3 zeigt das E Modul eine starke Abhängigkeit von der Biegefestigkeit und nur eine schwache von der maximalen Dehnung, dies ist mit der Aufforstungsfläche vergleichbar. Auch hier ist die Elastizitätsgrenze  $P_{(\sigma)}$  stark positiv abhängig vom E Modul und die Elastizitätsgrenze  $P_{(\epsilon)}$  negativ. Bei den unabhängigen Variablen der Holzprobe ist ein steigendes E Modul hier weniger von einer größeren Holzdicke als von einer kleineren Jahrringbreite abhängig. Großen negativen Einfluss haben außerdem die Krümmung und ein Ast in der Mitte des Stabes. Auch hier gibt es keinen negativen Zusammenhang mit der Holzfeuchte und der Faserabweichung. Es gibt einen kleinen positiven Zusammenhang zwischen der maximalen Dehnung und der Biegefestigkeit. Im Gegensatz zu der Aufforstungsfläche hat die maximale Dehnung hier einen positiven Einfluss auf die Elastizitätsgrenzen der Dehnung und einen negativen auf die Kraft. Bei den unabhängigen Variablen hat nur die Astigkeit einen Einfluss. Die Biegefestigkeit  $\sigma_{(B)}$  hat auch hier einen Einfluss auf die Elastizitätsgrenze der Spannung und ist abhängig von den Ästen, der Holzdicke und der Jahrringbreite. Im Gegensatz zu den Proben der Aufforstungsfläche zeigen die Elastizitätsgrenzen  $P_{(\sigma)}$  und  $P_{(\epsilon)}$  hier keine Abhängigkeit untereinander. Die Elastizitätsgrenzen zeigen keine starke Abhängigkeit von den Variablen des Holzes mit Ausnahme der Jahrringbreite bei  $P_{(\sigma)}$ , dies ist analog zu der Aufforstungsfläche. Von den unabhängigen Variablen haben insgesamt die Jahrringbreite, die Krümmung und die Astigkeit den größten Einfluss. Keinen Einfluss haben wiederum die Faserabweichung und die Holzfeuchte. Auch bei den Holzproben der Höhenstufe 1-3 ist wieder die positive Abhängigkeit des E Modul und der Biegefestigkeit von einer größeren Holzdicke und die negative Abhängigkeit von einer größeren Jahrringbreite auffällig. Die Holzdicke ist hier nicht so stark abhängig von der Jahrringbreite, und die Krümmung wird durch die Astigkeit und Holzdicke gesteuert.

**Tabelle 4:** Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho zwischen den Variablen bei der Lärche und Fichte in der 1. bis 3. Höhenstufe von 1600 bis 2200m: Komplexes E Modul  $E_{(k)}$ , maximale Durchbiegung  $D_{(B)}$ , Biegefestigkeit  $\sigma_{(B)}$ , Elastizitätsgrenze Durchbiegung  $P_{(D)}$ , Elastizitätsgrenze Kraft  $P_{(F)}$ , Elastizitätsgrenze Dehnung  $P_{(\epsilon)}$ , Elastizitätsgrenze Spannung  $P_{(\sigma)}$ , Holzfeuchte  $u$ , Holzdicke  $p$ , Krümmung des Stabes  $k$ , Faserabweichung  $f$ , Ast in der Mitte des Stabes  $a$  und mittlere Jahrringbreite  $b$ .

	$E_{(k)}$	$\epsilon_{(B)}$	$\sigma_{(B)}$	$P_{(D)}$	$P_{(\epsilon)}$	$P_{(F)}$	$P_{(\sigma)}$	$u$	$p$	$k$	$f$	$a$
$\epsilon_{(B)}$	-0.24											
$\sigma_{(B)}$	0.74	0.34										
$P_{(D)}$	-0.26	0.23	-0.13									
$P_{(\epsilon)}$	-0.45	0.46	0.00	0.63								
$P_{(F)}$	0.73	-0.26	0.64	0.32	-0.02							
$P_{(\sigma)}$	0.84	-0.25	0.80	0.00	0.00	0.79						
$u$	0.01	0.02	-0.15	0.00	0.00	0.00	0.00					
$p$	0.19	0.28	0.51	0.04	0.24	0.13	0.29	-0.29				
$k$	-0.48	-0.04	-0.27	0.12	-0.31	-0.32	-0.33	-0.12	0.32			
$f$	0.04	-0.20	0.20	-0.15	0.13	0.00	0.15	0.00	0.34	-0.07		
$a$	-0.54	-0.47	-0.66	0.00	0.00	-0.38	-0.42	0.09	-0.35	-0.40	0.06	
$b$	-0.45	0.11	-0.48	0.12	0.16	-0.44	-0.50	0.32	0.35	0.23	-0.09	-0.21

## 4.2 Kennwerte der mechanischen Holzeigenschaften

Da die Messungen gemäß der DIN52186 durchgeführt wurden, lassen sich die Werte mit anderen Messungen aus der Holztechnik vergleichen. Hier sind Werte zur Holzdicke, dem E Modul und der Biegefestigkeit zu finden. Da keine Werte für die *Pinus uncinata* oder *Pinus mugo* gefunden wurden, sind die Werte der *Pinus Sylvestris* zum Vergleich gelistet. Die maximale Dehnung wird meist nicht geführt, da diese Eigenschaft für die Bautechnik nicht entscheidend ist. Bei der Holzdicke liegt die Fichte unter der Waldföhre, die Lärche besitzt die höchsten Werte, das gleiche gilt für das E Modul und die Biegefestigkeit. Bei der Holzdicke wird bei der Fichte die Varianz der Werte deutlich. Der Wert aus der Holztechnik liegt bei 430, die Werte der unteren beiden Höhenstufen liegen darunter, wohingegen die dritte weit darüber liegt. Bei der Lärche liegen alle Werte knapp unter denen aus der Literatur. Beim E Modul liegen die höchsten Werte in der untersten Höhenstufe und sind bei der Fichte knapp 30% unter den Vergleichswerten. Bei der Lärche sind die Werte ebenfalls 30% niedriger und außerhalb der normalen Schwankungsbreite. Bei der Biegefestigkeit zeigt sich ein anderes Bild. Hier liegt die Fichte in 2 Höhenstufen sogar über den Vergleichswerten. Bei der Lärche liegt die erste Höhenstufe bei den Vergleichswerten, die anderen Stufen liegen darunter. Der Vergleich bei der Bergföhre bietet nur einen Anhaltspunkt. Die Werte liegen bei der Holzdicke weit darüber beim E Modul um rund drei viertel darunter und bei der Biegefestigkeit um 40 Prozent darunter. Die Unterschiede zwischen den Baumarten und den Höhenstufen werden später genauer erläutert, sie sind zur Vollständigkeit aber dargestellt.

**Tabelle 5:** Holzdicke, E Modul und Biegefestigkeit der Messungen mit Standardabweichungen S und Vergleichswerte aus der Holztechnik. Gelb: Jeweils höchster Wert der Baumart., Literaturwerte mit Abweichungen: DIN 68364 (1978), NIEMTZ (1981), KOLLMANN (1955), SELL (1997), MÄRKI (2005)

Höhenstufe	Baumart	Holzdicke	E Modul Biegung		Biegefestigkeit		
		[kg/m <sup>3</sup> ]	S	[N/mm <sup>2</sup> ]	S	[N/mm <sup>2</sup> ]	S
1	Picea Abies	395.2	63.3	7755	1251	78.3	12.1
2		379.1	53.5	5377	720	67.1	6.1
3		494.6	68.6	5855	1229	83.1	8.0
1	Larix Decidua	495.1	53.6	9046	1976	96.3	21.2
2		462.2	41.3	7588	1812	82.5	14.6
3		513.0	81.8	6928	1640	91.7	9.6
4		508.5	48.8	3319	566	61.6	12.8
4	Pinus uncinata	539.7	83.5	2500	281	54.0	8.8
Literaturwerte	Picea Abies	430	410-450	10500	10000-11000	73	68-78
	Larix Decidua	519	519-580	12800	12000-13800	96	93-99
	Pinus Sylvestris	495	460-530	10500	11000-12000	90	80-100

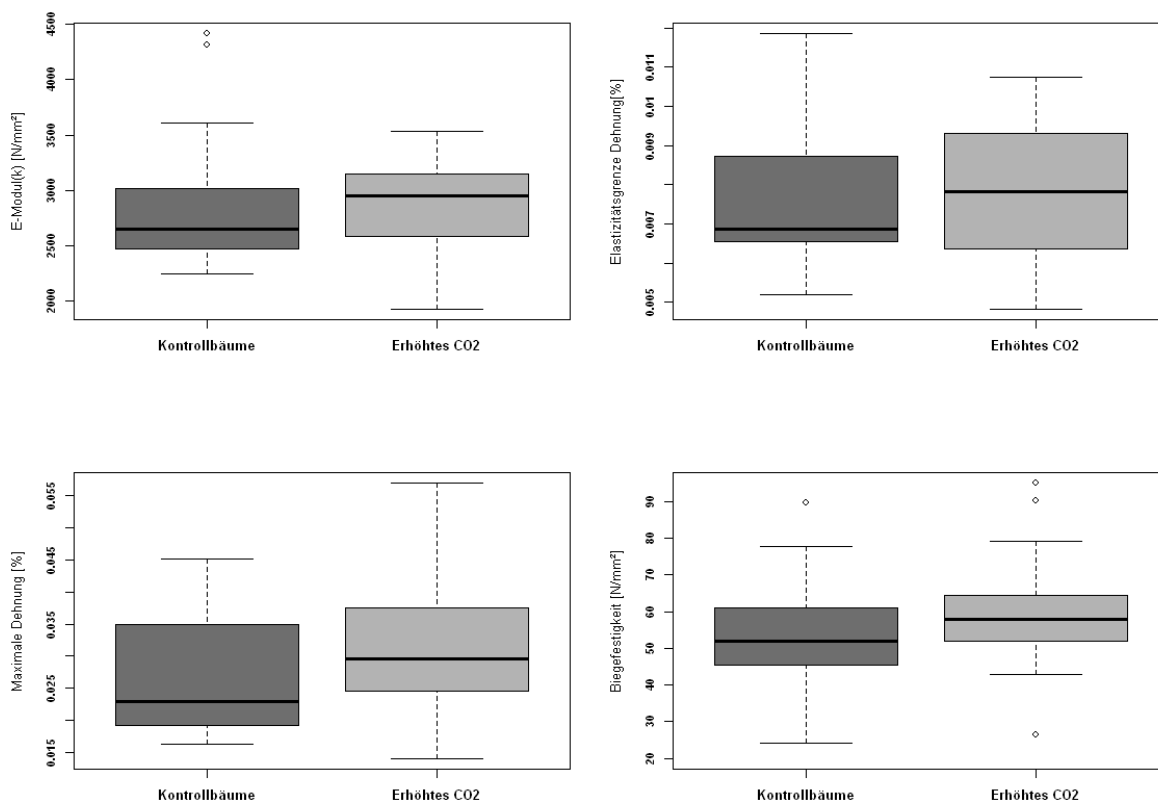
**Tabelle 6:** Elastizitätsgrenzen abgeleitet aus den Spannungs( $\sigma$ )-Dehnungskurven ( $\epsilon$ ) und Kraft(F)-Durchbiegungskurven(D) für die unterschiedlichen Baumarten in der ersten und vierten Höhenstufe. Dargestellt sind die Mittelwerte der Kurven mit Standardabweichung (S).

Höhenstufe	Baumart	P(D)	S	P(F)	S	P(S)	S	P( $\sigma$ )	S
		[mm]	[mm]	[N]	[N]	[%]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1	Picea Abies	1.58	0.33	117.0	35.2	0.0043	0.0008	27.6	4.9
1	Larix Decidua	1.67	0.48	137.3	53.5	0.0051	0.0014	30.7	10.8
4	Larix Decidua	2.76	0.55	111.4	26.4	0.0078	0.0016	21.6	5.1
4	Pinus Uncinata	3.12	0.48	98.8	19.7	0.0093	0.0011	20.2	3.1

Aufgrund der unterschiedlichen Berechnung der Elastizitätsgrenzen bei Vergleichsstudien, können die Werte nur bedingt verglichen werden. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Grenzen der Elastizität der verschiedenen Baumarten. Die Fichte besitzt im Verhältnis zur Lärche in der ersten Höhenstufe in allen 4 Kategorien niedrigere Werte. Das heißt, sie zeigt bereits bei einer geringeren Kraft und Durchbiegung eine irreversible Verformung. Allerdings besitzt die Lärche bei allen vier Werten eine grosse Streubreite, was die große Standardabweichung zeigt. In der vierten Höhenstufe ist die Lärche fast doppelt so dehnbar wie in der ersten, kann aber nur eine um rund 1/3 geringere Spannung im Holz aushalten bis die Elastizitätsgrenze erreicht ist. Vergleicht man die Bergföhre mit der Lärche in der vierten Höhenstufe, ist die Dehnung noch einmal größer, die ertragbare Kraft bzw. Spannung im Holz jedoch geringer.

### 4.3 Einfluss des CO<sub>2</sub>

Die kardinalskalierten Daten der mechanischen Holzeigenschaften der Versuchsbäume sind im Box-Whisker-Plot der Abbildung 14 dargestellt. Die beiden Whisker Linien sind auf die 1,5 fache Länge des Interquartilsabstands festgelegt, wenn die Werte nicht vorher enden. Werte außerhalb sind als Ausreißer dargestellt.



**Abbildung 14:** Box-Whisker-Plot der mit CO<sub>2</sub> begasten Bäume und Kontrollbäume auf der Aufforstungsfläche. Gegenüberstellen des E Moduls E(k), der Elastizitätsgrenze der Dehnung P(ε), der maximalen Dehnung D(ε) und der Biegefestigkeit σ(B).

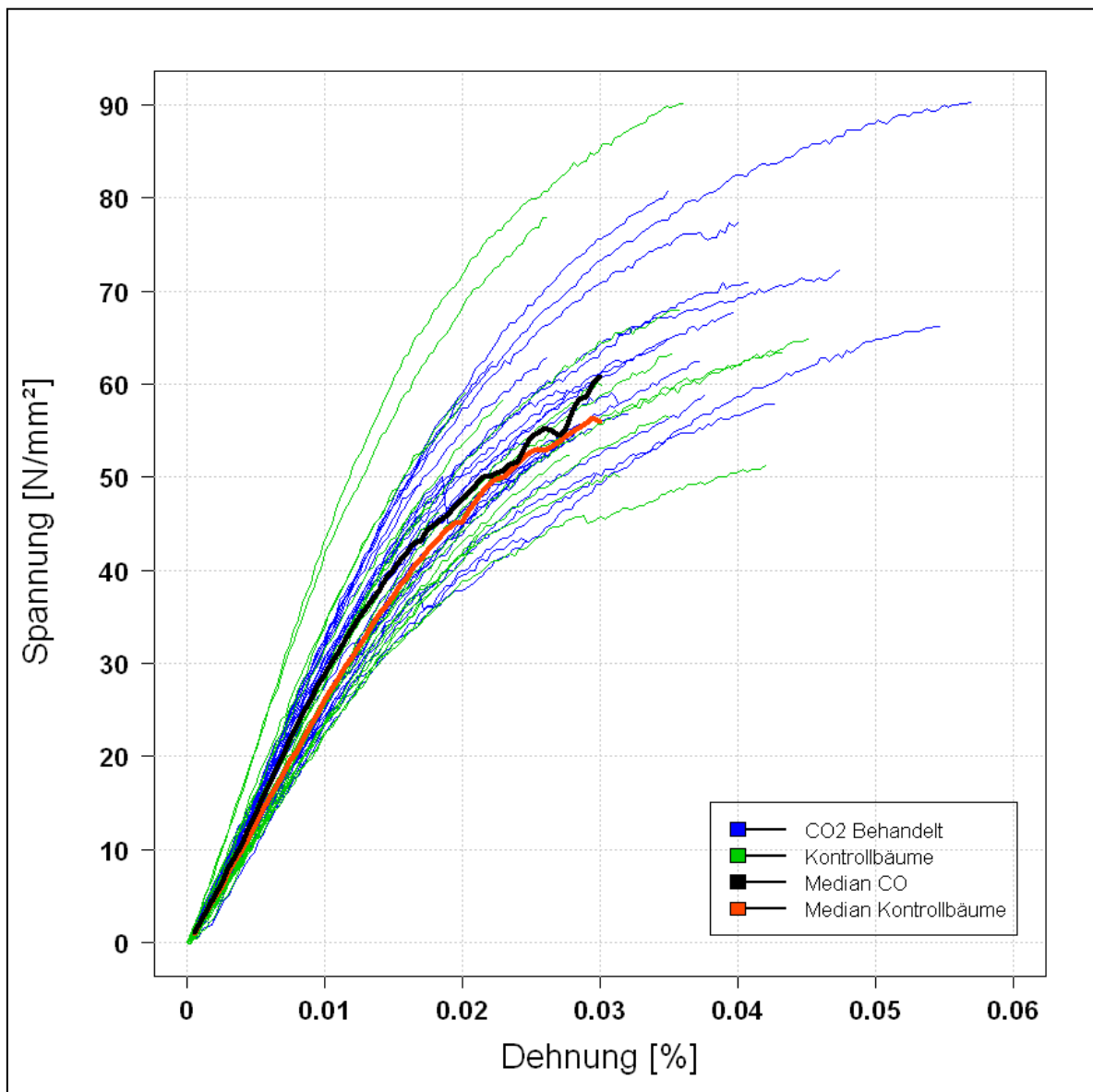
Beim E Modul liegen die beiden 25% Quartile der Kontrollbäume jeweils niedriger. Die mittleren 50% der Daten liegen im Bereich von 500 N/mm<sup>2</sup>. Der große Abstand der Whisker Linien zeigt die große Streuung der Werte. Bei den Kontrollbäumen gibt es zwei starke Ausreißer nach oben. Der Median liegt bei den Kontrollbäumen ebenfalls niedriger. Die Verteilung der Daten ist bei den Kontrollbäumen rechtsschief bei den CO<sub>2</sub> Bäumen linksschief. Das bedeutet, der Großteil der Kontrollbäume hat niedrigere Werte als die CO<sub>2</sub> Bäume, jedoch mit Ausreißern bei beiden. Bei der Elastizitätsgrenze der Dehnung ist kein Unterschied feststellbar, die Quartile streuen sehr stark. Zu erwähnen ist lediglich der Median, der bei den Kontrollbäumen niedriger liegt. Bei der maximalen Dehnung weisen die CO<sub>2</sub>Bäume wiederum höhere Werte auf, sowohl beim Median als auch bei den Grenzen der Quartile und der Whisker Linie. Allerdings streut die Box auch hier stark. Deutlicher wird es bei der Biegefestigkeit des Holzes, hier liegt wiederum der Median, die 25% Quartile und die Whisker Linie der Extremwerte bei den CO<sub>2</sub> Bäumen höher.

