



Hochschule für Forstwirtschaft
Rottenburg

Hochschule für Angewandte Wissenschaften

BACHELORARBEIT

Erforderliche Hubkräfte bei der Baumfällung unter Verwendung technischer Fällhilfen

Mark-Fabian Franz

Hochschule für Forstwirtschaft in Rottenburg (HFR)

Betreuendes Unternehmen:
Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF e.V.)

Allgemeine Angaben

Verfasser

Mark-Fabian Franz

Erstprüfer

Prof. Dr. Dirk Wolff, Professor HFR

Zweitprüfer

Prof. Dr. Ute Seeling, Geschäftsführende Direktorin KWF (e.V.)

Experte

M. Eng. Kai Lippert (KWF e.V.)

Anschrift der HFR

Hochschule für Forstwirtschaft
Rottenburg
Schadenweilerhof
D-72108 Rottenburg a.N.

Betreuendes Unternehmen

KWF e. V. (Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.)
Spremlinger Str. 1
D-64823 Groß-Umstadt

2. Auflage – überarbeitete Version 2021 (entspricht inhaltlich der Original-Version vom 21. September 2020)

Copyright 2. Auflage
© 2021

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung reproduziert oder über elektronische Systeme verbreitet werden. Die Genehmigung ist bei dem Autor, der HFR oder dem KWF einzuholen. Bei gesperrten Arbeiten ist jegliche Art der Weiterverwendung verboten.

Danksagung

Diese Seite möchte ich nutzen, um mich bei den Personen zu bedanken, die mich während der Bachelorarbeit beraten, unterstützt und motiviert haben.

Ich möchte Herrn Prof. Dr. Dirk Wolff danken, dass ich dieses Thema in Form einer Bachelorarbeit behandeln durfte und er mich in schwierigen Situationen und bei der Bearbeitung von komplexen Teilbereichen beraten hat.

Mein Dank gilt Frau Prof. Dr. Ute Seeling, der Geschäftsführenden Direktorin des KWF e.V. Ich möchte ihr für anregende und zielgerichtete Gespräche, nützliche Hinweise und unterstützende Fragestellungen danken.

Weiterhin möchte ich mich bei den dortigen Kolleginnen und Kollegen für die sowohl fachliche Beratung als auch personelle Unterstützung bei der Fällung der Bäume und der Auswertung der Daten bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Kai Lippert, welcher mich auf die Idee zu dieser Bachelorarbeit gebracht hat und mir über die Bearbeitungszeit vor allem von technischer Seite mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ich möchte Herrn Jörg Kaffenberger vom Forstamt Groß-Umstadt und Herrn Bernd Handbichler vom Forstamt Alzenau für die Bereitstellung der Versuchsflächen herzlich danken.

Weiterhin gilt mein Dank den Herren Burkardt Pritsch, Thomas Fottner, Volker Gerding und Marco Reetz für die beratende Unterstützung bei fachlichen und forstspezifischen Fragestellungen. Herrn Walter Bopp möchte ich für das anregende Gespräch über die Calmbacher Hilfstabelle danken.

Mein Dank gilt Herrn Julius Schuck von der FAWF für die Datenlieferung der Baumgewichte. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Knut Fischer von der Grube KG für die Bereitstellung der Daten bedanken.

Abschließend gilt mein Dank meiner Familie, meiner Freundin, meinen Freunden und Verwandten, welche mir mit Geduld und motivierenden Worten in dieser Zeit zur Seite standen.

Durch die Anfertigung der Arbeit konnte ich Kontakte knüpfen und mein bisheriges Wissen selbstständig erweitern.

Inhaltsverzeichnis

Allgemeine Angaben	I
Danksagung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis	XI
Formelverzeichnis	XI
Abstract	XII
Zusammenfassung	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Technik, Sicherheit und Unfallprävention bei der Waldarbeit	1
1.2 Überblick zu vorausgehenden Untersuchungen	5
1.3 Problemstellung, Zielsetzung, Hypothesen und Lösungsansatz	6
2 Stand des Wissens	8
2.1 Statik und Festigkeit von Bäumen	8
2.2 Schwerpunkt und Kippunkt von Rotationskörpern	10
2.3 Bisherige Praxismethoden zur Bestimmung der Hangrichtung des Baumes	11
2.4 Definition und Historie von Fällhilfen	13
2.5 Aufbau und Anwendung der Fällhilfen.....	15
2.5.1 Grundlagen der technischen Funktionsweise	15
2.5.2 Aufbau und Funktionsweise der technischen Fällhilfen	18
2.5.3 Praktische Anwendung von Fällhilfen	22
2.5.4 Vorteile und Nachteile der technischen Fällhilfen	25
3 Material und Methoden	28
3.1 Umfrage zur Anwendung der Fällhilfen	28
3.2 Annahmen und Basisdaten für die Hubkraftermittlung	30

3.3	Beschreibung der Grundlagen der Versuchsreihen.....	34
3.3.1	Verwendete Mess- und Hilfsmittel.....	34
3.3.2	Basisdaten und technische Grundlagen	37
3.3.3	Anforderungen und Beschreibung der Versuchsbestände.....	38
3.3.4	Berechnungsgrundlagen.....	41
3.3.4.1	Grundlagen der Lasermessung	41
3.3.4.2	Grundlagen der Baumdarstellung.....	43
3.3.4.3	Grundlagen der Volumenberechnung	47
3.3.4.4	Grundlagen der Schwerpunktbestimmung	50
3.3.4.5	Herleitung des Rückhangs	51
3.3.4.6	Grundlagen der Hubkraftberechnung	52
3.3.5	Grundlagen der Hubkraftmessung	53
3.4	Berechnung und Abgleich mit Messwerten	57
3.4.1	Hubkraft für die Verlagerung des Massepunktes	57
3.4.1.1	Versuchsaufbau	57
3.4.1.1	Berechnung der benötigten Hubkraft.....	58
3.4.1.2	Messung der benötigten Hubkraft	60
3.4.1.3	Analyse der gemessenen und berechneten Werte.....	62
3.4.2	Spannungen in der Bruchleiste	64
3.4.2.1	Versuchsaufbau	64
3.4.2.2	Simulation und Berechnung der Spannungen.....	65
3.4.2.3	Messung der Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste	71
3.4.2.1	Abgleich der gemessenen und berechneten Werte.....	72
3.4.3	Hubkraft zur Fällung eines Ganzbaumes.....	73
3.4.3.1	Versuchsaufbau	73
3.4.3.2	Berechnung der benötigten Hubkraft von Ganzbäumen.....	74
3.4.3.3	Messung der benötigten Hubkraft der Ganzbäume.....	77
3.4.3.4	Abgleich der Messwerte mit der Berechnung	79

4	Erstellung der Modelle und eines Kalkulators	86
4.1	Erstellung und Auswertung von Modellen	86
4.1.1	Modellerstellung aus den gemessenen und berechneten Hubkräften ..	86
4.1.2	Auswertung der Modelle	88
4.2	Entwicklung eines Hubkraftkalkulators	90
4.2.1	Grundlagen und Funktionsweise des Kalkulators	90
4.2.2	Auswirkungen auf die kalkulierte Hubkraft bei fehlerhaften Eingaben ..	92
5	Fazit und Prüfung der Hypothesen	94
6	Diskussion.....	97
6.1	Beurteilung der Versuchsdurchführung	97
6.2	Messfehler und deren mögliche Auswirkungen	99
6.3	Risikobewertung	100
7	Schlussfolgerung und Ausblick	101
	Quellenverzeichnis	102
	Printmedien	102
	Weblinks.....	103
	mündliche Mitteilung.....	107
	Eidesstattliche Erklärung	108
	Anhang	109
	Anhang I: Umfragebogen	109
	Anhang II: Datenlieferung FAWF.....	111
	Anhang III: Basisdaten der Aufnahmen der Ganzbaumversuchsreihe	112
	Anhang IV: Basisdaten der Aufnahmen der Hochstumpf-Versuchsreihe	113
	Anhang V: Basisdaten der Aufnahmen der Baumsimulation	114
	Anhang VI: Protokoll der Baumstumpf-Vermessung der Vollbäume	115