**Tabelle 7:** Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen des E Moduls E(K), der Biegefestigkeit  $\sigma_{Max}$ , der maximalen Dehnung  $\epsilon_{Max}$ , der Elastizitätsgrenze der Dehnung P( $\epsilon$ ) und der Elastizitätsgrenze der Spannung P( $\sigma$ ). Ko-Variablen, die keinen signifikanten Beitrag liefern, wurden während des Anpassens des Modells entfernt. Die abhängige Variable des CO<sub>2</sub> wurde als kategorische Variable (begast/nicht begast) hinzugefügt. Die Werte der abhängigen Variable der Holzproben, die demselben Abschnitt bzw. Baum entstammen, wurden durch das Modell gemittelt. Zusätzlich wurde die Interaktion zwischen dem CO<sub>2</sub> und der Holzdicke getestet.

Lärche CO <sub>2</sub>							
	DF	F-Wert	P-Wert		DF	F-Wert	P-Wert
<u>E(K)</u>	Ast	-	-	<u>P(<math>\epsilon</math>)</u>	Ast	-	-
	Holzdicke	1;31	12.53	0.001	Holzdicke	-	-
	Holzfeuchte	-	-	-	Holzfeuchte	-	-
	CO2	1;8	0.02	0.897	CO2	1;8	0.001
	CO2*Holzd.	1;31	0.15	0.698	CO2*Holzd.	-	-
<u><math>\sigma_{Max}</math></u>	Ast	1;9	17.63	0.002	<u>P(<math>\sigma</math>)</u>	Ast	-
	Holzdicke	1;9	6.47	0.031	Holzdicke	1;10	9.416
	Holzfeuchte	-	-	-	Holzfeuchte	-	-
	CO2	1;8	4.12	0.077	CO2	1;8	0.072
	CO2*Holzd.	1;9	0.57	0.471	CO2*Holzd.	1;10	0.017
<u><math>\epsilon_{Max}</math></u>	Ast	1;9	14.41	0.004			
	Holzdicke	-	-	-			
	Holzfeuchte	1;9	7.55	0.022			
	CO2	<b>1;8</b>	<b>6.47</b>	<b>0.034</b>			
	CO2*Holzd.	1;9	2.54	0.145			

Beim E Modul wurde kein signifikanter Einfluss des CO<sub>2</sub> festgestellt. Einziger signifikanter Einflussfaktor ist die Holzdicke. Das E Modul nimmt pro kg Holzdicke 4,83 N/mm<sup>2</sup> zu (SF: 1.749, F=2.76, P=0.020). Bei der Biegefestigkeit hat sowohl die Astigkeit als auch die Holzdicke einen signifikanten Einfluss. Bei den CO<sub>2</sub>Bäumen gibt es einen Trend zu einer größeren Biegefestigkeit. Eine signifikant größere maximale Dehnung (+0.0062%, SF= 0.0025) konnte bei den CO<sub>2</sub> Bäumen nachgewiesen werden. Der P-Wert ist zwar nur schwach signifikant, aber der F-Wert ist nicht zu niedrig. Die Elastizitätsgrenzen zeigen keinen

Einfluss durch Variablen, nur die Holzdicke hat Einfluss auf  $P(\sigma)$ . Das gleiche Modell wurde mit der Temperatur durchgeführt, hier war weder ein signifikanter Einfluss noch ein Trend erkennbar.

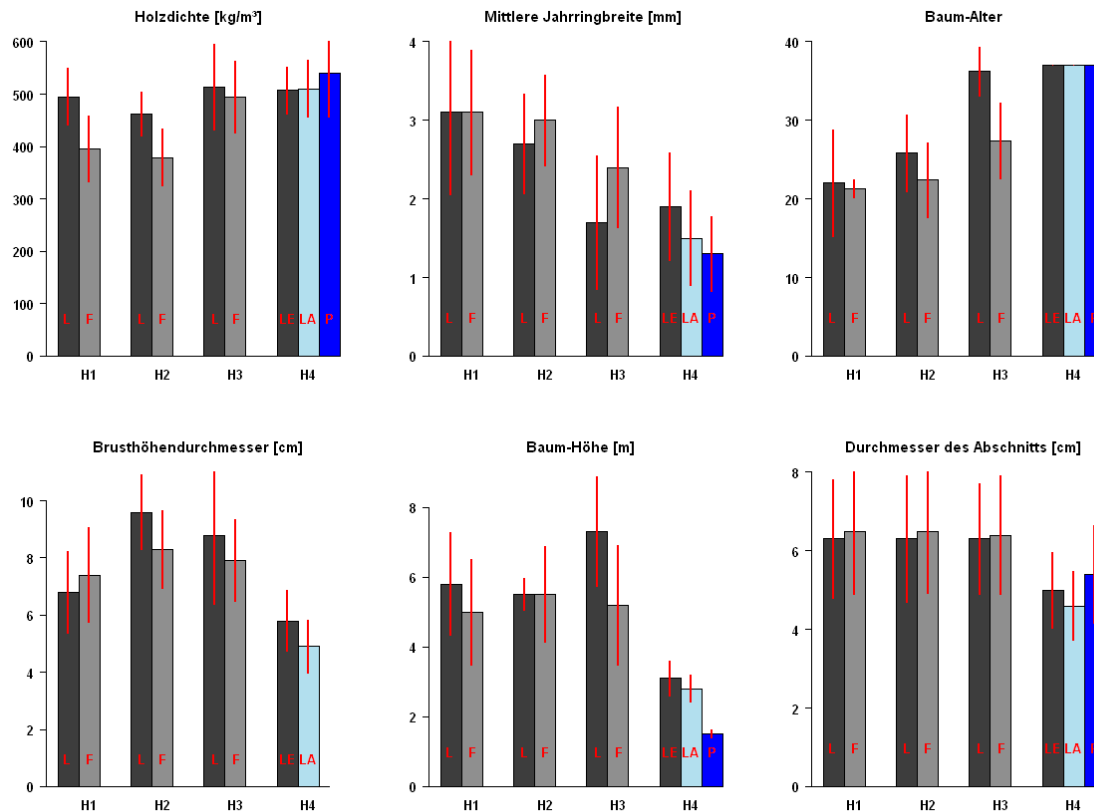


**Abbildung 15:** Darstellung aller Spannungs- Dehnungskurven der begasten Bäume und Kontrollbäume der Lärche auf der Versuchsfläche. Die dicken Linien stellen den Vergleich der alle 0,002 % Dehnung interpolierten Medianwerte aller Spannungs-Dehnungskurven dar.

Abbildung 15 gibt einen Überblick über alle Spannungs-Dehnungskurven der begasten und unbehandelten Bäume des  $CO_2$  Experiments. Die Medianwerte der Kontrollbäume liegen immer unterhalb von denen der begasten Bäume. Die Steigung und damit das E Modul ist geringer. Ab ca. 0,02% Dehnung schwanken die Werte, da bereits einige Holzproben gebrochen sind. Die Länge der Mediankurven hat keine Aussagekraft. Betrachtet man die einzelnen Kurven, werden zwei Ausreißer nach oben bei der Biegefestigkeit deutlich. Bei der maximalen Dehnung sind ebenfalls zwei Kurven auffällig. Beim E Modul, d.h. der Steigung der Kurven sind ebenfalls zwei auffällig größer als die anderen. Mit Ausnahme dieser Ausreißer wird deutlich, dass die  $CO_2$ Bäume später und bei einer höheren Spannung brechen.

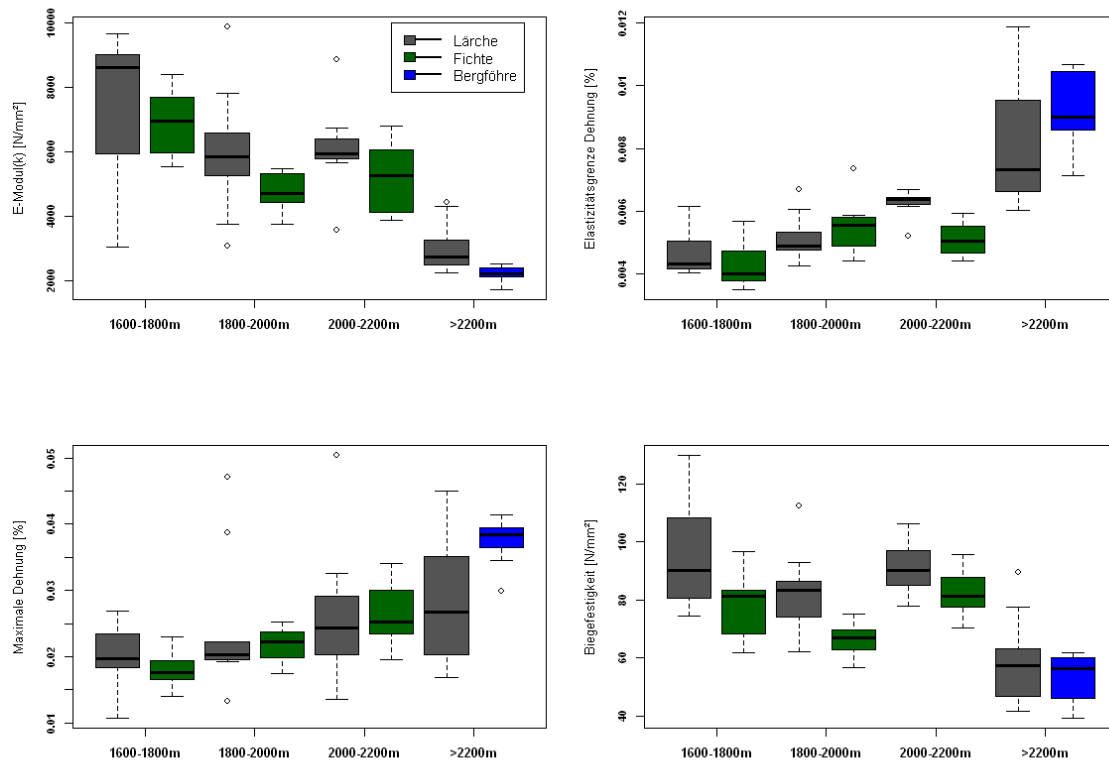
## 4.4 Einfluss der Höhenstufen

Um die Veränderungen der mechanischen Holzeigenschaften zu erklären, müssen die Variablen betrachtet werden, die sich mit der Höhe ändern und einen Einfluss ausüben.



**Abbildung 16:** Veränderung der gemessenen Variablen der Holzdicke, mittleren Jahringbreite, Baumalter, Brusthöhdurchmesser, Baumhöhe und Durchmesser des Abschnitts mit der Höhe. Dargestellt in den 4 Höhenstufen: H1 1600-1800m, H2 1800-2000m, H3 2000-2200m, H4 >2200m, F: Fichte, P: Bergföhre, L: Lärche, LE: Lärche begast, LA: Lärche unbegast, Die roten Balken stellen die Standardabweichung der Werte dar.

Die Holzdicke steigt nicht mit der Höhe an ( $R^2=0.02$ ). Nur bei der Fichte sind in der 3. Höhenstufe höhere Werte zu verzeichnen. Die höchsten Werte verzeichnet die Bergföhre. Die mittlere Jahringbreite dagegen fällt mit der Höhe bei der Fichte und Lärche stark ab ( $R^2=0.25$ ). Die Lärche zeigt bei den begasteten Bäumen höhere Jahringbreiten als in der 3. Höhenstufe, bei den unbegasteten liegt sie darunter. Die Bergföhre besitzt die geringste Jahringbreite. Die Werte besitzen hier aber eine hohe Standardabweichung. Da Bäume mit ungefähr dem gleichen Durchmesser ausgesucht wurden, nimmt das Alter zwangsläufig mit der Höhe zu. Auf der Aufforstungsfläche sind alle Bäume gleich alt. Die gemessenen Baumhöhen sind in den 3 unteren Höhenstufen ungefähr gleich, in der vierten viel niedriger. Gleich verhält es sich mit dem Durchmesser des Abschnitts. Bei dem Durchmesser der Äste im Stab wurde keine Veränderung mit der Höhe festgestellt ( $R^2=0.002$ ). In den 4 Höhenstufen sind auch in etwa gleich viele Proben an einem Ast gebrochen (H1: 24%, H2: 16%: H3: 23%, H4: 22%). Die Holzfeuchte beim Bruch ist ebenfalls nicht mit der Meereshöhe zu erklären ( $R^2=0.001$ ). Die Krümmung hingegen nimmt mit der Höhe zu ( $R^2=0.32$ ). Ebenso wie die Faserabweichung leicht steigt ( $R^2=0.11$ ).



**Abbildung 17:** Boxplot mit der Veränderung des E Moduls, der Biegefestigkeit, der maximalen Dehnung und der Elastizitätsgrenze der Dehnung über die 4 Höhenstufen bei den Baumarten Fichte, Lärche und Bergföhre. Bei der vierten Höhenstufe sind die begasten Bäume ausgeschlossen.

Das E Modul sinkt über die vier Höhenstufen hinweg ab. Bei der Fichte und Lärche fällt nur die dritte Höhenstufe aus der Reihe. Bei der Biegefestigkeit zeigt sich ein gleiches Bild. Hier wurden aber auch die größten Holzdichten der Proben verzeichnet. Im Gegensatz dazu steigt die maximale Dehnung und die Elastizitätsgrenze der Dehnung mit der Meereshöhe an. Es ist festzuhalten, dass die Bergföhre bei der Dehnung die höchsten Werte aufweist und beim E Modul und der Biegefestigkeit die niedrigsten.

**Tabelle 8:** Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen des E Moduls E(K). Die Modelle wurden bei der Lärche und Fichte zusammen (Modell1) von Höhenstufe 1-3 laufen gelassen, dann für jede Baumart einzeln(Fichte: Modell 2, Lärche: Modell 3). Zum Schluss wurde die Lärche von Höhenstufe 1-4 untersucht (Modell 4). Kovariablen, die keinen signifikanten Beitrag liefern, wurden während des Anpassens des Modells entfernt. Die Variablen der Art (Lärche/Fichte) und des Bruchs durch Ast (Ja/Nein) wurden als kategoriale Variablen hinzugefügt. Die Werte der abhängigen Variable E Modul der Holzproben, die demselben Baum entstammen, wurden durch das Modell gemittelt.

E(K)		DF	F-Wert	P-Wert			DF	F-Wert	P-Wert
Lärche,	Krümmung	1;26	19.98	0.001	Fichte	Krümmung	1;12	6.61	0.024
Fichte	Ast	1;26	6.40	0.017	<u>H 1-3</u>	Ast	1;12	9.33	0.01
<u>H 1-3</u>	Holzdicke	1;26	7.63	0.01		Holzdicke	-	-	-
	Jahringbreite	-	-	-		Jahringbreite	1;12	7.32	0.019
	Art	<b>1;27</b>	<b>4.64</b>	<b>0.04</b>		Meereshöhe	1;13	2.97	0.108
	Meereshöhe	<b>1;27</b>	<b>4.36</b>	<b>0.046</b>					
<u>Lärche</u>	Krümmung	1;13	15.20	0.0018	<u>Lärche</u>	Krümmung	1;26	14.25	<0.001
<u>H 1-3</u>	Ast	-	-	-	<u>H 1-4</u>	Ast	-	-	-
	Holzdicke	-	-	-		Holzdicke	-	-	-
	Jahringbreite	-	-	-		Jahringbreite	-	-	-
	Meereshöhe	1;13	0.59	0.455		Meereshöhe	<b>1;23</b>	<b>19.70</b>	<b>&lt;0.001</b>

Das Modell mit beiden Baumarten in den ersten 3 Höhenstufen zeigt einen signifikanten Abfall des E Moduls ( $-3,47\text{Nmm}^{-2}\text{m}^{-1}$ , SF: 1.66). Allerdings ist der P-Wert nur schwach signifikant und der F-Wert relativ klein. Die Fichte besitzt signifikant niedrigere Werte als die Lärche. Die Ko-Variablen zeigen keine signifikante Interaktion mit der Meereshöhe. Betrachtet man die Baumarten getrennt, zeigt sich keine signifikante Wirkung mehr. Nur bei dem Modell der Lärche von der 1. bis zur 4. Höhenstufe hat die Meereshöhe wieder signifikanten Einfluss. Die wichtigsten Ko-Variablen welche die Varianz beschreiben, sind die Krümmung und die Astigkeit. Das E Modul im ersten Modell nimmt pro kg Holzdichte  $7,46\text{N/mm}^2$  zu (SF: 3.00, F=2.76, P=0.020). Lässt man statt der Holzdichte die Jahrringbreite laufen, zeigt sich ein Abfall des E Moduls um  $731\text{Nmm}^{-2}\text{m}^{-1}$  (SF: 1.66, F= 14,2, P< 0.001).