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unfallschwerpunkte beim motormanuellen Holzeinschlag	2
Abbildung 2: Absterberate der Buchen in Deutschland	3
Abbildung 3: Wahrscheinlichkeit eines Asttreffers in Abhängigkeit von der Entfernung zum Stock.....	4
Abbildung 4: Meldepflichtige Arbeitsunfälle im Forst	4
Abbildung 5: Unfallrisiko bei der Schadholzaufarbeitung in Abhängigkeit des Arbeitsverfahrens	5
Abbildung 6: Dreieck der Statik am Baum	8
Abbildung 7: Vertikale Baumlasten.....	9
Abbildung 8: Biegemomente bei schrägstehenden Bäumen	9
Abbildung 9: Darstellung der Biegespannung in der Bruchleiste	9
Abbildung 10: Bruchleiste	10
Abbildung 11: Nahaufnahme der Bruchleiste	10
Abbildung 12: Kippunkt eines Körpers.....	10
Abbildung 13: Hilfsmittel zur Hangbestimmung	12
Abbildung 14: Pendelmethode.....	12
Abbildung 15: Zeitleiste der technischen Fällhilfen.....	14
Abbildung 16: Prozentuale Einteilung der Verkaufszahlen technischer Fällhilfen.....	15
Abbildung 17: Keilwirkung	16
Abbildung 18: Schraubenkraft am Gewinde	16
Abbildung 19: Einfluss der Gewindeschmierung auf die Reibung	17
Abbildung 20: Funktionsweise der hydraulischen Presse.....	17
Abbildung 21: Bezeichnung der Bauteile technischer Fällkeile.....	19
Abbildung 22: Leistungsvergleich mechanischer und hydraulischer Funkfernkeile ..	21
Abbildung 23: Hubkraftvergleich in Abhängigkeit der Schmierung	22
Abbildung 24: Sicherheitsfälltechnik	24
Abbildung 25: Stockmaße bei der Baumfällung.....	24
Abbildung 26: Hubzylinder.....	25
Abbildung 27: Fällkeil „TR300“	25
Abbildung 28: Schwingungen im Baum in Abhängigkeit eingesetzter Fällhilfen.....	26
Abbildung 29: Calmbacher Hilfstabelle	28
Abbildung 30: Relevante Faktoren zur Erstellung einer Hilfstabelle für Fällhilfen.....	29
Abbildung 31: Geometrische Formen der Stammabschnitte	34

Abbildung 32: Darstellung der Inhomogenität einer Buche.....	34
Abbildung 33: Freischnitt der Kräfte und Spannungen während der Baumfällung mit einer Fällhilfe	38
Abbildung 34: Bestand der Versuchsreihe an Hochstümpfen.....	39
Abbildung 35: Baumansicht „Buchen-Hochstumpf“	39
Abbildung 36: Luftaufnahme des Bestandes der Ganzbaum-Versuchsreihe.....	40
Abbildung 37: Krone eines Baumes der Ganzbaum-Versuchsreihe.....	41
Abbildung 38: Trockenschäden am Stammverlauf der Ganzbaum-Versuchsreihe...	41
Abbildung 39: Bautachymeter zur Ermittlung der Baumgeometrie	42
Abbildung 40: Skizze der Lasermesspunkte entlang der Stammwalze	42
Abbildung 41: Fluchtstab mit Libelle	43
Abbildung 42: Ganzbaum-Fotodokumentation	43
Abbildung 43: Ganzbaum-Darstellung	43
Abbildung 44: Skizze der Korrektur der Lasermessdaten hinsichtlich des Stammdurchmessers.....	44
Abbildung 45: Darstellung der Hangrichtung des Stammverlaufs eines vermessenen Stammes	45
Abbildung 46: Verlängerung der Fluchtstabachse	46
Abbildung 47: Bildbearbeitungsprogramm zur Kronenvermessung.....	46
Abbildung 48: Skizze der Koordinatensysteme zweidimensional	47
Abbildung 49: Skizze der Koordinatensysteme dreidimensional	47
Abbildung 50: Modell eines vermessenen Baumes	47
Abbildung 51: Gesamtdarstellung der Stammabschnitte.....	48
Abbildung 52: Einzelansichtsskizze eines Kegelstumpfs.....	48
Abbildung 53: Skizze der Wertkorrektur im Stammverlauf.....	49
Abbildung 54: Grafische Darstellung des mathematischen Vorgehens der Wertkorrektur im Stammverlauf.....	49
Abbildung 55: Skizze des resultierenden Schwerpunktes im Stamm	51
Abbildung 56: Skizze des resultierenden Gesamtschwerpunktes im Baum	51
Abbildung 57: Skizze des Baumrückhangs.....	52
Abbildung 58: Skizze des Baumrückhangs (Draufsicht).....	52
Abbildung 59: Skizze zur Hubkraftermittlung	53
Abbildung 60: Skizze zur Hubkraftermittlung (Draufsicht).....	53
Abbildung 61: Hydraulikzylinder für die Hubkraftherzeugung	54

Abbildung 62: Handpumpe zum Ansteuern des Zylinders	54
Abbildung 63: Verwendete Messmittel zur Bestimmung der Hubkraft bei der Fällung von Bäumen	54
Abbildung 64: Verhältnis von der gemessenen Hubkraft zum Systemdruck.....	55
Abbildung 65: Skizze des Kraftangriffspunktes des Hubzylinders	55
Abbildung 66: Vorbereitete Kraftmessdose und Hubzylinder.....	55
Abbildung 67: Abbild eines Stocks mit Hubzylinder nach dem Fällen	56
Abbildung 68: Zeichnung eines Stockbildes inkl. Hubzylinder	57
Abbildung 69: Versuchsaufbau zur Schwerpunktverlagerung	58
Abbildung 70: Berechnete Kraft in Abhängigkeit vom Rückhang.....	59
Abbildung 71: Berechnete Kraft in Abhängigkeit von der Hebellänge	59
Abbildung 72: Kraftverlauf während der Schwerpunktverlagerung	60
Abbildung 73: Gemessene Kraft in Abhängigkeit von der Hebellänge	61
Abbildung 74: Gemessene Kraft in Abhängigkeit vom Rückhang.....	61
Abbildung 75: Verhältnis von gemessener zu berechneter Kraft hinsichtlich der Schwerpunktverlagerung	62
Abbildung 76: Verhältnis von gemessener zu berechneter Kraft unter Einfluss der Hebellänge	63
Abbildung 77: Verhältnis von gemessener zu berechneter Kraft unter Einfluss des Rückhangs.....	63
Abbildung 78: Freischnitt der Kräfte und Spannungen in der Bruchleiste.....	65
Abbildung 79: Darstellung der Beanspruchung der Bruchleiste.....	66
Abbildung 80: Simulation Biegespannung	66
Abbildung 81: Entstehende Spannungen in der Bruchleiste.....	66
Abbildung 82: Skizze der geometrischen Verhältnisse zur Herleitung der Biegespannung in der Bruchleiste	67
Abbildung 83: Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste in Abhängigkeit von der Strecke zwischen Drehpunkt und Kraftangriffspunkt	69
Abbildung 84: Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste in Abhängigkeit von der Bruchleistenbreite	70
Abbildung 85: Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste in Abhängigkeit von der Bruchleistenlänge	70
Abbildung 86: Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste in Abhängigkeit von der Biegespannung.....	71

Abbildung 87: Darstellung eines Hochstumpfes	71
Abbildung 88: Hubkraftermittlung an einem Hochstumpf.....	71
Abbildung 89: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Hubkraft der Hochstümpfe	72
Abbildung 90: Freischnitt der Kräfte und Spannungen am Ganzbaum.....	74
Abbildung 91: Hubkraft des Gesamtbaumes in Abhängigkeit von der Bruchleistenbreite	75
Abbildung 92: Hubkraft des Gesamtbaumes in Abhängigkeit von der Bruchleistenlänge	76
Abbildung 93: Hubkraft des Ganzbaumes in Abhängigkeit von der Kraftstrecke.....	76
Abbildung 94: Hubkraft des Ganzbaumes in Abhängigkeit von dem Baumgewicht..	77
Abbildung 95: Hubkraft des Ganzbaumes in Abhängigkeit von dem Rückhang und der Drehpunktverlagerung	77
Abbildung 96: Brusthöhendurchmesser in Abhängigkeit von der Baumhöhe	78
Abbildung 97: Hubkraftverlaufskurve der Ganzbaummessung.....	79
Abbildung 98: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Hubkraft.....	80
Abbildung 99: Hubkraft in Abhängigkeit von der Bruchleiste	81
Abbildung 100: Hubkraft in Abhängigkeit vom Rückhang im Schwerpunkt	81
Abbildung 101: Hubkraft in Abhängigkeit vom BHD	82
Abbildung 102: Hubkraft in Abhängigkeit vom Baumgewicht.....	83
Abbildung 103: Skizze für die Hubkraftkalkulation	87
Abbildung 104: Skizze der benötigten Basisdaten.....	87
Abbildung 105: Vergleich der gemessenen, berechneten und kalkulierten Hubkraft der Buchen	89
Abbildung 106: Kalkulator Screenshot.....	91
Abbildung 107: Hubkraft-Hilfstabelle für technische Fällhilfen	92
Abbildung 108: Folgenabschätzung bei Fehleingaben	93
Abbildung 109: Mögliche Kronenform für eine Berechnung.....	101
Abbildung 110: Ausbauchungsreihe für Buche.....	101
Abbildung 111: Umfragebogen Teil 1	109
Abbildung 112: Umfragebogen Teil 2	110
Abbildung 113: Protokoll der Baumstumpf-Messung.....	115

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

AP	<i>Kraftangriffspunkt am Fällschnitt</i>
B.K.	<i>berechnete Kraft</i>
BHD	<i>Brusthöhendurchmesser</i>
DP	<i>Drehpunkt</i>
FAWF	<i>Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft</i>
F_{GB}	<i>Gewichtskraft des Baumes</i>
F_{Hub_BL}	<i>Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste</i>
F_{HubG}	<i>benötigte Hubkraft für den Ganzbaum</i>
F_m	<i>Festmeter</i>
FPA	<i>Forsttechnischer Prüfausschuss</i>
g	<i>Gravitationskraft [m/s²]</i>
G.K.	<i>gemessene Kraft</i>
kN	<i>Kilonewton</i>
KP	<i>Kippunkt</i>
KWF e.V.	<i>Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (e.V.)</i>
LMP	<i>Lasermesspunkt</i>
M	<i>Drehmoment [Nm]</i>
M_b	<i>Biegemoment</i>
r^2	<i>Bestimmtheitsmaß</i>
RMP	<i>Randmesspunkt</i>
SP	<i>Schwerpunkt</i>
SP_G	<i>Gesamtschwerpunkt Baum</i>
SP_{GS}	<i>Schwerpunkt Stamm</i>
W_b	<i>Biege widerstandsmoment</i>
X_n	<i>Mittelpunkt des Stammes auf der X-Achse</i>
y_{DV}	<i>Strecke zur Verschiebung des Drehpunktes [m]</i>
y_{Hub}	<i>Kraftstrecke zwischen Kraftangriffspunkt und Drehpunkt [m]</i>
y_{RH}	<i>Rückhang im Schwerpunkt [m]</i>
σ_B	<i>Biegespannung [N/mm²]</i>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Methoden zur Hangbestimmung eines Baumes	12
Tabelle 2: Gegenüberstellung mechanischer und hydraulischer Systeme	18
Tabelle 3: Unterschiede praxiserprobter Fällhilfen	20
Tabelle 4: Ermittlung des Wassergehaltes der Versuchsbäume	32
Tabelle 5: Verwendete Mess- und Hilfsmittel.....	36
Tabelle 6: Beschreibung der Strecken aus Abbildung 68	57
Tabelle 7: Faktoren aus der Baumsimulations-Versuchsreihe.....	64
Tabelle 8: Hubkraft-Faktoren der Hochstumpf-Versuchsreihe.....	73
Tabelle 9: Einflussfaktoren pro kN Hubkraft	84
Tabelle 10: Hubkraft-Messwerte aus der Ganzbaum-Versuchsreihe	85
Tabelle 11: Vergleich der Hubkraftmodelle.....	88
Tabelle 12: Datenlieferung FAWF	111
Tabelle 13: Basisdaten der Ganzbaum-Versuchsreihe	112
Tabelle 14: Basisdaten der Hochstumpf-Versuchsreihe.....	113
Tabelle 15: Basisdaten der Baumsimulation.....	114

Formelverzeichnis

Gleichung 1: Definition Arbeit	15
Gleichung 2: Herleitung des Wassergehaltes.....	31
Gleichung 3: Korrektur der Lasermessdaten	44
Gleichung 4: Berechnung des Kegelstumpf-Volumens	48
Gleichung 5: Herleitung des Kegelstumpf-Schwerpunktes.....	50
Gleichung 6: Herleitung des Kugel-Schwerpunktes.....	50
Gleichung 7: Herleitung des Gesamtschwerpunktes	51
Gleichung 8: Herleitung des Baumeigengewichtes	52
Gleichung 9: Herleitung des Drehmoments am Drehpunkt des Baumes.....	52
Gleichung 10: Herleitung der Hubkraft zur Verlagerung des Schwerpunktes.....	53
Gleichung 11: Berechnung der benötigten Hubkraft zur Verlagerung des Schwerpunktes	58
Gleichung 12: Herleitung der Hubkraft für die Biegespannung in der Bruchleiste	68
Gleichung 13: Grundgleichung des Bruchleistenhubkraft-Vergleichs	69
Gleichung 14: Berechnung der gesamten benötigten Hubkraft zur Fällung eines Ganzbaumes	74

Abstract

Forest work can be made safer and more profitable by using technical felling aids. The purchase decision is made by the user based on various criteria. These are, from an economic point of view, the purchase price, availability or proximity to a specialty store. Technical decision criteria can be the operating principle (hydraulic or mechanical), the operation, the lifting height and lifting power of the felling aid or the construction (integrated or differentiated). Likewise, a KWF test seal can be an aid to decision-making when making a purchase. The operating instructions of the felling aids only define the maximum lifting forces, but the practical user does not know when technical limits are reached. Accordingly, there is no assignment of the lifting forces to tree dimensions and back slope levels.

The present work determines these lifting forces during tree felling, based on theoretical calculations and real measurements. A determination of basic geometric data based on a laser measurement allows to simulate the real tree. The calculation is based on physical laws, a comparison with the reality by practical measurements enables their evaluation. The data basis for the calculations comes from back slope measurements of the test trees. The aim of the work is to create a calculator which determines the required lifting forces of individual trees. This calculator should enable the practical user to select a suitable and sufficiently dimensioned technical felling aid for a felling measure. A further goal of this work is to determine the influencing variables which affect the lifting force during felling. The biggest influence is the backhang, i.e. the position of the center of gravity in relation to the breaking line, followed by the tree volume, tree weight and the geometry of the breaking line. The theoretical calculation by means of a calculator allows an individual evaluation of the lifting force required for a particular tree. The difference between the measured and calculated values results in a factor that allows the calculator to be used in a way that approximates reality.

An auxiliary table, which corresponds to the output values of the calculation calculator, can help to plan the use of the felling aid in a more targeted way and to select the adequate dimensioned working equipment for the felling.

Zusammenfassung

Die Waldarbeit kann durch die Verwendung technischer Fällhilfen sicherer und ergonomischer gestaltet werden. Die Kaufentscheidung wird durch den Anwender auf Grundlage verschiedener Kriterien getroffen. Diese sind wirtschaftlich gesehen der Kaufpreis, die Verfügbarkeit oder die Nähe zu einem Fachgeschäft. Technische Entscheidungskriterien können das Wirkprinzip (hydraulisch oder mechanisch), die Bedienung, die Hubhöhe und Hubkraft der Fällhilfe oder die Bauweise (integriert oder differenziert) sein. Ebenfalls kann eine Anerkennung durch den forsttechnischen Prüfausschuss (FPA) eine Entscheidungshilfe für einen Kauf darstellen. Die Bedienungsanleitungen der Fällhilfen definieren nur die maximalen Hubkräfte, jedoch ist dem Praxisanwender unbekannt, wann technische Grenzen erreicht werden. Demnach fehlt eine Zuordnung der Hubkräfte zu Baumdimensionen und Rückhangstufen.