**Tabelle 9:** Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen der Biegefestigkeit  $\sigma_{\text{Max}}$ . Die Modelle wurden bei der Lärche und Fichte zusammen (Modell 1) von Höhenstufe 1-3 laufen gelassen, dann für jede Baumart einzeln(Fichte: Modell 2, Lärche: Modell 3). Zum Schluss wurde die Lärche von Höhenstufe 1-4 untersucht (Modell 4). Ko-Variablen, die keinen signifikanten Beitrag liefern, wurden während des Anpassens des Modells entfernt. Die Variablen der Art (Lärche/Fichte) und des Bruchs durch Ast (Ja/Nein) wurden als kategorische Variablen hinzugefügt. Die Werte der abhängigen Variable Biegefestigkeit der Holzproben, die demselben Baum entstammen, wurden durch das Modell gemittelt.

$\sigma_{\text{Max}}$		DF	F-Wert	P-Wert			DF	F-Wert	P-Wert
Lärche, Fichte	Krümmung	1;26	19.22	0.0002	Fichte	Krümmung	-	-	-
H 1-3	Ast	1;26	60.28	<.0001	H 1-3	Ast	1;13	93.63	<.0001
	Holzdichte	-	-	-		Holzdichte	1;13	16.56	0.0013
	Jahrringbreite	1;26	8.84	0.0063		Jahrringbreite	-	-	-
	Art	<b>1;27</b>	<b>7.92</b>	<b>0.009</b>		Meereshöhe	<b>1;13</b>	<b>7.62</b>	<b>0.0162</b>
	Meereshöhe	1;27	0.20	0.6562					
Lärche	Krümmung	1;11	22.94	0.0006	Lärche	Krümmung	1;23	22.91	0.0001
H 1-3	Ast	1;11	13.65	0.0035	H 1-4	Ast	1;23	24.82	<.0001
	Holzdichte	1;11	11.90	0.0054		Holzdichte	1;23	5.80	0.0244
	Jahrringbreite	-	-	-		Jahrringbreite	-	-	-
	Meereshöhe	1;13	1.58	0.2309		Meereshöhe	<b>1;23</b>	<b>30.25</b>	<b>&lt;.0001</b>

**Tabelle 10:** Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen der maximalen Dehnung  $\epsilon_{\text{Max}}$ . Die Modelle wurden bei der Lärche und Fichte zusammen (Modell 1) von Höhenstufe 1-3 laufen gelassen, dann für jede Baumart einzeln(Fichte: Modell 2, Lärche: Modell 3). Zum Schluss wurde die Lärche von Höhenstufe 1-4 untersucht (Modell 4). Ko-Variablen, die keinen signifikanten Beitrag liefern, wurden während des Anpassens des Modells entfernt. Die Variablen der Art (Lärche/Fichte) und des Bruchs durch Ast (Ja/Nein) wurden als kategorische Variablen hinzugefügt. Die Werte der abhängigen Variable Biegefestigkeit der Holzproben, die demselben Baum entstammen, wurden durch das Modell gemittelt.

$\epsilon_{\text{Max}}$		DF	F-Wert	P-Wert			DF	F-Wert	P-Wert
Lärche, Fichte	Krümmung	1;27	6.66	0.0156	Fichte	Krümmung	-	-	-
H 1-3	Ast	1;27	30.30	<.0001	H 1-3	Ast	1;14	11.48	0.0044
	Holzdichte	-	-	-		Holzdichte	-	-	-
	Jahrringbreite	-	-	-		Jahrringbreite	-	-	-
	Art	1;27	0.09	0.7608		Meereshöhe	<b>1;13</b>	<b>7.92</b>	<b>0.0146</b>
	Meereshöhe	1;27	3.14	0.0874					
Lärche	Krümmung	1;12	5.19	0.0417	Lärche	Krümmung	-	-	-
H 1-3	Ast	1;12	13.25	0.0034	H 1-4	Ast	1;26	6.32	0.0185
	Holzdichte	-	-	-		Holzdichte	-	-	-
	Jahrringbreite	-	-	-		Jahrringbreite	-	-	-
	Meereshöhe	1;13	0.64	0.437		Meereshöhe	1;23	3.15	0.089

Tabelle 9 zeigt eine signifikant höhere Biegefestigkeit bei der Lärche als bei der Fichte. Die Krümmung und die Astigkeit sind die stärksten Einflussfaktoren. Im ersten Modell nimmt die Biegefestigkeit mit jedem Millimeter einer größeren durchschnittlichen Jahrringbreite um  $3.2\text{Nmm}^{-2}\text{m}^{-1}$  ab (SF: 1.66). Die Biegefestigkeit nimmt in allen Modellen mit steigender Holzdichte zu. Beim Modell 2 und 3 nimmt die Biegefestigkeit mit steigender Höhe signifikant ab, im ersten Modell bleibt sie auf dem gleichen Niveau.

Nur das Modell der Fichte zeigt einen signifikanten Einfluss der Meereshöhe auf die maximale Dehnung. Bei Modell 1 und 4 ist ein Trend feststellbar. Der Unterschied zwischen den Baumarten ist nicht signifikant. Es ist sichtbar, dass die Krümmung und die Äste den größten Einfluss auf die Dehnung haben. In Modell 4 steigt die Dehnung mit steigender Jahrringbreite signifikant an.

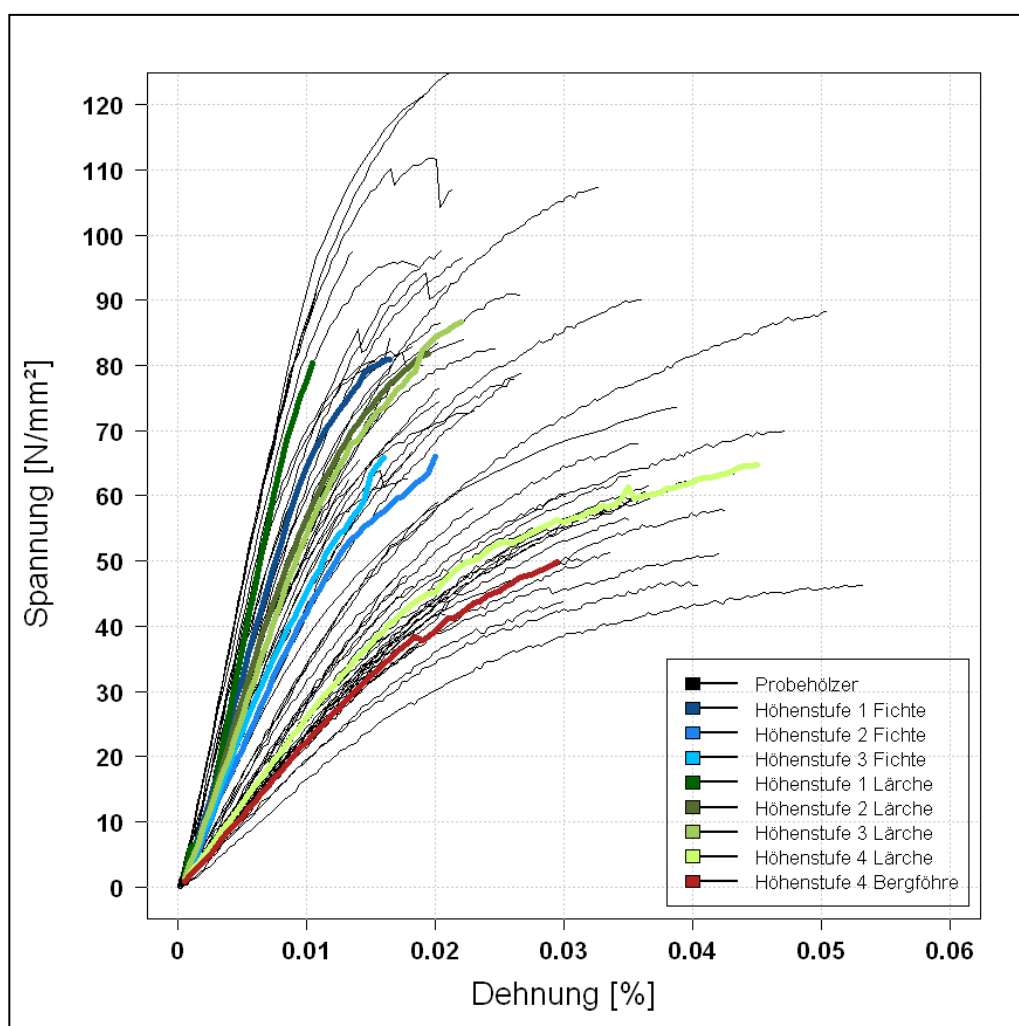
**Tabelle 11:** Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen der Elastizitätsgrenze der Dehnung  $P(\epsilon)$ . Die Modelle wurden bei der Lärche und Fichte zusammen (Modell1) von Höhenstufe 1-3 laufen gelassen, dann für jede Baumart einzeln (Fichte: Modell 2, Lärche: Modell 3). Zum Schluss wurde die Lärche von Höhenstufe 1-4 untersucht (Modell 4). Ko-Variablen, die keinen signifikanten Beitrag liefern, wurden während des Anpassens des Modells entfernt. Die Variablen der Art (Lärche/Fichte) und des Bruchs durch Ast (Ja/Nein) wurden als kategorische Variablen hinzugefügt. Die Werte der abhängigen Variable der Elastizitätsgrenze der Holzproben, die demselben Baum entstammen, wurden durch das Modell gemittelt.

$P(\epsilon)$		DF	F-Wert	P-Wert		DF	F-Wert	P-Wert	
Lärche, Fichte	Krümmung	1;22	3.56	0.0726	Fichte	Krümmung	-	-	
H 1-3	Ast	-	-	-	H 1-3	Ast	-	-	
	Holzdichte	-	-	-		Holzdichte	-	-	
	Jahrringbreite	-	-	-		Jahrringbreite	-	-	
	Art	1;27	0.09	0.7658		Meereshöhe	1;13	0.51	
	Meereshöhe	<b>1;27</b>	<b>4.51</b>	<b>0.043</b>					
Lärche	Krümmung	-	-	-	Lärche	Krümmung	1;20	14.78	0.001
H 1-3	Ast	-	-	-	H 1-4	Ast	-	-	-
	Holzdichte	-	-	-		Holzdichte	1;20	6.49	0.0192
	Jahrringbreite	-	-	-		Jahrringbreite	1;20	8.15	0.0098
	Meereshöhe	<b>1;25</b>	<b>7.41</b>	<b>0.0175</b>		Meereshöhe	<b>1;23</b>	<b>18.36</b>	<b>0.0003</b>

Die Lärche hat keine signifikant höhere Elastizitätsgrenze der Spannung als die Fichte. In drei Modellen hat die Meereshöhe positiven Einfluss auf  $P(\epsilon)$ . Das Modell bei der Lärche Höhenstufe 1-4 ist das einzige, bei dem die Holzfeuchte signifikanten Einfluss besitzt. Die steigende Jahrringbreite besitzt bei der Lärche von der 1. bis 4. Höhenstufe negativen Einfluss auf die Dehnung. Die Elastizitätsgrenze der Spannung ist, wie in Tabelle 12 dargestellt, bei der Lärche höher als bei der Fichte. Eine steigende Jahrringbreite wirkt sich bei der Lärche und Fichte im ersten Modell negativ auf die Spannung aus. Die Meereshöhe wirkt sich nur bei der Lärche von der 1. bis 4. Höhenstufe signifikant auf die Spannung aus.

**Tabelle 12:** Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen der Elastizitätsgrenze der Spannung  $P(\sigma)$ . Die Modelle wurden bei der Lärche und Fichte zusammen (Modell1) von Höhenstufe 1-3 laufen gelassen, dann für jede Baumart einzeln (Fichte: Modell 2, Lärche: Modell 3). Zum Schluss wurde die Lärche von Höhenstufe 1-4 untersucht (Modell 4). Ko-Variablen, die keinen signifikanten Beitrag liefern, wurden während des Anpassens des Modells entfernt. Die Variablen der Art (Lärche/Fichte) und des Bruchs durch Ast (Ja/Nein) wurden als kategorische Variablen hinzugefügt. Die Werte der abhängigen Variable der Elastizitätsgrenze der Holzproben, die demselben Baum entstammen, wurden durch das Modell gemittelt.

P( $\sigma$ )		DF	F-Wert	P-Wert		DF	F-Wert	P-Wert
Lärche,	Krümmung	1;20	10.78	0.0037	Fichte	Krümmung	-	-
Fichte	Ast	1;20	5.47	0.0299	<u>H 1-3</u>	Ast	1;10	10.62
<u>H 1-3</u>	Holzdicke	-	-	-		Holzdicke	-	-
	Jahringbreite	1;20	9.73	0.0054		Jahringbreite	-	-
	Art	<b>1;27</b>	<b>9.33</b>	<b>0.005</b>		Meereshöhe	1;13	0.87
	Meereshöhe	1;27	0.08	0.7831				0.3682
Lärche	Krümmung	1;11	12.65	0.0045	Lärche	Krümmung	-	-
<u>H 1-3</u>	Ast	-	-	-	<u>H 1-4</u>	Ast	1;22	10.52
	Holzdicke	-	-	-		Holzdicke	-	-
	Jahringbreite	-	-	-		Jahringbreite	-	-
	Meereshöhe	1;13	0.23	0.6374		Meereshöhe	<b>1;23</b>	<b>5.17</b>
							<b>0.0326</b>	



**Abbildung 18:** Darstellung aller Spannungs- Dehnungskurven der Bäume aller Höhenstufen. Die begasten Bäume der Versuchsfläche sind nicht abgebildet. Die dicken Linien stellen den Vergleich der alle 0.002 % Dehnung interpolierten Medianwerte aller Spannungs-Dehnungskurven dar.

In Abbildung 18 ist sichtbar, dass die durchschnittlichen Spannungs-Dehnungskurven der Fichte in jeder Höhenstufe unter denen der Lärche liegen. Außerdem nimmt die Steigung bei der Lärche stetig ab. Die Bergföhre besitzt die geringste Steigung. Es fällt auf, dass die Hölzer später brechen, je flacher die Steigung der Kurven ist.

## 4.5 Bergföhre und Lärche

Bei den Werten des E Moduls, der Biegefestigkeit und der Elastizitätsgrenze der Spannung liegt die Bergföhre unter denen Lärche. Bei der Elastizitätsdehnung und maximalen Dehnung darüber. Signifikant ist das Ergebnis nur beim E Modul und der maximalen Dehnung.

**Tabelle 13:** Ergebnisse der multiplen linearen Kovarianzanalyse mit wiederholten Messungen des E Moduls  $E(K)$ , der Biegefestigkeit  $\sigma_{Max}$ , der maximalen Dehnung  $\epsilon_{Max}$ , der Elastizitätsgrenze der Dehnung  $P(\epsilon)$  und der Elastizitätsgrenze der Spannung  $P(\sigma)$ . Ko-Variablen, die keinen signifikanten Beitrag liefern, wurden während des Anpassens des Modelles entfernt. Die abhängige Variable der Art wurde als kategoriale Variable (Lärche/Bergföhre) hinzugefügt. Die Werte der abhängigen Variable der Holzproben, die demselben Abschnitt bzw. Baum entstammen, wurden durch das Modell gemittelt.