Die vorliegende Arbeit ermittelt diese Hubkräfte während der Baumfällung, auf Grundlage theoretischer Berechnungen und realer Messungen. Eine Bestimmung von geometrischen Basisdaten auf Grundlage einer Lasermessung ermöglicht es, den realen Baum zu simulieren. Die Berechnung erfolgt über physikalische Gesetzmäßigkeiten, ein Abgleich mit der Realität durch praktische Messungen gestaltet deren Auswertung. Die Datengrundlage für die Berechnungen stammt aus Rückhangmessungen der Versuchsbäume. Ziel der Arbeit ist die Erstellung einer Tabelle und eines Kalkulators, um die benötigten Hubkräfte individueller Bäume in guter Näherung zu ermitteln. Diese Kalkulation soll es dem Praxisanwender ermöglichen, eine geeignete und ausreichend dimensionierte technische Fällhilfe für eine Holzeinschlagsmaßnahme zu wählen. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, die Einflussgrößen, welche sich während der Fällung auf die Hubkraft auswirken, zu bestimmen. Den größten Einfluss hat dabei der Rückhang, sprich die Position des Schwerpunktes in Abhängigkeit der Bruchleiste, gefolgt vom Baumvolumen, Baumgewicht und der Geometrie der Bruchleiste. Die theoretische Berechnung mittels Kalkulationsrechner ermöglicht eine individuelle Bewertung der für einen bestimmten Baum benötigten Hubkraft.

Eine Hilfstabelle, welche den Ausgabewerten des Kalkulationsrechners entspricht, kann dazu beitragen, den Einsatz der Fällhilfe gezielter zu planen und ein ausreichend dimensioniertes Arbeitsgerät für die Fällung zu wählen.

1 Einleitung

1.1 *Technik, Sicherheit und Unfallprävention bei der Waldarbeit*

Die Anwendung einfacher Hilfsmittel zur zielgerichteten Fällung von Bäumen reicht bis zu den Anfängen des Holzeinschlags zurück. Die ersten motorbetriebenen Sägen wurden zwischen den Jahren 1905 und 1925 entwickelt (Haim, 2002). Forsttechnische Neuerungen und Erfindungen im Bereich der Mechanik (seit 1923) und der Hydraulik (seit 1955) gestalten die körperliche Arbeit im Wald sicherer und ergonomischer.¹ Der Arbeitsschutz im motormanuellen Holzeinschlag wurde durch die Einführung des Antivibrationssystems der Kettensägen im Jahr 1964 (Andreas Stihl AG & Co.KG, 2020) und durch die Entwicklung der Schnittschutzhosen im Jahr 1982 wesentlich verbessert (Hartfiel, 2003). Die Sturmereignisse „Vivian und Wibke“ im Jahr 1990 sorgten darauffolgend für den Durchbruch des Einsatzes der Holzerntemaschinen aufgrund der hohen Holzmengen in Deutschland. Die Harvester ermöglichten eine effektive und sichere Aufarbeitung des Schadholzes (Hamberger, 2003). Die Weiterentwicklungen der Fällhilfen für den motormanuellen Holzeinschlag ziehen sich durch die Geschehnisse der vergangenen Jahrzehnte hindurch. Hydraulische und mechanische Fällkeile sowie Hubzylinder revolutionierten den motormanuellen Holzeinschlag in den Bereichen Ergonomie und Arbeitssicherheit (Hammer, 2018).

Die Gründe für die Notwendigkeit des motormanuellen Holzeinschlags liegen in der Befahrbarkeit und Topografie der Waldflächen. Ökologie und Ökonomie sind entscheidende Faktoren für die Wahl des Arbeitsverfahrens (Erler, 2000).

Das Berufsbild des Forstwirts ist durch körperliche Arbeit und von vergleichsweise hohen Unfallzahlen geprägt. Entscheidende Faktoren für die Anzahl der Unfälle sind nach Aussage von Wolff (2004) Gefahren, welche durch den Arbeitsort oder die Geräte entstehen können. Der ständig wechselnde und schwer zugängliche Einsatzort, die direkten Witterungseinflüsse und die Gefahren durch herabfallende Äste sorgen für eine hohe Belastung der Forstwirte. Die Unfallschwerpunkte lassen sich durch Abbildung 1 beschreiben.

¹ siehe Kapitel „Definition und Historie von Fällhilfen“

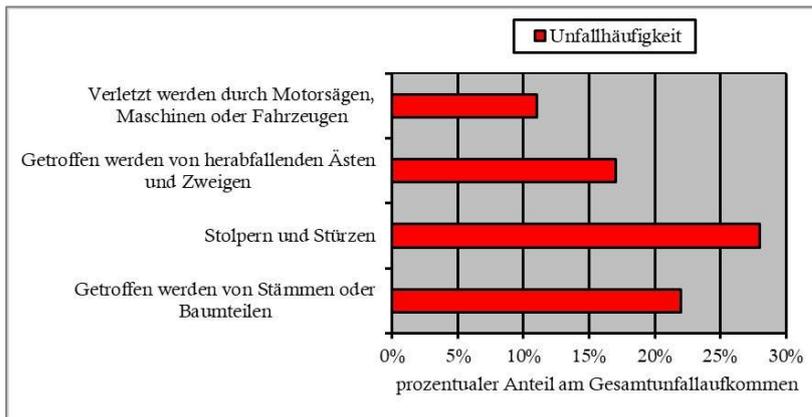


Abbildung 1: Unfallschwerpunkte beim motormanuellen Holzeinschlag (Wolff, 2004, S. 9)

Im Zuge der Baumfällung befindet sich der Forstwirt in der Kronenprojektionsfläche, welche den potenziellen Gefahrenbereich darstellt. Die Gefahr ist auch abhängig von der Baumart und ihrer Art mit den toten Ästen umzugehen. Trockene Äste und absterbende Kronenteile sind Gefahrenquellen bei der Baumfällung und erschweren die Gefahrenerkennung – besonders im belaubten Baumzustand. Während die Fichten aufgrund ihrer Stamm- und Kronenform abgestorbenes Holz lange erhalten können, ist die Gefahr, welche von Buchen ausgeht, höher (V. Gerding, Persönliche Mitteilung, 25. August 2020).

Die Folgen eines Trockenjahres, welche durch die Absterberate verdeutlicht werden, sind weitreichend und erst Jahre nach dem Ereignis erkennbar. Die Absterberate zeigt die Differenz der abgestorbenen Bäume zwischen der letzten und der aktuellen Waldzustandserhebung. In Abbildung 2 wird deutlich, dass sich die Verlaufskurve der „Buchen-Absterberate“ im Jahr 2019, im Vergleich zu den vorherigen Jahren, außerhalb der natürlichen Schwankungen befindet (BMEL, 2019).

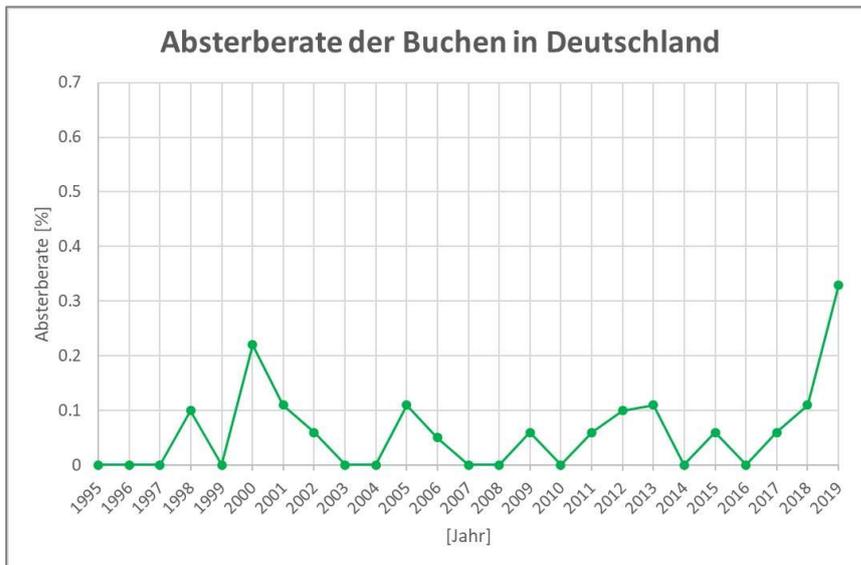


Abbildung 2: Absterberate der Buchen in Deutschland (BMEL, 2019, S. 32)

Anzeichen, wie z.B. Spritzkern an frisch gefällten Buchen, deuten auf eine Buchen-vitalitätsschwäche hin. Daraufhin führen Sekundärschäden zum Absterben älterer Buchenbestände. Aufgrund der Erkenntnisse aus dem Trockenjahr 2003 werden Rückschlüsse zur aktuellen Waldsituation gezogen (NW-FVA, 2019). Die Waldzu-standsberichte einiger Bundesländer zeigen, dass die Buche mit ihrem Verbrei-tungsgebiet rückläufig ist. Besonders im Jahr 2019 hat sich der Kronenzustand der Baumarten im Vergleich zum Jahr 2018 verschlechtert (BMEL, 2019).

Die Untersuchung von Gerding und Reiter (2010) zur Wahrscheinlichkeit eines Ast-treffers verdeutlicht in Abbildung 3, dass eine gut geplante Rückweiche in Kombi-nation mit der zurückgelegten Strecke Unfälle mit herabfallenden Ästen vermeiden kann. Im Umkreis von bis zu 3 m um den Stammmittelpunkt liegt die Wahrschein-lichkeit, von einem herabfallenden Ast getroffen zu werden bei 70 %. Diese redu-ziert sich im Radius von 3 m bis 6 m auf 24 %. Im Bereich von 6 m bis 9 m sind es nur noch 5 %. Eine bevorzugte Richtung des Verlaufs der Rückweiche ist aus der Untersuchung nicht erkennbar. Wichtig ist eine ausreichende Entfernung zum Stammmittelpunkt.

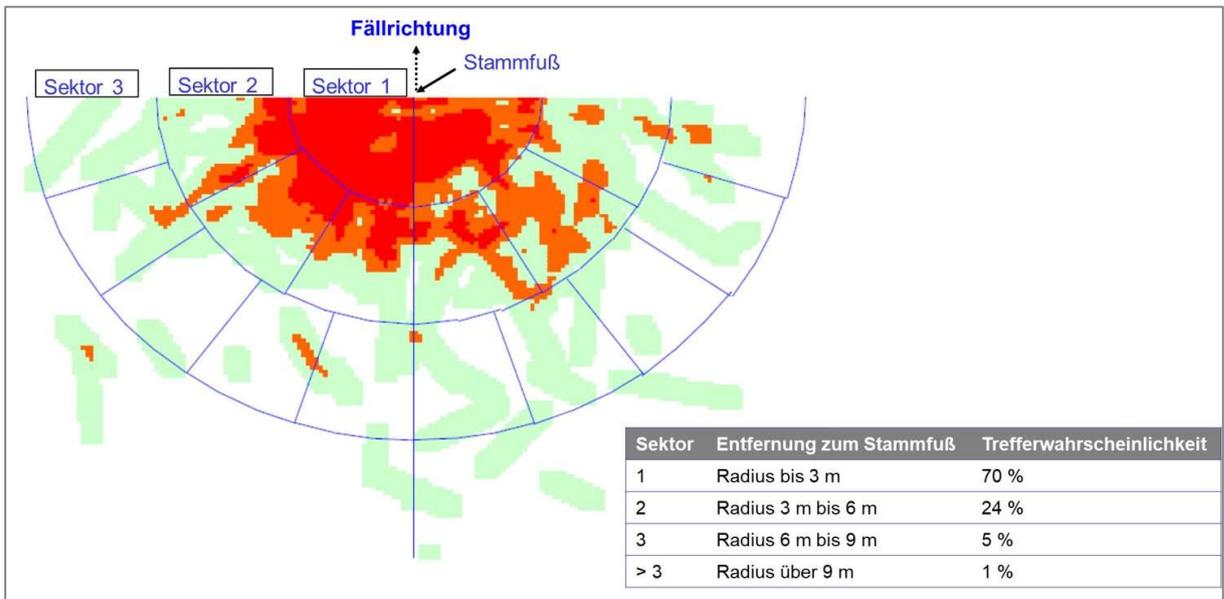


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeit eines Asttreffers in Abhängigkeit von der Entfernung zum Stock (Gerding & Reiter, 2010)

Deutschlandweit zeigen die Zahlen der Unfallstatistik des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF e.V.), in Abbildung 4 einen Rückgang der meldepflichtigen Arbeitsunfälle im Staatswald. Dieser lässt sich durch den steigenden Grad der Technisierung und Innovation der Forstbranche sowie durch die Schulungen der Waldarbeiter erklären. Eine genaue Aufteilung der Unfallursachen ist in der Dissertation von Michels (2017) aufgeführt.

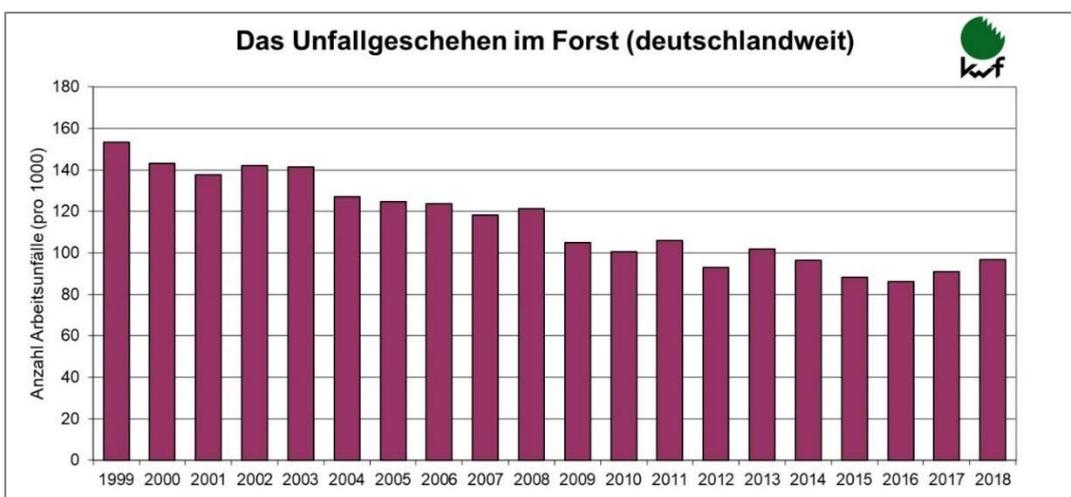


Abbildung 4: Meldepflichtige Arbeitsunfälle im Forst (KWF e.V., 2019)

Die Durchführung des Holzeinschlags mit technischen Fällhilfen reduziert die Gefahr von herabfallendem Totholz aufgrund der Reduktion eingeleiteter Vibrationen

in den Kronenbereich. Weiterhin wird der Kraftaufwand während der Keilarbeit verringert (Dietz et al., 2019).

Nach Aussage von Klugmann (2020), wie in Abbildung 5 verdeutlicht, dient der Einsatz technischer Hilfsmittel in der Waldarbeit der Prävention von Arbeitsunfällen. Ein hoher Mechanisierungsgrad in der Holzernte senkt die Gefahren für die Forstwirte. Alternativ sind Verfahren mit technischen Fällhilfen oder die seilunterstützte Fällung der klassischen Keilarbeit vorzuziehen.



Abbildung 5: Unfallrisiko bei der Schadholzaufarbeitung in Abhängigkeit des Arbeitsverfahrens (Klugmann, 2020)

1.2 Überblick zu vorausgehenden Untersuchungen

In einem Workshop zum Thema „Fällhilfen“, welcher als Thematik den Einsatzbereich von funkfernbedienbaren Fällhilfen bei der Baumfällung behandelte, stellte das KWF Erkenntnisse aus ersten praktischen Hubkraftmessungen vor (Ruppert & Lippert, 2019b).

Es wurden folgende Aussagen in diesem Workshop getroffen:

- Erhöhung der Hubkraft und Verlängerung der Nutzungsdauer von Fällhilfen durch Schmiermittel.
- Schnellere Steigerung der Hubkraft bei mechanischen Systemen gegenüber hydraulischen Systemen möglich.

- Höhere Auslegung der Hubkräfte bei hydraulischen Systemen möglich.
- Besseres Hebelverhältnis bei mechanischen Fällkeilen als der Stempelheber.