Lärche		DF	F-Wert	P-Wert	Bergföhre		DF	F-Wert	P-Wert
$E(K)$	Ast	-	-	-	$P(\epsilon)$	Ast			
	Holzdichte	1;16	4.46	0.050		Holzdichte			
	Holzfeuchte	1;16	1.35	0.261		Holzfeuchte			
	<b>Art</b>	<b>1;5</b>	<b>6.73</b>	<b>0.048</b>		<b>Art</b>	1;5	6.52	0.051
$\sigma_{Max}$	Ast	1;17	11.34	0.003	$P(\sigma)$	Ast	1;14	7.50	0.016
	Holzdichte	-	-	-		Holzdichte	1;14	7.63	0.015
	Holzfeuchte	-	-	-		Holzfeuchte			
	<b>Art</b>	1;5	0.025	0.879		<b>Art</b>	1;5	2.17	0.200
$\epsilon_{Max}$	Ast	1;17	4.02	0.061					
	Holzdichte								
	Holzfeuchte								
	<b>Art</b>	<b>1;5</b>	<b>12.45</b>	<b>0.016</b>					

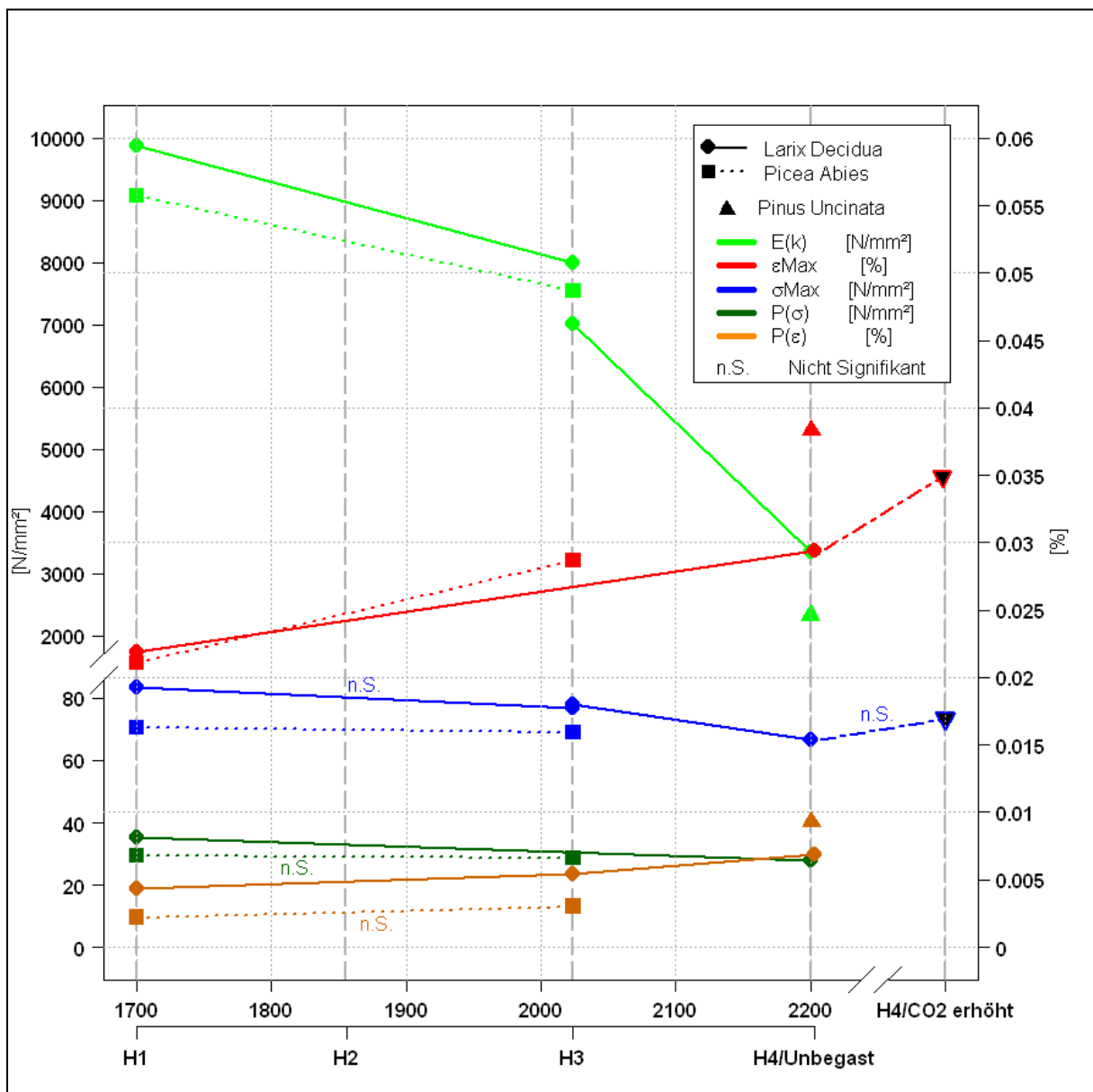
## 4.6 Mechanische Eigenschaften in den unterschiedlichen Höhen eines Baumes

Da sich, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, mit der Meereshöhe das Alter, die Baumhöhe und damit auch die Höhe des Abschnitts ändert, können diese Parameter nicht über alle Höhenstufen hinweg verglichen werden. Der Einfluss der Meereshöhe würde das Ergebnis dann verfälschen. Da jedoch die Holzproben in der 1. bis 3. Höhenstufe konstant bei 5 und 8cm aufgenommen wurden, können die mechanischen Eigenschaften hier verglichen werden. Im Schnitt liegen die Abschnitte mit 8cm Durchmesser bei 1.8m und die mit 5cm bei 3.3m. Die Kovarianzmodelle wurden nun mit der Variablen des Durchmessers durchgeführt. Dazu wurden die Werte wie zuvor pro Baum vorher nicht mehr gemittelt. Der Durchmesser hatte nur in dem Modell der maximalen Dehnung einen signifikanten Einfluss. Sowohl im Modell mit beiden Baumarten ( $F=6.2$ ,  $P=0.02$ ) als auch bei der Lärche ( $F=7.4$ ,  $P=0.02$ ), war er bei 8cm signifikant höher, bei der Fichte nicht ( $F=1.2$ ,  $P=0.29$ ). Vergleicht man die Mittelwerte in Tabelle 14 oder die Verteilung in Boxplots der anderen mechanischen Holzeigenschaften wird auch kein Trend sichtbar. Die Holzdichte ist im Mittel zwar höher im unteren Stammabschnitt, korreliert aber nicht ( $R^2=0.09$ ). Die Jahrringbreite ist nicht unterschiedlich bei den beiden Durchmessern ( $R^2=0.00$ ). Bis auf die Dehnbarkeit bei der Lärche ist also bei meinen Messungen kein Unterschied innerhalb eines Baumes feststellbar.

**Tabelle 14:** Mittelwerte der mechanischen Holzeigenschaften der 1. bis 3. Höhenstufe bei 5 und 8cm Baumdurchmesser

Durchmesser	$E(k)$	$P(\sigma)$	$\sigma_{Max}$	$P(\epsilon)$	$\epsilon_{Max}$	$\rho$	$b$
5cm	5988	28.2	82.6	0.0051	0.020	435.2	2.52
8cm	6046	29.3	84.7	0.0053	0.026	476.5	2.43

## 4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse



**Abbildung 19:** Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Modellen der multivariaten Kovarianzanalyse. Dargestellt sind komplexes E-Modul  $E(k)$ , maximale Dehnung  $\epsilon_{max}$ , Biegefestigkeit  $\sigma(B)$ , Elastizitätsgrenze der Dehnung  $P(\epsilon)$  und Elastizitätsgrenze der Spannung  $P(\sigma)$  über die 4 Höhenstufen von 1700 bis 2237m. Die Modelle wurden jeweils zwischen der 1. und 3. sowie der 3. und 4. Höhenstufe angewendet. Ausnahmen sind  $P(\sigma)$  und  $\epsilon_{max}$  der Lärche, welche das Modell über alle 4 Höhenstufen hinweg darstellt. Da die Daten auf unterschiedlichen Modellen beruhen, kommt es zu Abweichungen bei den Start- und Endpunkten der Strecken. Die Baumartensymbole markieren die Start- und Endpunkte eines Modells. Es sind nur Modelle mit signifikantem Ergebnis oder einem deutlichen Trend dargestellt. Strecken die nicht auf einem signifikanten Modell beruhen, sind mit einem **n.S.** markiert.

Die Abbildung 19 dient der Zusammenfassung aller Ergebnisse aus der Kovarianzanalyse. Sichtbar ist der starke Abfall des E-Moduls bei der Fichte und Lärche mit der Höhe. Besonders zwischen der 3. und 4. Stufe ist der Abfall sehr stark. Die Fichte besitzt mit Ausnahme der maximalen Dehnung immer niedrigere Werte als die Lärche. Neben dem E Modul fällt die Biegefestigkeit und die Elastizitätsgrenze der Spannung mit der Höhe. Die maximale Dehnung und Elastizitätsgrenze steigt. Die Bergföhre besitzt auf der vierten Höhenstufe eine höhere Dehnung und ein niedrigeres E Modul. Die  $CO_2$  Bäume haben eine höhere maximale Dehnung und Biegefestigkeit.

## 5 Diskussion

Die Bedeutung des Holzes und der Biegebelastung im Baum bei den unterschiedlichen Prozessen in der Natur wurde im Kapitel 2.6 diskutiert. Nun werden darauf aufbauend die Fragestellungen zu den Holzeigenschaften, den Baumarten, den verschiedenen Höhenstufen und dem  $CO_2$  Versuch beantwortet und im Hinblick auf die unterschiedlichen mechanischen Einwirkungen diskutiert.

### 5.1 Korrelationen der Variablen

Nach DIN52186 werden für die Auswertung der Biegeversuche die Jahrringbreite, die Holzdicke, die Faserabweichung, der Astdurchmesser und die Holzfeuchte bestimmt. Zusätzlich muss vermerkt werden, ob sich ein Ast im Bruchbild befindet. Bei der Auswertung wird deutlich, dass der wichtigste Faktor bei meiner Analyse die Äste, die Jahrringbreite und die Holzdicke waren. Weniger entscheidend waren die Faserabweichung und die Holzfeuchte. Als weiterer wichtiger und einflussreicher Faktor kam die Krümmung der Stäbe bei der Trocknung hinzu. LUNDSTRÖM (2007) kam bei seinen Versuchen an der Fichte zu ähnlichen Ergebnissen, allerdings spielte die Holzfeuchte eine größere Rolle, da an frisch geschlagenem Holz getestet wurde. GREEN (1999) führt den großen Einfluss der Äste auf den Abbruch der Kontinuität im Holz und auf die Veränderung der Faserrichtung zurück. Eine kleinere Jahrringbreite und eine größere Holzdicke führen wie bei MÄRKI (2005), KOLLMANN (1951) und meinen Untersuchungen auch bei ihm zu einem grösseren E Modul und größerer Biegefestigkeit. Allerdings bleibt zu bedenken, dass die Jahrringbreite und Holzdicke untereinander korrelieren, und daher nicht genau geklärt werden kann, welcher der beiden Faktoren für den Unterschied verantwortlich ist. Wahrscheinlich bewirken kleinere Jahrringbreiten größere Holzdichten, die dann Einfluss nehmen auf die mechanischen Eigenschaften. Genauso könnten kleinere Jahrringe aber auch den Spätholzanteil erhöhen, was sich direkt auf die Festigkeit auswirkt. Interessant ist, dass dagegen die maximale Dehnung bei einer größeren Jahrringbreite ansteigt. Zusammenfassend kann man sagen, dass ein Baum dann eine maximale Elastizität besitzt und eine höhere Kraft aushält, wenn sein Holz hohe Dichten und kleine Jahrringbreiten aufweist.. Die Dehnbarkeit hingegen steigt mit einer größeren Jahrringbreite d.h. schnellerem Wachstum an.

Noch zu erwähnen ist, dass durch die einheitliche Bearbeitung und Behandlung der Einfluss der Faktoren Holzfeuchte, Faserabweichung und Temperatur minimiert werden konnte. Die Holzfeuchte beim Bruch variierte zwischen 2.5% im Minimum und 6% im Maximum. Das ergibt nach NOACK (1976) eine maximal mögliche Abweichung beim E Modul von 7%. Neben den von mir gemessenen Einflussfaktoren gibt es viele weitere Faktoren, die die mechanischen Eigenschaften bestimmen und auch zu den Unterschieden zwischen den Baumarten führen. Hier sind die chemischen Eigenschaften, der Zellaufbau, ein Spätholz- und Frühholzanteil, sowie Druck- oder Zugholz zu nennen. Bei den chemischen Eigenschaften wäre der Lignin und Cellulose Anteil interessant, beim Zellaufbau vor allem die Tracheidenlänge und der Durchmesser sowie die Zellwanddicke und das Zellvolumen. Desweiteren wäre auch der Anteil an Holzstrahlen und weiterer anatomischer Parameter interessant. Es wurde von mir keine veröffentlichten Analysen dieser Holzbeschaffenheiten in Kombination mit Versuchen zu mechanischen Eigenschaften gefunden.

Die Korrelationen nach Spearman zeigen einen leichten Anstieg der maximalen Dehnung mit der Biegefestigkeit, Abbildung 18 hingegen zeigt bei höheren Biegefestigkeiten kleinere Dehnungen. Dies liegt wohl vor allem daran, dass die sehr langen Spannungs-Dehnungskurven der Bergföhre diesen Eindruck vermitteln. In Wirklichkeit hat also die Festigkeit keinen großen Einfluss auf die maximale Dehnbarkeit des Holzes. Dies bedeutet, dass ein Holz gleichzeitig besonders dehnbar und fest sein kann. Bei steigendem E Modul und  $P(\sigma)$  verhält es sich anders, hier zeigt sich, dass die Festigkeit des Holzes steigt. Die maximale Dehnung jedoch auch unbeeinflusst ist. Das bedeutet, die Kraft, die die Bäume aushalten können, ist umso größer, je elastischer und steifer der Baum ist.

LUNDSTRÖM (2007) fand bei seinen Versuchen einen signifikanten Abfall des E Moduls und der Biegefestigkeit mit der Höhe in einem Baum. Dies konnte in meinen Untersuchungen nicht bestätigt werden. Bei meinen Messungen wurde in jedem Baum in zwei unterschiedlichen Höhen eine Holzprobe entnommen und die mechanischen Eigenschaften verglichen. Lundström nennt aber auch die steigende Holzfeuchte mit der Höhe im Baum als wichtigsten Einflussfaktor, der von mir ja vor der Messung durch die Trocknung aus dem Spiel genommen wurde. Der einzige signifikante Unterschied zwischen den beiden Höhen war eine höhere maximale Dehnbarkeit bei den unteren Stammabschnitten. Dies ist aber nur bei der Lärche der Fall. Durch die aufgenommenen Variablen konnte dieser Unterschied aber nicht erklärt werden.

## 5.2 Kennwerte der mechanischen Holzeigenschaften

Die Messungen wurden zwar nach der deutschen Industrie Norm durchgeführt, allerdings musste die Probengröße auf die Hälfte verringert werden. Die Messergebnisse sollten zwar aufgrund des gleichbleibenden Verhältnisses dieselben sein, allerdings haben so kleinere Störungen im Holz größere Auswirkungen. Vielleicht erklärt dies zum Teil die um rund 30% kleineren E Module meiner Untersuchungen. Die Ergebnisse decken sich aber auch mit der Tatsache, dass das E Modul bei meinen Messungen mit der Meereshöhe ständig abnimmt. Die Vergleichsmessungen von DIN 68364 (1978), NIEMTZ (1981), KOLLMANN (1955), SELL (1997) und MÄRKI (2005) wurden alle an Bäumen aus einer viel geringeren Höhe

durchgeführt. Die Werte der Holzdichte und der Biegefestigkeit liegen im Bereich der Werte aus der Holztechnik, sie schwanken aber stark. Wie angesprochen, dienen die Vergleichswerte der Waldkiefer bei der Bergföhre nur dazu, um sie grob einordnen zu können. Die Werte sind viel geringer, was ebenfalls darauf hindeutet, dass das E Modul und die Biegefestigkeit mit der Höhe abnimmt. Dieses Ergebnis widerspricht der aufgestellten Hypothese, dass Bäume aus höheren Lagen ein höheres E Modul und höhere Biegefestigkeit besitzen, um besser an die starken mechanischen Belastungen angepasst zu sein. Die geringere Anfälligkeit gegenüber Schneebruch der unterschiedlichen Provenienzen und Baumarten an der Waldgrenze muss also andere Gründe haben.