Aufgrund der geringen Anzahl an vorgestellten Messobjekten zu dem Thema benötigter Hubkraftbedarf bei der Fällung, hat sich die Möglichkeit einer näheren Betrachtung im Rahmen dieser Bachelorarbeit ergeben. Der damals genutzte Versuchsaufbau für die Hubkraftmessung wird übernommen und um eine genauere Rückhangmessung erweitert.

Eine Bachelorarbeit von Schubert (2018) brachte die Erkenntnis, dass sich der Einsatz mechanischer Fällkeile im Vergleich zum klassischen händischen Keilen für den Anwender arbeitserleichternd auswirkt.

Schnaitter (2019) wies nach, dass die Nutzung technischer Fällkeile die Ergonomie des Anwenders und den Zeitbedarf während der Fällung, positiv beeinflusst.

Fischer (2017) beschrieb einen linearen Zusammenhang zwischen der Bruchleiststärke und dem benötigten Kraftaufwand bei der Fällung mit Fällhilfen. Die Bruchstufenhöhe hat nach den Erkenntnissen der Versuchsreihen wenig Einfluss auf die benötigte Hubkraft.

1.3 Problemstellung, Zielsetzung, Hypothesen und Lösungsansatz

Das nachfolgende praktische Fallbeispiel stellt eine Problem-Situation dar:

Praktisches Fallbeispiel
Eine Forstwirtschaftsgruppe muss motormanuell im steilen Gelände einzelne trockene Buchen an einem Wanderweg entnehmen. Der Bestandsabschnitt grenzt an eine gezäunte Kulturlfläche, die Starkholz-Buchen hängen in Richtung Wanderpfad und Zaun. Eine Fällung mit klassischen Keilen ist aufgrund der Gefahr durch das Kronentotholz nicht möglich. Eine mechanische oder seilunterstützte Fällung kann, begründet durch die Topografie und Befahrbarkeit, nicht durchgeführt werden. Aufgrund mangelnder Erfahrung verwenden die Forstwirte den Fällkeil mit dem geringsten Gewicht. Die Fällrichtung wird bestimmt und der Fällschnitt mit fachlicher Sorgfalt geführt. Beim „Umkeilen“ stellt die Gruppe nun fest, dass die Hubhöhe und die Hubkraft des Fällkeils nicht ausreichend sind. Es entsteht eine gefährliche Situation. Eine Hilfstabelle könnte den Hubkraftbedarf darstellen und die Einsatzbereiche unterschiedlicher Fällkeil-Modelle im Vorfeld definieren (Eigene Darstellung).

Die Zielsetzung der Bachelorarbeit besteht darin, eine Tabelle und einen Kalkulator zur Ermittlung der Hubkraft zu erstellen, welche für die Baumfällung unter Verwendung technischer Fällhilfen notwendig ist. Die relevanten Kennzahlen sind der Brusthöhendurchmesser (BHD), der Baumrückhang, die Baumhöhe und der Kronendurchmesser. Die Fragestellung der Arbeit lautet:

„Benötigte Hubkraft bei der Fällung von Buchen mit technischen Fällhilfen?“

Aufgrund von Fachgesprächen wurden Hypothesen für den Einsatz der Fällhilfen erstellt. Diese konnten während der Versuchsreihen verifiziert oder falsifiziert werden.

- Je größer der Rückhang, desto größer ist die benötigte Hubkraft.
- Die Stärke der Bruchleiste beeinflusst den Kraftaufwand bei der Baumfällung.
- Die größte benötigte Hubkraft entsteht kurz bevor der Baum sich bewegt.
- Sobald der Schwerpunkt den Kippunkt erreicht, geht die benötigte Hubkraft gegen Null.
- Aufgrund von Annahmen zur Baumstruktur ist ein Korrekturfaktor gegeben.

Die Hubkraftermittlung erfolgt auf der Grundlage einer umfassenden Berechnung. Die notwendigen Basisdaten entstammen aus einer dreistufigen Versuchsreihe. Hierzu wurden Vollbäume und Hochstümpfe genutzt, um die Messdaten zu erzeugen. Die darauffolgende praktische Messung der Hubkräfte dient ausschließlich der Berechnungs-Überprüfung und hat keinen Einfluss auf die weitere Hubkraftberechnung.

2 Stand des Wissens

2.1 Statik und Festigkeit von Bäumen

Die Baumstatik lässt sich durch ein „Dreieck der Statik“ wie in Abbildung 6 darstellen. Veränderungen der Form oder des Materials führen dazu, dass die Traglast nicht mehr aufgenommen werden kann und die Statik des Baumes nachgibt. Durch Holzersetzung kann es zu Materialveränderungen kommen. Die vertikale Last resultiert maßgeblich aus dem Eigengewicht des Baumes und wird durch den Stamm in den Wurzelraum übertragen. Die Eigengewichtskraft entsteht durch die Faktoren Volumen, Dichte und Erdanziehungskraft. Beeinflussende Kriterien sind der Wassergehalt, die Richtung in welche der Baum hängt, vorhandener Fruchtbehang, Jahreszeit und Witterung (Schnee, Regen) (Wessolly & Erb, 2014, S. 94 ff.).

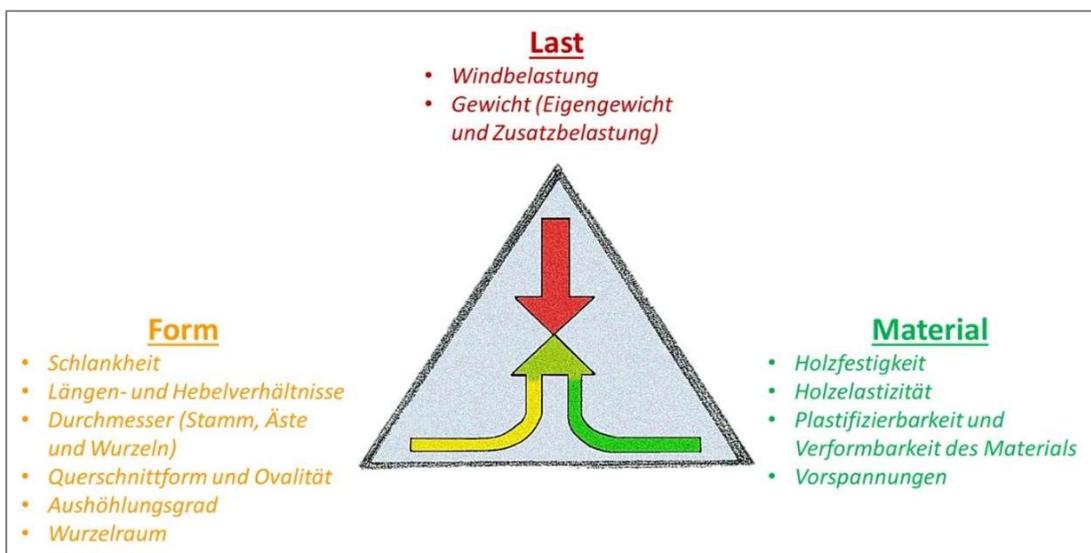


Abbildung 6: Dreieck der Statik am Baum (Wessolly & Erb, 2014, S. 94)

Bei einem geradestehenden Baum wird die Gewichtskraft gleichmäßig auf den Stamm verteilt (Abbildung 7). Bei Schräglage des Baumes wirkt die Gewichtskraft nicht senkrecht in den Stammfuß. Die horizontale Last wirkt unter anderem durch Windkraft auf den Baum ein. Währenddessen entwickeln sich im Stammquerschnitt eine Druck- und eine Zugseite (Abbildung 8). Auf der Last auftretenden Seite entsteht eine Zugspannung, dabei kommt es zu einer Dehnung des Materials. Auf der entgegengesetzten Seite wirkt durch eine Druckspannung eine Materialstauchung. Zug- und Druckbeanspruchungen sind in einem stehenden Baum ausgeglichen (Wessolly & Erb, 2014, S. 95 ff.).

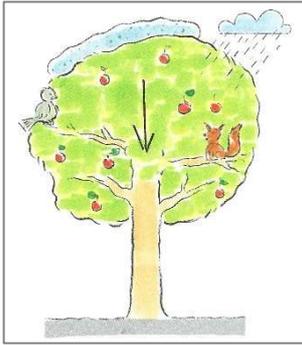


Abbildung 7: Vertikale Baumlasten (Wessolly & Erb, 2014, S. 95)

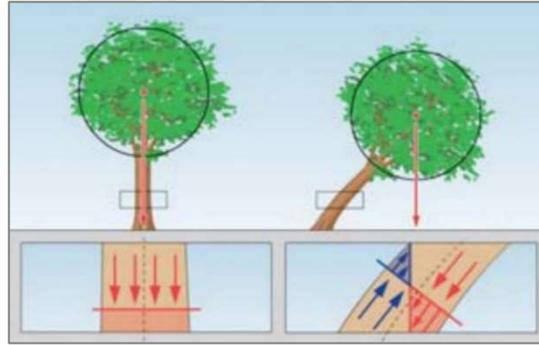


Abbildung 8: Biegemomente bei schrägstehenden Bäumen (deritec GmbH)

Die Druckfestigkeit von Holz in Längsrichtung beträgt je nach Baumart zwischen $1,5 \text{ kN/cm}^2$ und $2,8 \text{ kN/cm}^2$. Die Zugfestigkeit ist doppelt so hoch. Wenn ein Baum auf der Druckseite bricht, entstehen höhere Belastungen auf der Zugseite. Die Folge ist ein Umknicken des Baumes. Ein Baum im trockenen Zustand besitzt jeweils doppelt so hohe Festigkeit bei Zug- und Druckbelastungen im Vergleich zu grünem Holz. Die Elastizität, welche die Nachgiebigkeit bestimmt, ist dort bei trockenem Holz allerdings geringer. Daraus lässt sich schließen, dass ein trockener Baum zwar eine höhere Festigkeit besitzt, jedoch bei seitlichen Krafteinwirkungen (z.B. bei Windbelastung) leichter nachgibt (Wessolly & Erb, 2014, S. 115 - 123). Wie in der Abbildung 9 veranschaulicht, entsteht während der Fällung in der Bruchleiste eine Biegespannung. Die Druckspannung und die Zugspannung sind hierbei unterschiedlich stark ausgeprägt. Hierbei wurde die Zug- und Druckseite eines Stammes auf die Bruchleiste übertragen und angewandt.

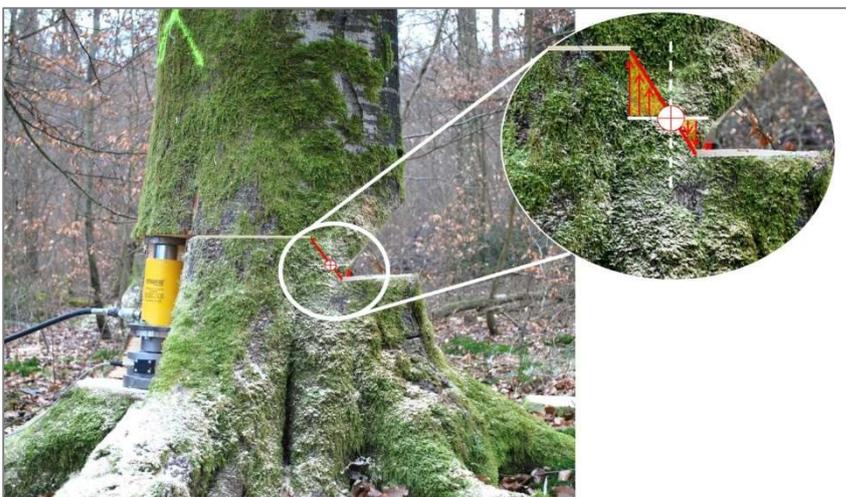


Abbildung 9: Darstellung der Biegespannung in der Bruchleiste (Eigene Darstellung)

² 1 kN ist die Kraft, die benötigt wird, um der Beschleunigung einer Masse von 98,1 kg (gerundet 100 kg) entgegenzuwirken.

Abbildung 10 stellt die Bruchleiste des Baumes dar. Werden Spannungsgrenzen überschritten, kommt es, wie in Abbildung 11 verdeutlicht, zu einem plastischen Versagen der Holzfasern und die Bruchleiste reißt ab. Dies führt zu einem unkontrollierten Fallen des Baumes (Mette et al., 1989, S. 56 ff.).



Abbildung 10: Bruchleiste (Eigene Darstellung)



Abbildung 11: Nahaufnahme der Bruchleiste (Eigene Darstellung)

2.2 Schwerpunkt und Kippunkt von Rotationskörpern

Der Schwerpunkt eines homogenen Rotationskörpers liegt in dem Massenmittelpunkt, dieser ist durch den geometrischen Mittelpunkt definiert (Balke, 2006). In Abbildung 12 wird der Schwerpunkt (SP) und der Kippunkt (KP) eines Körpers dargestellt. Letzteres wird erreicht, sobald der Schwerpunkt außerhalb der Standfläche liegt. Im Unterschied zur Neigung ist der Schwerpunkt neben der Form auch von der Gewichtskraft abhängig. Die Kraft, welche benötigt wird, um den Kippunkt zu erreichen, wirkt gegen die Standkraft und ist abhängig von dem Schwerpunkt. Zur Gewährleistung der Standsicherheit, muss das Standmoment, welches das Gegenstück zum Kippmoment darstellt, höher als dieses sein (Dubbel et al., 2011, S. B11 ff.).

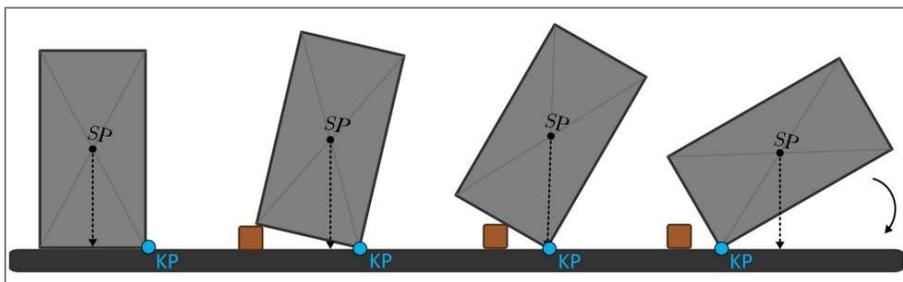


Abbildung 12: Kippunkt eines Körpers (Grotz, 2018)

2.3 Bisherige Praxismethoden zur Bestimmung der Hangrichtung des Baumes

Die Hangrichtung beschreibt die Richtung, in die der Baum ohne menschliches Zutun fallen würde. Sofern der Baum entgegengesetzt der Fällrichtung hängt, wird er als Rückhänger bezeichnet. Weitere Begrifflichkeiten sind „Seithänger“ und „Vorhänger“. In der praktischen Waldarbeit wird die Hangrichtung des Baumes anhand der Kronenspitze abgeschätzt. Die Fällrichtung beschreibt die Richtung, in welche der Baum gefällt werden soll. Die Bestimmung der Hangrichtung des Baumes hilft bei der Ermittlung der günstigsten Fällrichtung. Das Wuchsverhalten umgebender Bäume erschwert diese Bestimmung. Eine mangelhafte Einschätzung der Hangrichtung kann zu einer ungünstigen Bestimmung der Fällrichtung führen (*Beruf Forstwirt*, 2019, S. 478 - 500). Die Schätzung kann auf Grundlage der nachfolgend beschriebenen Verfahren, durch die Verwendung von in Abbildung 13 dargestellten Hilfsmitteln, durchgeführt werden.

Nach Fottner (2020) eignet sich die „Meterstabmethode“ als praxisnahe Methode zur Bestimmung der Hangrichtung des Baumes. Die Durchführung der Hangermittlung bei der „Meterstabmethode“ erfolgt durch ein senkrechtes Halten eines Meterstabs in ausreichender Entfernung zum Baum. Ziel ist die Darstellung der Abweichung zwischen Baum und Meterstab. Durch Unterstützung einer zweiten Person wird eine genauere Darstellung möglich. Vorteile dieser Methode sind die einfache und kurzfristige sowie praxisnahe Ermittlung der Hangrichtung. Für eine umfangreiche Darstellung ist ein Meterstab zur Hangbestimmung jedoch ungeeignet, da sich die fehlende Berücksichtigung des Kronen- und Stammbereichs negativ auf die Genauigkeit dieser Methode auswirkt.