### **5.3 Einfluss von experimentell erhöhten $CO_2$ Konzentrationen und Temperaturen**

Die Erhöhung des Baumwachstums durch eine  $CO_2$  Begasung ist neben anderen Untersuchungen auch am Stillberg nachgewiesen (CEULEMANS, 1999, NOWAK, 2004, NORBY, 2005, TELEWESKI, 1999, KILPELÄINEN, 2005, DAWES, 2010). NICOLUSSI (1995) zeigte, dass bereits der Anstieg der  $CO_2$  Konzentration in den letzten 50 Jahren zu einem stärkeren Wachstum bei der Zirbe an der Waldgrenze geführt hat. Neben dem  $CO_2$  würde der Stickstoffeintrag und die steigende Temperatur den Effekt sogar noch verstärken. Ein positiver Einfluss auf die Festigkeit des Holzes konnte von BEISMANN (2002) nachgewiesen werden. Die Festigkeit wurde jedoch mittels Pendeltests ermittelt und nicht wie bei mir mittels 3 Punkt Biegeversuchen. Ein signifikanter Unterschied wurde auch nur bei der Fichte, nicht bei der von ihm auch untersuchten Buche ermittelt. Seine Biegeversuche zeigten keine signifikanten Ergebnisse beim E Modul. Auch bei meinen Untersuchungen ist nur ein Trend zu höheren E Modulen feststellbar. Auf die Grenzen der Elastizität zeigt die  $CO_2$  Behandlung keine Auswirkungen. Anders ist es bei der Biegefestigkeit, hier ist bei der Kovarianzanalyse ein deutlicher Trend zu höheren Werten feststellbar. Bei der maximal möglichen Dehnung ist das Ergebnis bei den begasten Bäumen signifikant höher. Die erhöhte Temperatur hatte keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes. Die genauen Gründe für diese Veränderungen zu finden, ist schwierig und kann nur durch zusätzlich aufgenommene Variablen oder Ergebnisse aus vergleichbaren Studien geschehen. Wie beschrieben, wirkt sich eine steigende Jahrringbreite negativ auf die Biegefestigkeit und das E Modul aus. In Abbildung 16 ist eine größere Jahrringbreite bei den begasten Bäumen ersichtlich, die auch schon von DAWES (2010) nachgewiesen wurde. Zwar ist die Jahrringbreite in den Kovarianzmodellen des  $CO_2$  nicht signifikant dennoch wirkt diese Variable dem Effekt des  $CO_2$  entgegen. Das Gegenteil ist bei der maximalen Dehnung der Fall, hier wird der Effekt des  $CO_2$  durch die Jahrringbreite zum Teil erklärt werden. In der Holzdichte gibt es keinen Unterschied zwischen den beiden Gruppen, als Erklärung für mechanische Unterschiede fällt diese Variable also weg. Bereits andere Untersuchungen zeigten keinen Einfluss auf die Holzdichte (TELEWESKI, 1999, CEULEMANS, 2002). HÄTTENSCHWILER (1996) und CONROY (1990) dagegen bewiesen diesen Einfluss in ihren Untersuchungen. Aus den Messungen von HANDA (2006) am Stillberg weiß man, dass das größere Wachstum der Lärche vor allem auf einem grösseren Spätholzanteil mit längeren Tracheiden beruht dessen Zellen vielleicht zu einer größeren

Festigkeit beitragen. Zum gleichen Ergebnis kommt TELEWESKI (1999). Einflüsse, die sich zusätzlich auf die mechanischen Eigenschaften auswirken, sind eine größere Tracheidengröße (CELEMANS, 2002, CONROY, 1990), dickere Zellwände (KOSTIAINEN, 2007) oder eine geringere Cellulose Konzentration (KILPELÄINEN, 2005). Die Ergebnisse sind aber keinesfalls immer einheitlich, so weist YAZAKI (2004) keinen Einfluss auf die Zellwände nach. Ebenfalls wichtig für die mechanischen Eigenschaften ist die Lignin Konzentration. Die Untersuchungen von HÄTTENSCHWILER (1996) zeigen aber keine Unterschiede. GINDL (2000) weist lediglich den Einfluss der Temperaturerhöhung auf die Ligninkonzentration nach, und BLASCHKE (2002) nennt nur einen indirekten Einfluss des  $CO_2$  in Abhängigkeit von der N-Versorgung. Die mechanischen Holzeigenschaften werden also durch die  $CO_2$  Konzentration beeinflusst. Dafür können die höheren Wachstumsraten oder eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung oder der Zellstruktur verantwortlich sein. Die Gründe für die größere maximale Dehnung und Biegefestigkeit konnten nicht ganz erklärt werden können. Trotzdem bedeutet es, dass die Lärchen die in einer Luft mit erhöhtem  $CO_2$  Gehalt wachsen, einen stabilen Stamm ausbilden. Verstärkt wird der Effekt zusätzlich dadurch, dass die Lärchen schneller dickere Durchmesser ausbilden, und damit insgesamt schneller einen stabilen Bestand bilden können. Das bedeutet, dass die Veränderung der Baumeigenschaften durch klimatische Faktoren in Zukunft nicht nur durch die Temperatur gesteuert wird. Die unterschiedlichen Baumarten können hier jedoch unterschiedlich reagieren. Sicher ist, dass die Folgen des  $CO_2$  Anstiegs und des Klimawandels vielfältig sind und nicht immer direkte negative Auswirkungen auf die Schutzwälder und damit auch auf die Lebensqualität der Anwohner haben.

## 5.4 Einfluss des Höhengradienten

Die Zellstruktur und der chemische Aufbau sind, wie angesprochen, elementare Eigenschaften, die Einfluss auf die mechanische Stabilität haben. Dennoch sind Untersuchungen, die beide Eigenschaften in Beziehung stellen selten und kommen meist aus der Holztechnik (HAYGREEN, 1982, TSOUJIS, 1991). Vor allem über die Veränderungen mit der Höhe ist noch wenig bekannt. Meine Untersuchungen zeigen, entgegen der aufgestellten Hypothese einen Abfall der Elastizität und Biegefestigkeit mit der Höhe. Die maximale Dehnbarkeit wird jedoch größer. Gleich verhält es sich mit den Elastizitätsgrenzen, der Spannung und Dehnung. Die Holzdicke ist kein Grund für diese Veränderung, zwar besitzt sie Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, jedoch verändert sie sich nicht mit der Höhe, dies bestätigen die Untersuchungen von KÖRNER (2012). Ein Einfluss könnte das Alter haben, jedoch korreliert das stark mit der Jahrringbreite, da ja bei den Bäumen immer gleiche Durchmesser gewählt wurden. Bei seinen Untersuchungen an der Grünerle zeigt BRÜCHERT (2003), dass das E Modul in den ersten 5 Entwicklungsjahren zunächst deutlich ansteigt, dann mehr oder weniger konstant bleibt. Die Bäume meiner Untersuchungen waren alle deutlich älter. Nur in der vierten Höhenstufe ist die Baumhöhe und der BHD geringer. Ein Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften konnte bei diesen Variablen nicht nachgewiesen werden. Die Astigkeit der Holzproben veränderte sich ebenso wenig wie die Holzfeuchte. Mit der Höhe steigt die Anzahl der Äste nur sehr gering an, und die Korrelation der Äste mit dem E Modul und der Spannung und Dehnung wird sogar geringer. Dies liegt vielleicht daran,

dass die Jahrringe kleiner sind, die Äste keine so großen Unregelmäßigkeiten mehr darstellen und damit der Zusammenhalt mit dem umgebenden Holz größer ist. Einfluss könnte aber die stärkere Krümmung und Faserabweichung der Holzproben in höheren Lagen haben. Das Holz weist einen unregelmäßigeren Faserverlauf auf. Wenn die Jahrringbreite einen signifikanten Einfluss im Modell ausübt, korreliert sie positiv mit der Dehnung oder negativ mit dem E Modul und der Biegefestigkeit. Das bedeutet das ein schnelleres Wachstum zu einer geringeren Festigkeit und besseren Dehnbarkeit führt. Da die Jahrringbreite mit der Höhe abnimmt, wirkt dies dem Einfluss der Höhe auf das E Modul, die Biegefestigkeit und der Dehnung zusätzlich entgegen. Die mechanischen Unterschiede in den Modellen können also nicht durch die kleinere Jahrringbreite in der Höhe erklärt werden. Eine mögliche Erklärung für die Ergebnisse können die vermehrt auftretenden Frostringe in der Höhe sein. Laut KNUFINKE (1998) fehlt durch die Frostringe der radiale Zusammenhalt im Holz. 1998 wurde bei den Bäumen am Stillberg bei 70 von 72 Lärchen Frostringe festgestellt. Im Schnitt kommt ein Frostring auf 4 Jahrringe. Zusätzlich wirkt sich sicherlich der Ligninanteil auf die Festigkeit aus. Die einzigen Untersuchungen hierzu stammen von VORREITER (1937), der einen abnehmenden Anteil mit der Höhe nachweist. Unter Umständen liegt es auch anderen sekundären Pflanzenstoffen wie dem Harz, welches bei der Trocknung im Holz bleibt. Dieses hat einen größeren Anteil in höheren Lagen und macht das Holz flexibler. Die genauen Ursachen für die starke Veränderung der mechanischen Eigenschaften mit der Höhe können also nicht genau genannt und vor allem quantitativ bestimmt werden. Hierzu müssten zusätzliche Variablen aufgenommen werden. Man kann aber abschließend sagen, dass sich die physikalischen Eigenschaften mit der Höhe verändern. Die Bäume in größeren Höhenlagen verfolgen die Strategie, möglichst dehnbares Holz zu besitzen. Dieses kann zwar weniger großen Kräften standhalten, jedoch ermöglicht es den Bäumen, die Prozesse abzufedern und weniger irreversible Schäden davonzutragen. Diese Eigenschaft ist bei den gleichmäßigen und lang andauernden Einwirkungen durch Schneedruck und Schneegleiten sicherlich von Vorteil. Bei der Einwirkung einer Lawine, einer Sturmbö oder eines Steines auf den Baum wird hingegen eine hohe Biegefestigkeit und Elastizität gefragt sein, um den Prozess aufzuhalten. Die äußeren Umwelteinflüsse stellen also unterschiedliche Anforderungen an die Stabilität der Bäume.

## 5.5 Baumartenvergleich

Die drei untersuchten Baumarten zeigen zum Teil sehr unterschiedliche mechanische Holzeigenschaften. Die Fichte weist geringere Holzdichten auf als die Lärche, das gleiche gilt für das E Modul und die Biegefestigkeit. Dieses Verhältnis deckt sich mit den Vergleichbaren Studien aus der Holztechnik. Bei der maximalen Dehnung ist kein Unterschied feststellbar. Die geringere Holzdichte der Fichte lässt sich in der zweiten und dritten Höhenstufe durch die geringere Jahrringbreite erklären. Die Bergföhre besitzt die größte Holzdichte und die niedrigsten Festigkeitseigenschaften, dafür aber das größte Dehnungsvermögen. Bei den Elastizitätsgrenzen besitzt die Fichte ebenfalls sowohl bei der Spannung als auch bei der Dehnung niedrigere Werte. Vergleicht man die Bergföhre mit der Lärche in der vierten Höhenstufe ist die mögliche Dehnung noch einmal größer, die ertragbare Spannung im Holz jedoch geringer. Das E Modul und damit der Widerstand gegen Verformung ist ebenfalls viel geringer. Die Gründe für die Unterschiede in den mechanischen

Eigenschaften liegen, wie in Kapitel 2.4. beschrieben, in der chemischen Zusammensetzung, der Zellstruktur und anderen Wuchseigenschaften der Baumarten. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Lärche, sowohl den höheren Kräften standhält, als auch der Kraft mehr Widerstand leisten kann. Zusätzlich ist auch eine höhere Kraft und Durchbiegung notwendig, um das Holz irreversibel zu verformen. Da die Lärche zusätzlich im Winter ihre Nadeln verliert und dem Schnee und Wind weniger Angriffsfläche bietet, ist sie insgesamt besser an die mechanischen Einwirkungen in schneereichen Lagen angepasst. Die berechneten Werte aus den Modellen von MARGRETH (2007) und SUDA (2011) zeigen die große Bedeutung der Angriffsfläche. Die Bergföhre zeigt ein größeres Dehnungsvermögen und weist erst bei einer stärkeren Dehnung irreversible Schäden auf. Dafür hält sie aber weniger Kraft stand und leistet den äußeren Einwirkungen weniger Widerstand. Eine mögliche Erklärung ist, dass die sommergrüne Lärche dem Schnee weniger Angriffsfläche bietet und den Schnee eher vorbeigleiten lässt, während die Bergföhre sich, in der Schneedecke eingeschlossen, ein Stück mitbewegt. Mit steigendem Durchmesser sinkt natürlich das Dehnungsvermögen aufgrund der steigenden Scherkräfte im Holz. Da die Bergföhre auf der Aufforstungsfläche bereits bei kleineren Höhen stärkere Durchmesser ausbildet, bewirkt dies vielleicht in Verbindung mit der größeren Angriffsfläche und der geringeren Biegefestigkeit die von HORAK (2004) und VANOMSEN (2000) gemessene höhere Anfälligkeit gegenüber Schneebruch. Diese unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den Baumarten unterstreichen aber die Wichtigkeit einer genetischen Diversität und Artenvielfalt in unseren zukünftigen Schutzwäldern.

## 5.6 Bedeutung für die Schutzwälder der Zukunft

Die Bäume besitzen also je nach Art und der Höhe in der sie wachsen unterschiedliche physikalische Eigenschaften. Außerdem werden sich diese wohl in Zukunft durch den  $CO_2$  Anstieg und den Klimawandel verändern. Dies geschieht direkt über das veränderte Wachstum, durch das größere Ressourcenangebot und indirekt über eine langsame Anpassung an die veränderten Umweltbedingungen. Eine Frage wird auch sein, welche der Baumarten sich am schnellsten anpassen kann. So besitzt die Lärche auf der Untersuchungsfläche ein verstärktes Wachstum durch das zusätzliche  $CO_2$ , die Bergföhre hingegen zeigt keine Reaktion. Auch bei den mechanischen Eigenschaften weist die Lärche bereits veränderte Werte auf. Die Ergebnisse in den verschiedenen Höhenstufen können, wie angesprochen, nicht eindeutig erklärt werden. Auch ist nicht klar, ob die Unterschiede durch die unterschiedlichen Wuchsbedingungen verursacht werden oder zum Teil genetischen Ursprungs sind. In diesem Fall könnten die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Provenienzen zusätzlich dafür sprechen, bei einer Pflanzung im Hochgebirge auf die Herkunft zu achten. Die Waldföhre beispielsweise könnte bei den aktuellen Klimaszenarien (trockenere Sommer, feuchtere Winter) auch in höhere sommertrockene Gebiete vorrücken, durch ihre ausgeprägte Anfälligkeit gegenüber Schneebruch könnte dies allerdings gebremst werden (BEBI, 2012). Die Bergföhre und vor allem die Lärche sind am besten an die Bedingungen an der Waldgrenze im Dischmatal angepasst. Die Fichte hingegen muss, was die mechanischen Eigenschaften angeht, als weniger geeignet eingestuft werden. Diese Eigenschaften können wie am Beispiel der Aufforstungsfläche am Stillberg deutlich wird,

über den Erfolg der Pflanzung entscheiden. Bei der Gründung eines neuen Bestandes im Hochgebirge sollten also vorher die auftretenden Naturgefahrenprozesse genau bestimmt und kartiert werden, um die richtige Baumartenwahl zu treffen. Aber natürlich sind die mechanischen Einwirkungen auf die Bäume nur einer von vielen Aspekten, die das Baumwachstum in diesen Höhen steuern. Erst bei einer ganzheitlichen Betrachtung können auch verlässliche Prognosen für das Waldwachstum der Zukunft gestellt werden.

## 5.7 Diskussion der Methodik

Ziel der Arbeit war es aber auch, keine absoluten Werte zu berechnen welchen Kräften ein Baum bei den unterschiedlichen Prozessen standhalten kann. Das dies nicht möglich ist, zeigen Untersuchungen von DORREN (2005). Resultate aus Steinschlagversuchen zeigten, dass ganze Bäume ein weit höheres Energieaufnahmevermögen haben, als man durch die Hochrechnung von Laborwerten von Holzproben erwartete. Allerdings spiegelten diese die tatsächlichen Verhältnisse der mechanischen Eigenschaften der Baumarten sehr gut wieder. Auch COUVREUR (1982) verzeichnete bei seinen Steinschlagversuchen im Feld um das 2,5-fache höhere Energiemengen, als er sie aus den Holzproben hochrechnete. Die Untersuchung an kleinen Holzproben ist also eine einfache, schnelle und effektive Methode um die Unterschiede der Baumarten verschiedener anderer Faktoren zu beschreiben. Genaue Werte für die Kräfte auf ganze Stammdurchmesser lassen sich aber nur mit Hilfe von Modellen berechnen, die die Unterschiede berücksichtigen. Diese Unterschiede liegen wohl schlussendlich darin, dass nicht alle unterschiedlichen Teile des Baumes berücksichtigt werden. Da wie beschrieben, der Stamm, das Wurzelsystem und die Baumkrone mit den Prozessen und auch untereinander interagieren. Im Steinschlagmodell von ZINGGELER (1990) sind diese Unterschiede beispielsweise mit dem Faktor 2 berücksichtigt.

Auch die Werte des E Moduls und der Biegefestigkeit sollten lediglich zu einer groben Einordnung zu anderen Werten aus der Holztechnik verwendet werden. Zwar wurden die Biegeversuche nach der Norm durchgeführt, dennoch ist nicht ganz ausgeschlossen, dass der geringere Probendurchmesser zu anderen Ergebnissen führt. Da das Verhältnis von Querschnitt zur Länge beibehalten wurde, müssten die Werte dieselben sein, dennoch ist nicht auszuschließen, dass Unregelmäßigkeiten im Holz bei kleinerem Durchmesser größere Auswirkungen haben. Zum Vergleich der Holzeigenschaften innerhalb dieser Untersuchung dienen die berechneten Werte aber sehr gut. Rein optisch zeigen die Probehölzer auch das gleiche Bruchbild wie die von HORAK (2004) fotografierten Schneebrüche an der Lärche. Sie brechen beide auf der Zugseite und bis zur Mitte des Abschnitts. Am Hang ist dies durch Schneedruck immer die Bergseite des Stammes. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die unterschiedliche Dauer und Wiederholung der Einwirkungen der verschiedenen Prozesse. Die Einwirkungen auf den Baum sind meist hoch dynamisch, nicht linear und komplex. Das führt zu einer unterschiedlichen Beanspruchung des Holzes und schlussendlich zu einem anderen Bruchverhalten. Aus dem Grund stellen die Biegeversuche und die Analysen nur ein vereinfachtes Bild der Realität dar. Ein weiterer Punkt, der die Laborversuche von Versuchen an stehenden Bäumen unterscheidet, ist die Wasserfeuchte. Durch die Trocknung konnte diese bis auf 2.5 bis 6% gesenkt werden. Nach KOLLMANN (1951) steigt das Dehnungsvermögen

mit dem Wassergehalt, das E Modul hingegen sinkt. Die mechanischen Eigenschaften im lebenden Baum unterscheiden sich also je nach Wassergehalt. LUNDSRTÖM (2007) zeigte bei seinem Vergleich der mechanischen Eigenschaften von frischem und trockenem Holz jedoch, dass beide bis zum Bruch in etwa die gleiche Menge an Energie absorbieren. Ebenfalls wird es eine Rolle spielen, ob, wie im Winter, die Zellzwischenräume gefroren sind. Ein Problem, welches während der Bearbeitung des Holzes auftrat, war die Krümmung der Stäbe. Dies geschah aufgrund der unvollständigen Trocknung der Stammabschnitte vor dem Einsägen. Einige der Stäbe krümmten sich anschließend noch um einige Millimeter, was dann Einfluss auf die Messungen hatte. Diese zusätzliche Variable war häufig signifikant, ein Einfluss von oder auf die anderen Variablen konnte durch die Kovarianzmodelle aber ausgeschlossen werden.

Leider waren die Ergebnisse der holzanatomischen Untersuchungen und der Bestimmung der Biomasse bei Beendigung der Diplomarbeit noch nicht verfügbar. So konnten meine Resultate leider noch nicht mit dem Hintergrund dieser Ergebnisse analysiert und diskutiert werden. Faktoren, wie der Spätholz- und Frühholzanteil, die Biomasseverteilung und vor allem die chemische Zusammensetzung könnten vielleicht einige der dargestellten Unterschiede erklären. Gerade der Spätholzanteil war bei den Biegeversuchen von LUNDSTRÖM (2007) einer der wichtigen Einflussfaktoren. Die Bestimmung des Spätholzanteils an meinen Holzproben wäre möglich gewesen, hätte aber mit dem Mikroskop durchgeführt werden müssen. Die Anzahl der Proben richtet sich laut DIN52186 nach dem Untersuchungszweck und nach ihrer Gleichmässigkeit. Je kleiner die Unterschiede der Beschaffenheit des Holzes, desto weniger Proben sind nötig, bei fehlerarmen geradfaserigem Holz sind nur 3 bis 5 Proben nötig. Ist das Holz sehr inhomogen, sind schon 8-10 Proben vorgesehen, und sollen Standortfaktoren analysiert werden, müssen noch mehr Proben untersucht werden, um eine verlässliche Aussage zu treffen. Der Probenumfang meiner Analyse mit mindestens 20 pro Höhenstufe und je 10 pro Baumart war also ausreichend. Ein größerer Probenumfang wäre jedoch bei der starken gemessenen Varianz der Werte auch innerhalb eines Baumes (siehe Anhang: Abb.24) besser gewesen. Diese Streuung beruht auf der Vielzahl an Faktoren, die bei den Biegeversuchen einen Einfluss ausüben. Leider konnte der Einfluss des CO<sub>2</sub> an der Bergföhre nicht untersucht werden, dies lag an der meist zu krummen Wuchsform. Letzlich wurden dann nicht ausreichend Proben für einen Vergleich gewonnen. Ein weiteres Problem wurde während der Ausgrabung der Wurzeln deutlich. Die am Boden verlegten Heizkabel befanden sich meist nicht im Gebiet der Wurzeln. Das bedeutet, dass der Einfluss auf den Baum wohl eher gering war. Bei meiner Analyse wurde auch kein Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften festgestellt. Bei der Analyse der Durchmesser konnten die Ergebnisse von LUNDSTRÖM (2007) und BRÜCHERT (2000) eines abnehmenden Elastizitätsmoduls mit der Höhe im Baum nicht bestätigt werden. Dies lag wohl neben der fehlenden Holzfeuchte auch an der zu geringen Probenzahl in einen Baum. Die Abschnitte lagen unter Umständen zu dicht zusammen, um einen Unterschied festzustellen. Außerdem wurde beim Einsägen nicht darauf geachtet, Holzproben aus genau den gleichen Jahrringen zu sägen. Für eine bessere Analyse müssten hier mehr und genauere Holzproben aus einem Baum gesägt werden.

## 6 Schlussfolgerung

Experimentell mit zusätzlichem  $CO_2$  begaste Lärchen wiesen signifikant höhere Werte der maximal möglichen Dehnung auf, sowie tendenziell höhere Werte für Jahrringbreite, Biegefestigkeit und E-Modul im Vergleich zu nicht begasten Kontrollbäumen. Auf die Holzdichte war jedoch kein Einfluss durch die erhöhten  $CO_2$ -Konzentrationen festzustellen. Erhöhte Temperaturen hatten keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes. Die mechanischen Eigenschaften des Holzes können also in Zukunft durch die veränderten Umweltbedingungen beeinflusst werden. Diese sind nur einer von vielen Faktoren, die im komplexen Ökosystem an der Waldgrenze eine Rolle spielen. Der direkte Einfluss von erhöhtem  $CO_2$  auf die mechanische Stabilität muss aber auch berücksichtigt werden. Die untersuchten Lärchen bildeten einen stabileren Stamm aus. Sie sind damit in der Lage, in Kombination mit dem nachgewiesenen höheren Wachstum (DAWES, 2010) schneller stabilere Bestände zu bilden.

Von den Baumeigenschaften haben die mittlere Jahrringbreite, die Astigkeit und die Holzdichte den größten Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften. Die Faserabweichung und Holzfeuchte spielen eine untergeordnete Rolle. Großen Einfluss hatte die Krümmung der Holzproben nach dem Sägen aufgrund der unvollständigen Trocknung. Keiner der aufgenommenen Variablen konnte den großen Unterschied der mechanischen Eigenschaften zwischen den Höhenstufen ganz erklären. Hier können die Gründe in den Zelleigenschaften oder z.B. dem Ligninanteil liegen. Bei der Analyse der Holzproben aus den unteren 3 Höhenstufen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den 5 und 8cm dicken Stammabschnitten gefunden werden. Eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften mit der Höhe im Baum, wie z.B. eine größere Flexibilität in der Baumkrone konnte demnach nicht festgestellt werden.

Die Höhenlage hatte einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Das E Modul und die Biegefestigkeit fallen mit steigender Höhe, während die Dehnbarkeit steigt. Die Elastizitätsgrenze der Spannung fällt mit der Höhe, gleichzeitig steigt die der Dehnung an. Das bedeutet die Bäume können den äußeren Einflüssen weniger Widerstand leisten, dafür lassen sie sich aber weiter biegen bis es zu irreversiblen Schäden im Stamm kommt. Das E Modul ist ein Maß für den Widerstand gegen die Verformung. Die Lärchen über der Waldgrenze bei 2200m ü.d.M. können den einwirkenden Prozessen gegenüber denen auf 1700m ü.d.M. um 60% weniger Widerstand leisten. Die maximale Kraft, die das Holz aushält, sank dagegen nur um ca. 20%. Dies gilt bei gleichem Durchmesser der Bäume. Das bedeutet, dass die Bäume in niedrigen Lagen steifer sind und sich bei kurzzeitig wirkenden Prozessen, wie einer Lawine, Steinschlag oder einer Sturmböe, weniger stark verbiegen und höhere Kräfte aushalten. Die Bäume an der Waldgrenze hingegen sind flexibler, und damit besser angepasst an die extrem hohe Schneebelastung im Winter. Diese wirkt permanent und kann daher besser von einem Baum ausgehalten werden, der sich stark verformen lässt und erst spät irreversible Schäden im Holz zeigt. Der größte Sprung beim E Modul wurde zwischen den Bäumen gemessen, die noch im Bestand an der Waldgrenze (2000m ü.d.M.) wuchsen und jenen an der Grenze zur alpinen Zone. In diesen Höhenlagen wachsen die Bäume meist alleine oder in kleinen Rotten und sind an Hängen noch höheren Schneelasten ausgesetzt. Die

äußeren Umwelteinflüsse stellen also unterschiedliche Anforderungen an die Stabilität der Bäume, die zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Bäume führen.

Die drei untersuchten Baumarten zeigen sehr unterschiedliche mechanische Holzeigenschaften. Das Holz der Fichte weist im Verhältnis zur Lärche geringere Festigkeitseigenschaften auf. Es zeigt bei geringerer Dehnung eine irreversible Verformung, die maximal mögliche Spannung ist geringer und das E Modul und damit der Widerstand gegen Verformung ist ebenfalls geringer. Das Holz der Bergföhre besitzt ein geringeres E Modul und eine geringere Festigkeit, aber eine höhere Elastizitätsgrenze und maximale Dehnung im Vergleich zur Lärche. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Lärche sowohl den höheren Kräften standhält, als auch der Kraft mehr Widerstand leisten kann. Zusätzlich ist auch eine höhere Kraft und Durchbiegung notwendig um das Holz irreversibel zu verformen. Da die Lärche zusätzlich im Winter ihre Nadeln verliert, und dem Schnee und Wind weniger Angriffsfläche bietet, ist sie insgesamt besser an die mechanischen Einwirkungen in schneereichen Lagen angepasst als die Fichte. Die Bergföhre reagiert anders auf äußere Umwelteinflüsse, sie besitzt die niedrigsten Festigkeitseigenschaften, dafür aber das größte Dehnungsvermögen. Sie erreicht eine hohe Resistenz gegenüber den Umwelteinflüssen durch eine größere Dehnbarkeit und weniger Widerstand gegen die Verformung. Die Bergföhre und vor allem die Lärche sind besser an die mechanischen Belastungen an der Waldgrenze angepasst als die Fichte.

## 7 Ausblick

Die vorliegende Arbeit wirft zahlreiche weitere Fragen auf, die während der Bearbeitung des Themas entstanden sind. Einige Aspekte blieben unbeantwortet und bieten Ansatzpunkte für die Durchführung weiterer Untersuchungen.

Die Gründe für den gemessenen starken Unterschied der mechanischen Eigenschaften in den Höhenstufen konnten nicht ganz geklärt werden. Hier würden zusätzliche Analysen der Holzeigenschaften, wie dem Cellulose- und Ligninanteil, dem Spätholz- und Frühholzanteil oder dem Zellvolumina und der Zellwanddicke, sicherlich sehr aufschlussreich sein. Gleiches gilt auch für die Unterschiede zwischen den Baumarten. Hier wäre es interessant, die genauen Hintergründe für die Schneebruchanfälligkeit zu erfahren. Welche Faktoren sind verantwortlich für das hohe E Modul der Waldföhre und die hohe Biegsamkeit der Bergföhre. Faktoren, die es der Bergföhre ermöglichen in schneereichere höhere Lagen der Alpen vorzudringen. Hier könnte die Studie auch auf die Grünerle oder Birke ausgeweitet werden, die ja für ihre Resistenz gegenüber Schneelasten bekannt sind.

Um einen genauen Bezug herzustellen zwischen der bei den Biegeversuchen gemessenen Kraft und den Kräften, die der ganze Stamm aushalten kann, müsste dafür ein Modell entworfen werden. Dieses müsste die Werte auf den ganzen Querschnitt hochrechnen und die verschiedenen Faktoren berücksichtigen, die bei den Prozessen eine Rolle spielen. Überprüft werden könnte dies durch Feldversuche an stehenden Bäumen. Ein Modell wie z.B. ZINGGELER (1990) es bei seinen Steinschlagversuchen entworfen hat. Dies würde es ermöglichen, mit geringem Aufwand mehr über die genaue Bremswirkung und Widerstandskraft von Bäumen und ganzen Beständen zu erfahren.

Neben den reinen Biegeversuchen wären vielleicht auch Zug- und Druckversuche am Holz interessant. Diese Versuche oder die Ausweitung auf mehr Baumarten oder Höhenstufen hätten allerdings den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

Da die Ergebnisse der anderen Untersuchungen an den CO<sub>2</sub> Bäumen noch nicht zur Verfügung standen, wäre es hier wichtig, die Ergebnisse erneut mit Variablen wie dem Spätholzanteil, der Verteilung von Frostringen oder und anderen Aspekten zu untersuchen. Dies könnte weitere Erklärungen für die mechanischen Unterschiede der Bäume liefern.

Die Daten von der Analyse des CO<sub>2</sub> Experiments zeigen, dass die mechanischen Eigenschaften des Holzes sich durch den CO<sub>2</sub> Anstieg und den Klimawandel verändern könnten. Die Reaktion könnte jedoch je nach Baumart und Höhenlage des Baumes anders ausfallen, und ist aufgrund der langen Lebensdauer der Bäume nur mit großem Aufwand zu erforschen. Hier müsste noch weitere Forschung betrieben werden, um verlässliche Aussagen über die Holzeigenschaften in den zukünftigen Umweltbedingungen treffen zu können.

## 8 Literaturverzeichnis

- Ammann, M., 2006:** Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren, Dissertation, Technische Hochschule Zürich, 239S.
- Alexander, L., Zhang, X., Peterson, T., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., Haylock, M., Collins, D., et. al., 2006:** Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, Journal of geophysical research, Vol.111, 22S.
- Aulitzky, H., 1963:** Grundlagen und Anwendung des vorläufigen Wind-Schnee Ökogramms. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Mariabrunn, S.765-834
- Aulitzky, H., Turner, H., 1982:** Bioklimatische Grundlagen einer standortgemäßen Bewirtschaftung des subalpinen Lärchen-Arvenwaldes. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen, S.327-579
- Baayen, A., Davidson, D., Bates, D., 2008:** Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items, Journal of Memory and Language 59, S. 390–412
- Barbeito, I., Dawes, M., Rixen, C., Senn, J., Bebi, P., 2012.:** Factors driving mortality and growth at treeline: a 30-year experiment of 92000 conifers. Ecology 93, S.389–401.
- Bartelt, P., Stoeckli, V., 2001:** The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snowavalanche flow, SLF-Davos, Switzerland, 8S.
- Bebi, P., Hagedorn, F., Martin, M., Rixen, C., Senn, J., Wasem, U., 2009:** Langfristige Waldgrenzen-Forschung am Stillberg – vor lauter Bäumen den Wald noch sehen, Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, 6 S.
- Bebi, P., Teich, M., Schwaab, J., Krumm, F., Walz, A., Grêt-Regamey, A., 2012:** Entwicklung und Leistungen von Schutzwäldern unter dem Einfluss des Klimawandels. Schlussbericht im Rahmen des Forschungsprogramms „Wald und Klimawandel“. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Bern, Bundesamt für Umwelt, 86S.
- Beismann, H., Schweingruber, F., Speck, T., Körner, C., 2002:** Mechanical properties of spruce and beech wood grown in elevated CO<sub>2</sub> Botanical Institute, University of Basel, Trees 10/2002
- Blaschke, L., Forstreuter, M., Sheppard, J., Leith, K., Murray, M., Polle, A., 2002:** Lignification in beech (*Fagus sylvatica*) grown at elevated CO<sub>2</sub> concentrations: interaction with nutrient availability and leaf maturation. Tree Physiology 22, S.469-477
- Brüchert, F., Becker, G., Speck, T., 2000:** The mechanics of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst]: mechanical properties of standing trees from different thinning regimes, Forest Ecology and Management, Volume 135, Issues 1–3, S.45–62

- Brüchert, F., Gallenmüller, F., Bogenrieder, A., Speck, T., 2003:** Stem mechanics, functional anatomy and ecology of *Alnus viridis* and *Alnus glutinosa*, Journal of Botanical Taxonomy and Geobotany, Volume 114, Issue 3-4, S.181–197
- Ceulemans, R., Jach, M., Van de Velde, R., Lin, X., Stevens, M., 2002:** Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> alters wood production, wood quality and wood strength of Scots pine (*Pinus sylvestris* L) after three years of enrichment Global Change Biology Volume 8, Issue 2
- Ceulemans, R., Janssens, I., 1999:** Effects of CO<sub>2</sub> Enrichment on Trees and Forests: Lessons to be Learned in View of Future Ecosystem Studies, Annals of Botany 84, S.577-590
- Chambers, S., Hastie, J., 1992:** Statistical Modells in S, Chapman and Hall/CRC, 608 S.
- Ch, 2011:** Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 S.
- Conroy, J., Milham, P., Mazur, M., Barlow, E., 1990:** Growth, dry weight partitioning and wood properties of *Pinus radiata* D. Don after 2 years of CO<sub>2</sub> enrichment Plant, Cell and Environment (1990) 13, S. 329-337
- Coutts, M., 1986:** Components of Tree Stability in Sitka Spruce on Peaty Gley Soil Forestry (1986) 59(2): S 173-197
- Couvreur, S., 1982:** Les forêts de protection contre les risques naturels. École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF), Nancy, France, 89 S.
- Cowie, A., Barton, C., Singh, B., Ximenes, F., Stone, C., 2007:** Climate Change Impacts and Research Priorities for the Forestry Sector, Background paper to DPI Priority Actions for Climate Change Workshop, 25S.
- Dawes, M., 2010:** Plant responses to long-term *in situ* CO<sub>2</sub> enrichment and soil warming at treeline in the Swiss Alps, Dissertation, Universität Basel, 128S.
- Dawes, M., Hättenschwiler, S., Bebi, P., Hagedorn, F., Handa, T., Körner, C., Rixen, C., 2011:** Species-specific tree growth responses to 9 years of CO<sub>2</sub> enrichment at the alpine treeline, Volume 99, Issue 2, S. 383–394
- DIN 52180-6, 1952:** Prüfung von Holz, Allgemeine Grundsätze, Biegeversuch, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 16S.
- DIN 68364, 1978:** Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 6S.
- Dorren, A., Berger, F., 2005:** Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts, Cemagref Grenoble, 9S.
- Dullinger, S., Dirnböck, T., Grabherr, G., 2005:** Modelling climate change- driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility, J. Ecology Nr. 92, S. 241- 252.

**Ellenberg, H., Leuschner, Ch., 2010:** Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen, 6. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1280 S.

**Fortin, M., Dale, M., 2005:** Spatial Analysis: A Guide for Ecologists, Cambridge University Press, 366S.

**Fox, J., 2002:** Linear mixed models: An appendix to “An R and S-PLUS companion to applied regression”. Sage Publications, 114S.

**Frehner, M., Wasser, B., Schwitter, R., 2005:** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Anhang 2A: Bestimmen des Standortstyps Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.

**Führer E., Nopp U., 2001:** Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Waldschäden, Facultas-Univ.-Verl., 412 S.

**Gardiner, B., Stacey, G., Belcher, R., Wood, C., 1995:** Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability Forest Research, Northern Research Station, Roslin, Midlothian, Scotland, 20S.

**Gindl, W., Grabner, M., Wimmer, R., 2000:** The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width. Trees 14, S.409-414.

**Graf, O., 1926:** Versuche über die Elastizität und Festigkeit von Tannenholz und Eichenholz nach oftmals wiederholter Belastung und Entlastung, Bautechnik Band 6 , S. 436/441

**Green, D., Winandy, J., Kretschmann, D., 1999:** Mechanical properties of wood, Wood handbook : wood as an engineering material, USDA Forest Service, Forest Products laboratory, General technical report FPL , 113S.

**Handa, T., Körner, C., Hättenschwiler, S., 2006:** Conifer stem growth at the altitudinal treeline in response to four years of CO<sub>2</sub> enrichment. Global Change Biology 12, S.2417-2430

**Harsch, M., Hulme, P., McGlone, M., Duncan, R., 2009:** Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. Ecology Letters 12. S. 1040-1049

**Hättenschwiler, S., Schweingruber, F., Körner, C., 1996:** Tree ring responses to elevated CO<sub>2</sub> and increased N deposition in *Picea abies*. Plant, Cell and Environment, 19, S.1369–1378

**Hättenschwiler, S., Handa, T., Egli, L., Asshof, R., Ammann, W., Körner C., 2002:** Atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment of alpine treeline conifers. New Phytol. 156: S.363–375

**Höller, P., Fromm, R., Leitinger, G., 2009:** Snow forces on forest plants due to creep and glide, Forest Ecology and Management, Federal Research Centre for Forests, Innsbruck, S.546-552

**Holtmeier, K., 1985:** Die klimatische Waldgrenze- Linie oder Übergangsraum (Ökoton)?, Ein Diskussionsbeitrag unter besonderer Berücksichtigung der Waldgrenzen in den mittleren und hohen Breiten der Nordhalbkugel, Erdkunde, Band 39, Nr. 4, S. 271-285.

**Horak, G., 2004:** Growth, survival and stem damages of planted larch and stone pine (1975-2003) in an avalanche release area at timberline in Dischmatal, Diplomarbeit des Geographischen Instituts Zürichs, ETH Zürich, 104S.

**Hübl J., Hochschwarzer M., Sereinig N., Wöhler-Alge M. (Ed.) 2011:** Alpine Naturgefahren. Ein Handbuch für Praktiker. Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Vorarlberg, 133S.

**IPCC Forth Assessment Report, 2007:** Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, Vulnerability, Cambridge University Press, Cambridge, 976 S.

**Jonsson, O., 2007:** Energy absorption of trees in a rockfall protection forest, Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 222S.

**Kilpeläinen, A., Peltola, H., Ryyppö, A., Kellomäki, S., 2005:** Scots pine responses to elevated temperature and carbon dioxide concentration: growth and wood properties, Tree Physiology 25, S.75–83

**Knufinke, A., 1998:** Frostringe in Lärchen und deren Beziehung zu Wetter und Standort dargestellt an Material aus der Waldgrenz-Aufforstung Stillberg, Davos, Schweiz, Diplomarbeit, SLF, Davos, 112S.

**Kollmann, F., 1951:** Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, SpringerVerlag, 1050S.

**Körner, C. 2006:** Plant CO<sub>2</sub> responses: an issue of definition, time and resource supply, New Phytologist 172, S.393-411.

**Körner, C., 2012:** Alpine Treelines Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits ,Springer Verlag, 220 S.

**Kostiainen, K., 2007:** Wood properties of northern forest trees grown under elevated CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and temperature, University of Oulu, Department of Biology, 36S.

**Leibold, E., 2012:** Räumlich-zeitliche Analyse der alpinen Waldgrenze während der letzten 40 Jahre im Dischmatal (Davos), Universität für Bodenkultur Wien, 80S.

**Leibundgut, H., 1986:** Unsere Gebirgswälder: Natur – Zustand- Bewirtschaftung, Bern; Stuttgart, Haupt, 86 S.

**Leuenberger, F., 1988:** Der temporäre Stützverbau im Versuchsgebiet Stillberg. Schweiz. Z. Forstwes. 139: S.790-792.

**Lorenzato, L., 2001:** Analyse von Waldschäden hinsichtlich der Bremswirkung von Wald auf Lawinen. Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München. 91 S.

- Lundström, T., 2010:** Mechanical stability and growth performance of trees. PhD thesis no. 1644, University of Fribourg, Switzerland, 143S.
- Margreth, S., 2004:** Die Wirkung des Waldes bei Lawinen, Forum für Wissen, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, S.21–26
- Margreth, S., 2007:** Snow pressure on cableway masts: Analysis of damages and design approach, Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SLF), Davos, 12S.
- Märki, C., Niemtz, P., Mannes, D., 2005:** Vergleichende Untersuchungen zu ausgewählten mechanischen Eigenschaften von Eibe und Fichte Schweiz. Z. Forstwes, 3–4, S.85–91
- Mayr, S., Hacke, U., Schmid, P., Schwienbacher, F., Gruber, A., 2006:** Frost drought in conifers at the alpine timberline: xylem dysfunction and adaptations. Ecology 87, S.3175-3185
- McClung, M., 1993:** Comparison of analytical snow pressure models, Canadian Geotechnical Journal, Volume 30, Number 6, S. 947-952
- Michael, B., 2009:** Risikokzept für Naturgefahren - Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern, 420 S.
- Nicoll, B., Achim, A., Mochan, S., Gardiner, A., 2005:** Does steep terrain influence tree stability? A field investigation, Forest Research, Northern Research Station, Roslin, Midlothian, Scotland, 8 S.
- Nicolussi, K., Bortenschlager, S., 1995:** CO<sub>2</sub>-Anstieg und Jahrringbreitentrends bei Pinus cembra in den westlichen Zentralalpen Tirols (Österreich) CO<sub>2</sub>-Increase and Trends of Tree ring widths of Pinus cembra in the western central Alps of Tirol (Austria), Institut für Botanik der Universität Innsbruck, 17S.
- Nicolussi, K., Kaufmann, M., Patzelt, G., van der Plicht, J., Thurner, A., 2005:** Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. Vegetation History and Archaeobotany 14, S.221-234.
- Nielsen, C., 1990:** Einflüsse von Pflanzabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf die Biomasseverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte. Frankfurt a. M., Sauerländer, 279S.
- Niemz, P., 2011:** Holz und Holzwerkstoffe, Skript zur Vorlesung Werkstoffe 1 (Materialeigenschaften), ETH Zürich, 49S.
- Noack, D., Geissen, A., 1976:** Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit auf das E-Modul des Holzes im Gefrierbereich. Holz als Roh- und Werkstoff, Volume 34, Issue 2, S 55-62
- Norby, R., DeLucia, E., Gielen, B., Calfapietra, C., Giardina, C., King, J., Ledford, J., et al., 2005:** Forest response to elevated CO<sub>2</sub> is conserved across a broad range of productivity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102, S.18052-18056.

**Noren, B., 1968:** Nailed joints- their strength and rigidity under short-term and long-term loading. Stockholm, The National Swedish Institute for Building Research, Report 22, 77 S.

**Nowak, S., Ellsworth, S., Smith, D., 2004:** Functional responses of plants to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> - do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytologist* 162,S.253-280.

**Ott, E., Frehner, M., Frey, H. , Lüscher, P., 1997:** Gebirgsnadelwälder, Praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung Haupt Verlag,1. Auflage 287 S.

**Pearson, P., Palmer, M., 2000:** Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature* 406, S.695-699.

**Peltola, H., 2006:** Mechanical Stability of trees under static Loads, University of Joensuu, Faculty of Forestry, P.O. Box 111, FI-80101 Joensuu, Finland *American Journal of Botany* 93(10), S. 1501–1511.

**Peltola, H., Kellomaekia, S., Hassinenb, A., Granandera, M., 2000:** Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland, *Forest Ecology and Management* 135 (2000) S.143-153

**Rickli, C., Graf, F., Gerber, W., Frei, M., Böll, A., 2004:** Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren geologischen Ursprungs Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 8S.

**Salm, B., 1979:** Snow forces on forest plants. In *International Seminar on Mountain Forests and avalanches*, Davos,SLF, Switzerland, S.157-181

**Schilcher, C., 1964:** Erschwernisse bei Hochlagenaufforstungen, *Allgemeine Forstzeitung Wien* 75 (21/22), S.237-238

**Schönenberger, W., 1986:** Rottenaufforstung im Gebirge. *Schweiz. Z. Forstwes.* 137, S. 501-509.

**Schönenberger, W., Frey, W., 1988:** Untersuchungen zur Ökologie und Technik der Hochlagenaufforstung – Forschungsergebnisse aus dem Lawinenanrissgebiet Stillberg. *Schweiz. Z. Forstwes.* 139, S.735–820.

**Sell, J., 1997:** Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten, Hep Verlag, 72S.

**Sellier, D., Fourcaud, T., 2009:** Crown Structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds, *American Journal of Botany* 96(5), S. 885–896

**Senn, J., Schönenberger, W., 2001:** Zwanzig Jahre Versuchsaufforstung Stillberg: Überleben und Wachstum einer subalpinen Aufforstung in Abhängigkeit vom Standort. *Schweiz. Z. Forstwes.* 152, S. 226-246.

**Stahel, W., 2000:** Statistische Datenanalyse. Eine Einführung für Naturwissenschaftler Vieweg,3.Auflage, Wiesbaden, 380S.

**Stokes, A., Salin, F., Kokutse, D., Berthier, S., 2005:** Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps, *Laboratoire du Rheologie du Bois de Bordeaux*, 11S.

**Suda, J., 2011:** Schutzbauwerke Bautechnische Bemessung Grundlagen, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Universität für Bodenkultur Wien, 110S.

**Surber, E., 1964:** Ballenpflanzen - ein Mittel zur Dehnung und Verlagerung der Pflanzzeit. Prakt. Forstwirt 4: 117-125.

**Teich, M., Bartelt, P., Grêt-Regamey, A., Bebi, P., 2012:** Snow Avalanches in Forested Terrain: Influence of Forest Parameters, Topography, and Avalanche Characteristics on Runout Distance, WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Arctic, Antarctic, and Alpine Research 44(4), S.509-519

**Telewski, F., Swanson, R., Strain, B., Burns J., 1999:** Wood properties and ring width responses to long-term atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment in field-grown loblolly pine (*Pinus taeda* L.) Plant, Cell and Environment 22, S.213–219

**Tranquillini, W., 1979:** Der Einfluss der Schneedecke auf die Lebensvorgänge von Forstpflanzen. Mountain forests and avalanches. Proceedings of the IUFRO meeting in Davos, S.123-138

**Turner, H., 1969:** Reliefbedingte Mikroklimata und ihr Einfluss auf die Vegetationsverteilung im Hochgebirge. Météorol, 43S.

**Urfer, C., 1981:** Mittlere Temperatur- und Windverteilung im Dischmatal bei Davos bei typischen sommerlichen Witterungslagen, Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, Veröffentlichung Nr. 43, Zürich, 49 S.

**Vanomsen, P., 2000:** Vergleichende Untersuchung der Stabilität junger Arven (*Pinus cembra* L.) und Lärchen (*Larix decidua* L.): Stammbrüche und -spaltungen in Lawinenanrissgebieten in der Versuchsaufforstung Stillberg (GR) nach einem schneereichen Winter, Diplomarbeit des Departements Forstwissenschaften, ETH Zürich, 109S.

**Venables, W., Ripley, B., 2002:** Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition, Springer Verlag, 460S.

**Vögele, A., 1984:** Untersuchungen zur Geomorphologie und Jungquartären Talgeschichte des Dischma, Geographisches Institut der Universität Zürich, Physische Geographie Vol. 14: Zürich.

**Wagenführ, A., Scholz, F., 2012:** Taschenbuch der Holztechnik, Hanser Verlag, 2. Auflage, 567S.

**Wegener, K., 2012:** Werkstoffe und Fertigung I, Spannung und Dehnung, Idealstruktur, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, ETHZ Zentrum, 9S.

**Wieser, G., Michael T., 2007:** Trees at their Upper Limit, Treelife Limitation at the Alpine Timberline, Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape (BFW), Innsbruck, Austria, 232 S.

**Wüthrich, C., Scherrer, S., Begert, M., Croci-Maspoli, M., Marty, C., Seiz, G., Foppa, N., Konzelmann, T., Apenzeller, C., 2010:** Die langen Schneemessreihen der Schweiz – Eine basisklimatologische Netzanalyse und Bestimmung besonders wertvoller Stationen mit Messbeginn vor 1961, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 233, 33 S.

**Yazaki, K., Ishida, S., Kawagishi, T., Fukatsu, E., Maryama, Y., Kitoa, M., Tobita, H., et. al., 2004:** Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth, annual ring structure and photosynthesis in *Larix kaempferi* seedlings. *Tree Physiology*, 24, 941–949.

**Ylinen, A., 1956:** Über die Beziehungen zwischen Spätholzanteil, Rohwichte und den elastischen Konstanten bei Holz mit ausgeprägtem Jahrringbau, *Journal Holz als Roh- und Werkstoff*, Volume 14, Issue 6 , pp 205-207

**Zenke, B., 1985:** Der Einfluss abnehmender Bestandesvitalität auf Reichweite und Häufigkeit von Lawinen. *Forstwissenschaftliches Zentralblatt*, S.137-145

**Ziche, D., Overdieck, D. 2004:** CO<sub>2</sub> and temperature effects on growth, biomass production, and stem wood anatomy of juvenile Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Journal of Applied Botany* 78,S.120-132.

**Zinggeler, A., 1990:** Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern: Modellierung der relevanten Teilprozesse. M.Sc. Thesis, Univ. Bern, Bern, Switzerland, 116 p. Bern, Switzerland, 116 S.

## 9 Anhang

### 9.1 Modelle zur Berechnung der Schneedrücke am Stillberg

**Schneedruck nach der Schweizer (Margreth, 2007) und Österreichischen Richtlinie (Suda, 2011)**

$$S'_N = pg \frac{H^2}{2} KN$$

$$F_{RI} = S'_N d$$

$S'_N$ : Schneedruck pro Längeneinheit auf Objekte im Schnee [ $\frac{N}{m}$ ]

$F_{RI}$ : Kraft auf den Baum [N]

N: Gleitfaktor 2,0 Abhängig von Exposition (Nordosten) und Bodenbeschaffenheit (Klasse 3) der Fläche (Margreth, 2007)

K: Kriechfaktor 0,72 Abhängig von Schneedichte (p) und Hangneigung ( $\psi$ ) (Suda, 2011)

g: Erdbeschleunigung 9,81 [ $\frac{m}{s^2}$ ]

H: Mittlere Schneetiefe 1,46 [m]

d: Breite des Baumes mit Ästen Durchschnitt 0,5-1,0m

p: Mittlere Schneedichte 400 [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

Ergibt einen Schneedruck von 6022 [ $\frac{N}{m}$ ] und eine Kraft auf den Baum zwischen 3,01 und 6,02 [kN] je nach Breite des Baumes (0,5-1m). Das entsprechende Gewicht, das eine solche Kraft hervorbringt, berechnet sich aus  $m = \frac{F}{g}$  [kg].

**Schneedruck nach dem Modell von McClung und Larsen (1993)**

$$\sigma = \left[ \left\{ \frac{2}{1-v} \right\} \left\{ \left( \frac{d}{D} \right) + \left( \frac{L}{D} \right) \right\} \right]^{0.5} pgD \sin\psi + 0.5 \left( \frac{v}{1-v} \right) pgD \cos\psi$$

$$L = \frac{1}{4} (\sin\psi)^{0.5} + \frac{1}{4} \left( \frac{v^2}{1-v} \right)$$

$$F_{MCC} = \sigma dD$$

$\sigma$ : Spannung auf Objekte im Schnee [ $\frac{N}{m^2}$ ]

$F_{McC}$ : Kraft auf den Baum [N]

$\nu$ : Poisson Zahl: 0,2 (Höller,2009)

$d'$ : Stagnationstiefe abhängig von Viskosität  $\mu$  des Schnees und der Gleitgeschwindigkeit  $v_g$  berechnet sich aus  $d' = \frac{\mu v_g}{2(1-\nu) \rho g D \cos \psi}$  : Annahme mittlerer Wert 8m (Höller, 2009)

$v_g$ : Mittlere Gleitgeschwindigkeit Annahme:  $10 \left[ \frac{mm}{d} \right]$  (Höller, 2009) (Suda, 2011)

$p$ : Mittlere Schneedichte  $400 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$D$ : Mittlere Schneehöhe Stillberg 1,26 [m] (berechnet sich aus der Schneetiefe:  $D = \sin(90 - \psi)H$  )

$\psi$ : Durchschnittliche Hangneigung Stillberg 30 [°]

$g$ : Erdbeschleunigung  $9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$

$d$ : Breite des Baumes mit Ästen Durchschnitt 0,5-1,0m

Ergibt eine Spannung von  $8454 \left[ \frac{N}{m^2} \right]$  und eine Kraft auf den Baum zwischen 5,32 und 10,65 [kN] je nach Breite des Baumes (0,5-1m). Das entsprechende Gewicht, das eine solche Kraft hervorbringt, berechnet sich aus  $m = \frac{F}{g}$  [kg].

Bei beiden Modellen sind die Randlasten, die durch das seitliche Umfließen des Schnees entstehen, nicht berücksichtigt. Sie berechnen sich aus  $k_R = (0,92 + 0,65 k_{gl}) \frac{A}{2}$  (Suda, 2011). Bei einem durchschnittlichen Abstand (A) von einem Meter zum nächsten Baum und einem Gleitfaktor  $k_{gl}$  von 2 ergibt sich ein Randfaktor  $k_R$  von 1,1, der wenig Einfluss auf die resultierende Kraft hat. Aufgrund der starken Abhängigkeit von A und der Varianz in der Aufforstungsfläche am Stillberg wird der Einfluss aber nicht berücksichtigt. Die Modelle geben nur einen groben Ansatz über die auftretenden Kräfte. Höller (2009) zeigte bei seinen Feldversuchen im Stubaital in Tirol, dass die verwendeten Modelle mit der Realität vergleichbare Werte liefern.

## 9.2 Veränderung der Lufttemperatur und Schneeschmelze im Untersuchungsgebiet von 1975 bis 2005

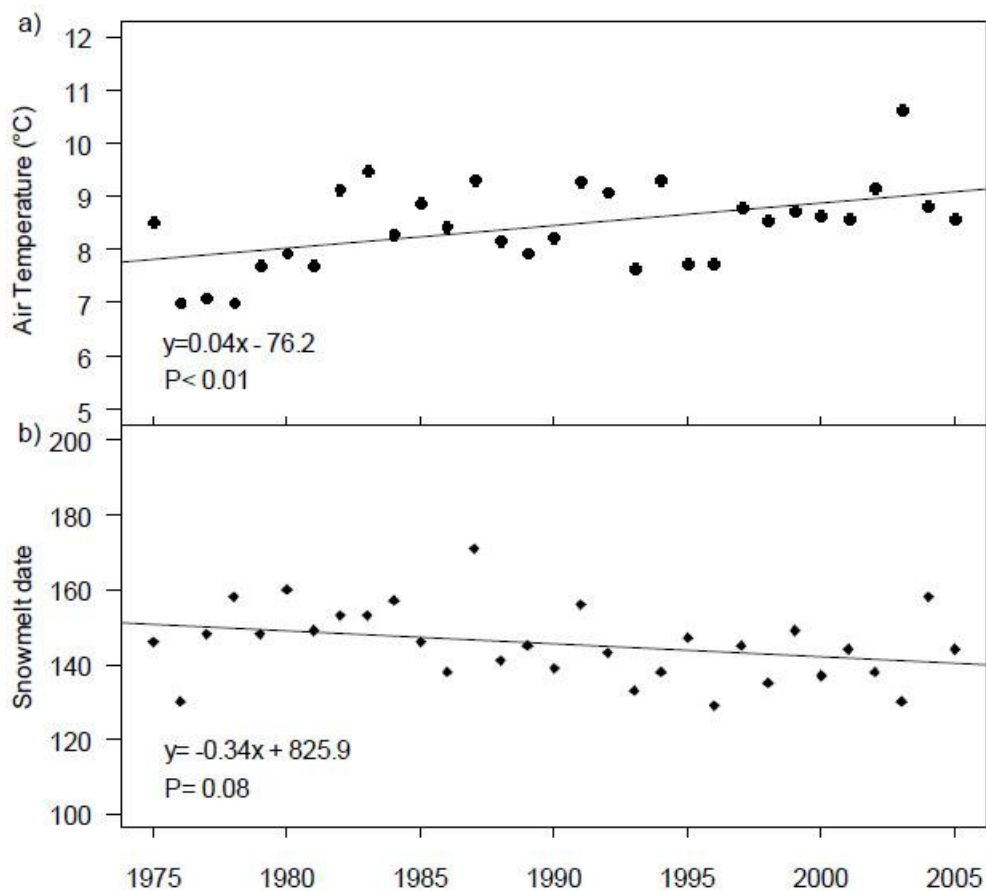
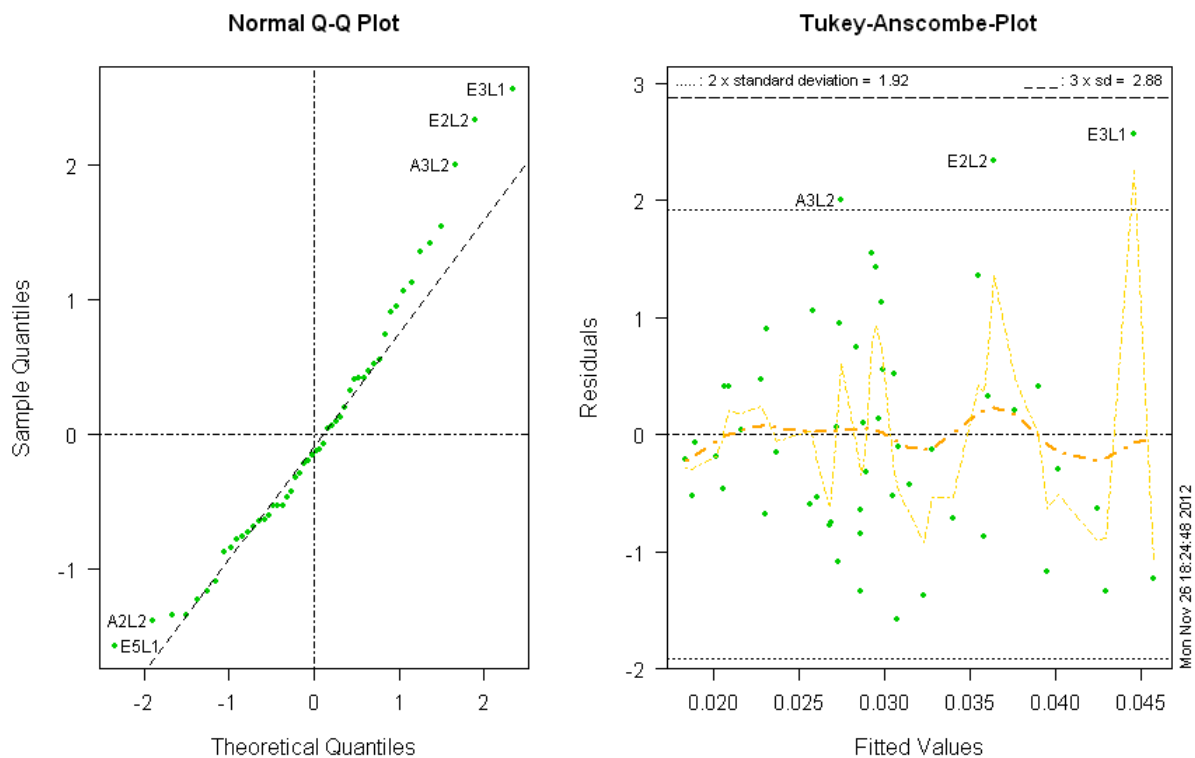
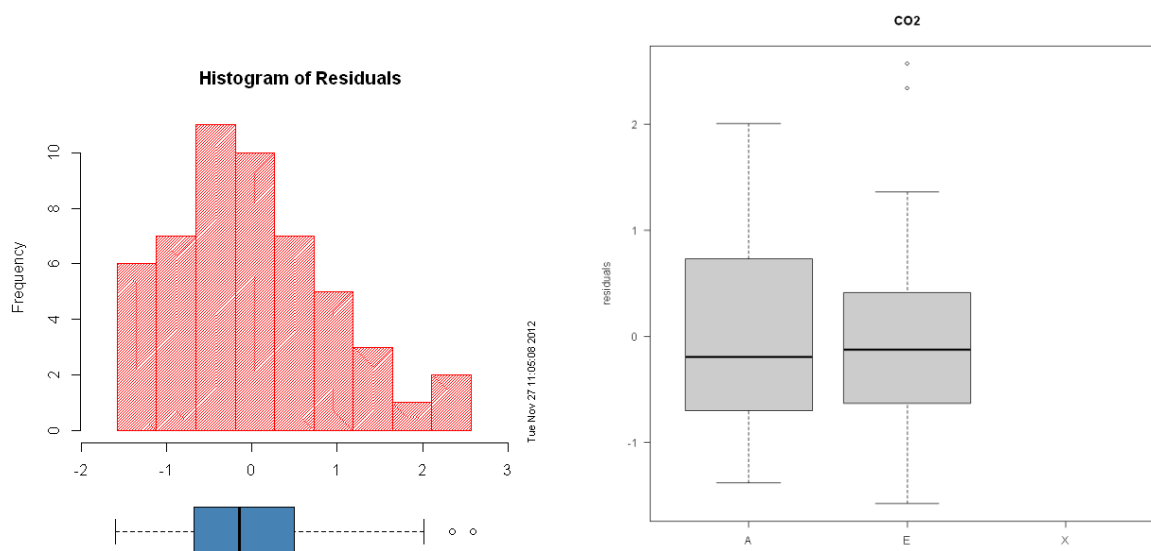


Abbildung 20: a) Mittlere Lufttemperatur während der Vegetationszeit und b) mittleres Datum der Schneeschmelze an der Wetterstation am Fuß der Stillberg Aufforstungsfläche (2090m ü.d.M.) Gezeigt ist die Regressionsgeradengleichung und die Fehlerwahrscheinlichkeit der Regressionssteigung (P Wert) (Barbeito,2012).

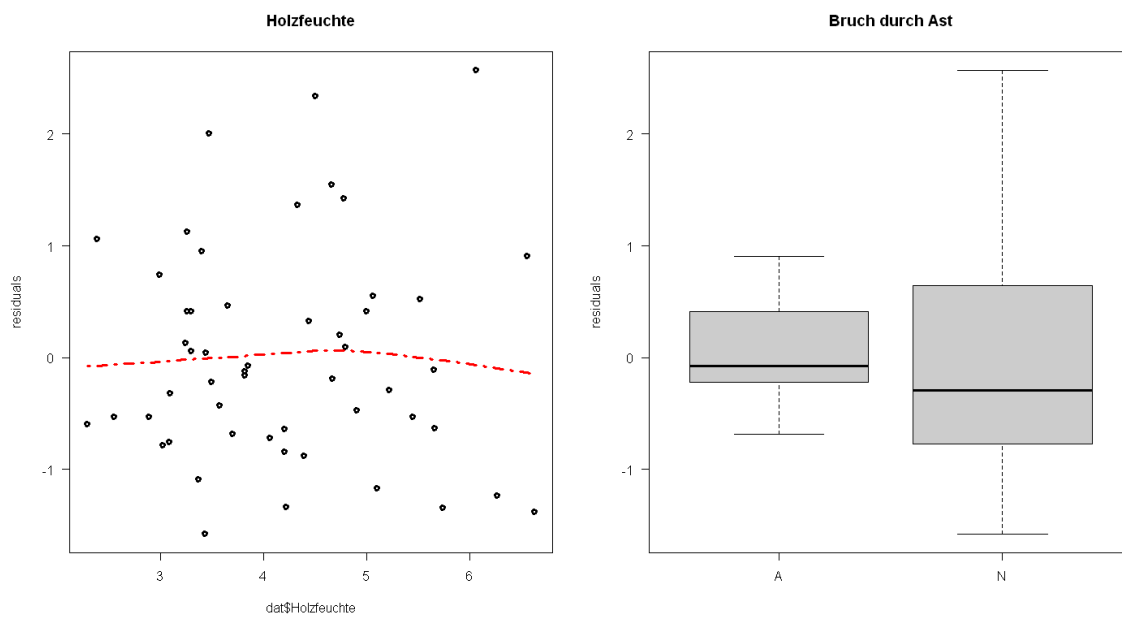
### 9.3 Residuenanalyse der Kovarianzmodelle



**Abbildung 21:** Überprüfen der Normalverteilung anhand der Residuenanalyse mit Hilfe des Quantil-Quantil-Diagramms und der Heteroskedastizität (Heterogenität der Varianz) mit Hilfe des Turkey-Anscombe-Plots. Die dicke orangene (Faktor: 0.9) und goldene Linie (Faktor: 0.5) stellen den Glätter der Residuen dar (Faktor:0=keine Glättung, Faktor:1=Gerade). Dargestellt ist das Beispiel der maximalen Dehnung des  $\text{CO}_2$  Versuches. Die Ausreißer sind markiert.

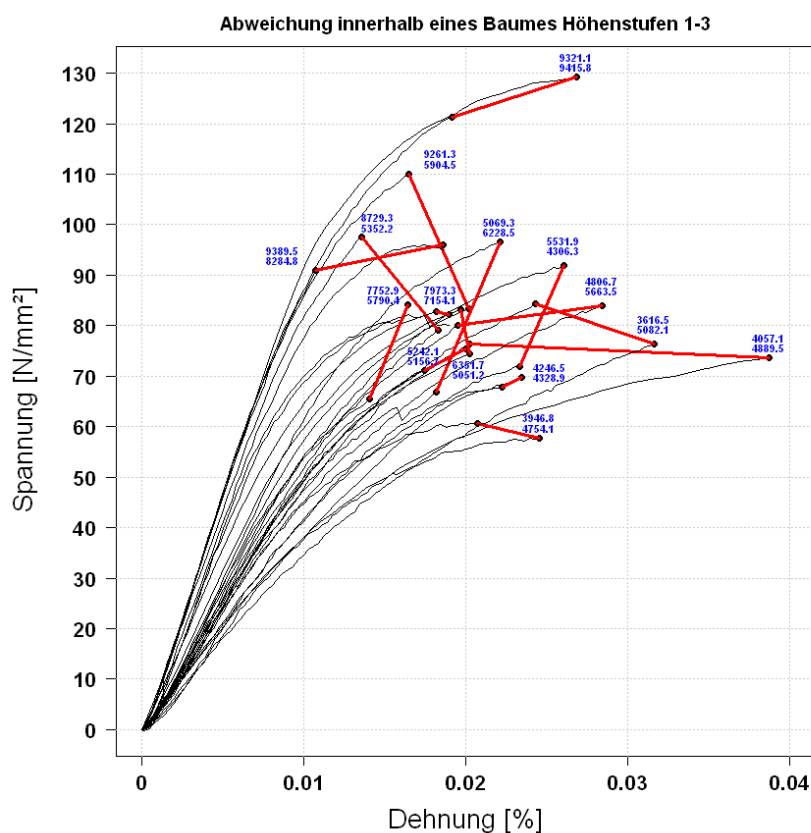


**Abbildung 22:** Dargestellt ist das Beispiel der maximalen Dehnung des  $\text{CO}_2$  Versuches. Links: Histogramm der berechneten Residuen der Werte des Kovarianzmodells. Mit Verteilung der Werte im Box Whisker Plot darunter. Rechts: Pearson-Residuen gegen die Ziel-Variable des  $\text{CO}_2$ . Die kategorische Variable des  $\text{CO}_2$  ist im Boxplot dargestellt. A: kein  $\text{CO}_2$ , E:  $\text{CO}_2$



**Abbildung 23:** Pearson-Residuen gegen die unabhängigen Variablen der Holzeigenschaften. Dargestellt ist das Beispiel der maximalen Dehnung des  $\text{CO}_2$  Versuchs anhand der signifikanten Variablen Holzfeuchte und Bruch durch einen Ast. Die rote Linie stellt den Glätter der Residuen dar. Die kategorische Variable des Bruchs durch einen Ast ist im Boxplot dargestellt. A: Ast, N: kein Ast

## 9.4 Abweichung der mechanischen Eigenschaften innerhalb eines Baumes



**Abbildung 24:** Abweichung (Rote Verbindungsstrecken) der Brüche (Biegefestigkeit und Maximale Dehnung) der Holzproben innerhalb eines Baumes. Die blau dargestellten Zahlen sind die E Module der beiden Messungen.

## 9.5 Beispiel für den Output eines Kovarianzmodells in R

```
anova(model.stability)
```

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	27	824.2623	<.0001
Krumpung	1	26	19.9819	0.0001
BruchdurchAst	1	26	6.3979	0.0178
Holzdicke	1	26	7.6291	0.0104
Art	1	27	4.6361	0.0404
HoheMeer	1	27	4.3574	0.0464

```
summary(model.stability)
```

	Value	Std.Error	DF
(Intercept)	8289.225	2823.7610	27
Krumpung	-398.779	93.5844	26
BruchdurchAstN	785.128	458.1052	26
Holzdicke	7.456	3.0049	26
ArtL	801.945	436.7093	27
HoheMeer	-3.472	1.6634	27

**Tabelle 15:** Beispiel für den Output eines Kovarianzmodells am Beispiel der Fichte und Lärche beim E-Modul in der 1. bis 3. Höhenstufe. Oben: Links stehen die Variablen, rechts die statistischen Werte des Freiheitsgrades und des F und P Wertes. Unten: Achsenabschnitt(Intercept), Wert der positiven oder negativen Abweichung (Value) mit Standardfehler (Std.Error)

## Erklärung

Hiermit versichere ich durch meine Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich habe mich keiner anderen als der angegebenen Literatur oder sonstiger Hilfsmittel bedient. Die Arbeit hat in dieser oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wien, den

---

Roland Mende