Eine vergleichbare Alternative zur „Meterstabmethode“ stellt die „Pendelmethode“ dar. Hierbei wird, wie in Abbildung 14 gezeigt, anstelle eines Meterstabs ein Senklot verwendet (Benner, 2007).



Abbildung 13: Hilfsmittel zur Hangbestimmung

(Eigene Darstellung)



Abbildung 14: Pendelmethode

(Eigene Darstellung)

Eine weitere praxisnahe und genaue, jedoch auch zeitaufwändige und komplexe Methode zur Darstellung und Bestimmung der Hangrichtung wurde von Schnaitter (2019) angewandt. Bei dieser „Fluchtstabmethode“ wurde vor den Baum ein Stab senkrecht im 90°-Winkel zur Fällrichtung gesteckt. Die Aufzeichnung der Hanglage des Baumes wurde durch ein Foto dokumentiert, dabei diente der Fluchtstab als Referenz. Die Verzerrungen, welche durch die Fotoaufnahme entstanden

(durch das Objektiv und den Aufnahmewinkel), wurden mit einem Korrekturfaktor reduziert. Mit einem Bildbearbeitungsprogramm konnte im Anschluss die Winkelabweichung zwischen Baum und Fluchtstab bestimmt werden (Schnaitter, 2019).

Tabelle 1 stellt nachfolgend die Vor- und Nachteile der genannten Methoden dar.

Tabelle 1: Vergleich der Methoden zur Hangbestimmung eines Baumes (Fottner, 2020; Schnaitter, 2019)

	Vorteile	Nachteile
Meterstabmethode	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Einfach, schnell, praxisnah ⊕ Geringer Aufwand ⊕ Direkte Ermittlung der Hangrichtung ⊕ Flexibles Messinstrument 	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Ungenaue Darstellung ⊖ Fehlender Einfluss der Baumform ⊖ Fehlende Dokumentation ⊖ Rückhang in Baumspitze ⊖ Persönliche Einschätzung
Pendelmethode	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Einfach, schnell, praxisnah ⊕ Geringer Aufwand ⊕ Direkte Ermittlung der Hangrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Ungenaue Darstellung ⊖ Fehlender Einfluss der Baumform ⊖ Rückhang in Baumspitze ⊖ Persönliche Einschätzung
Fluchtstabmethode	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Praxisnahe Ermittlung ⊕ Grafische Ergebnisdarstellung ⊕ Exakte Datenerfassung 	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ Pauschale Eingangsgrößen ⊖ Bildverzerrung ⊖ Zeitaufwand ⊖ Technische Voraussetzungen

2.4 Definition und Historie von Fällhilfen

Eine Fällhilfe bezeichnet ein Hilfsmittel zur gezielten Baumfällung. Diese lassen sich in Fällkeile, Hubzylinder und Seilwinden einteilen. In der Kategorie Fällkeile existieren die mechanischen, hydraulischen und klassischen Fällkeile. Die genannten mechanischen und hydraulischen Fällkeile sowie die hydraulischen Hubzylinder werden unter dem Begriff „technische Fällhilfen“ zusammengefasst. Die Zeitreihe in Abbildung 15 verdeutlicht, dass während der Entwicklung bis zu den heutigen Fällhilfen mehrere Ansätze hydraulischer und mechanischer Fällhilfen auf den Markt gebracht wurden (KWF e.V., 2021).

Die Fällhilfen aus dem Jahr 1923 arbeiteten bereits nach dem mechanischen Prinzip der Kraftübersetzung. Die Funktionsweise der „Baumfällschraube“ ist vergleichbar mit einem mechanischen Wagenheber. Bei dem modernen Universalkeil wird die Keilwirkung durch ein Aufspreizen zweier keilförmiger Platten ausgelöst (Simanov & Bernacký, 2018, S. 30 f.).

Die ersten hydraulischen Hubzylinder für forstliche Anwendungen wurden 1955 bis 1974 in Amerika eingesetzt. Auf Grund von Dichtungsproblemen im Hydrauliksystem wurde die Herstellung gestoppt und die mechanischen Fällhilfen vorrangig weiterentwickelt (Simanov & Bernacký, 2018, S. 222 f.).

Das KWF erhielt im Frühjahr 1999 eine Anmeldung zu einer Gebrauchswertprüfung für eine technische Fällhilfe. Dabei handelte es sich um den hydraulischen Hubzylinder „Mammut C“. Der Anwendungsbereich der Fällhilfe liegt laut Ruppert (2000) bei Bäumen mit einem maximalen Rückhang von bis zu 2 m und einem BHD von mindestens 50 cm. Delbrügge (2014) beschreibt, dass die Dichtungsprobleme des Hydrauliksystems und herausfallende Kolbenstangen einen effektiven Einsatz des „Mammut C“ nicht möglich machten. Diese anfänglichen Probleme sind nach Aussage von Ruppert (2013) im Laufe der Entwicklungszeit behoben worden. Das Unternehmen Grube brachte unter dem Namen „Nordforest“ im Jahr 2002 eine weitere hydraulische Fällhilfe, auf Basis eines Hydraulikhebers, auf den Markt (Nordforest). Im Jahr 2008 entstand der erste hydraulische Fällkeil und 2014 wurde ein neuentwickelter mechanischer Fällkeil vorgestellt. Der erste funkferngesteuerte Hubzylinder wurde 2017 bei dem KWF zur Gebrauchstauglichkeitsprüfung angemeldet. Durch diese Bedienung ist es dem Anwender möglich, den Gefahrenbereich

frühzeitig zu verlassen. Im weiteren Verlauf der technischen Entwicklung kamen die mechanischen Fällkeile mit elektrischem Antrieb auf den Markt (Ruppert & Lippert, 2019b).

Nach Aussage von Mayer (2020) führen die Neuentwicklungen der technischen Fällhilfen unter anderem zu einer leichteren und verbesserten Bauweise und dadurch zu einer steigenden Zahl der Fällkeil-Anwender.

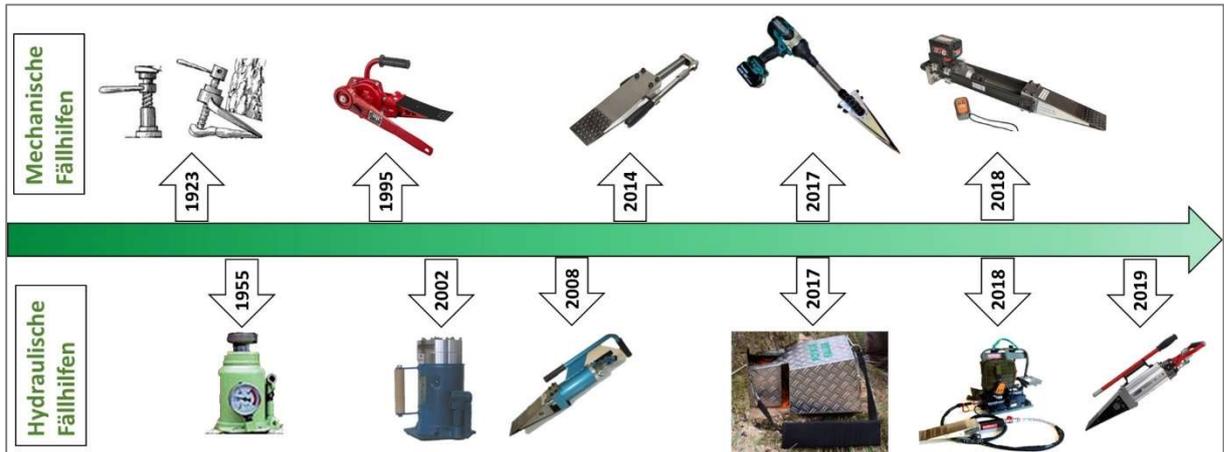


Abbildung 15: Zeitleiste der technischen Fällhilfen (KWF e.V.; Simanov & Bernacký, 2018, S. 30; Simanov & Bernacký, 2018, S. 222)

Der steigende Absatzmarkt von technischen Fällhilfen wird in Abbildung 16 verdeutlicht. „Grube KG“ stellte hierzu die prozentualen Verkaufszahlen der technischen Fällkeile und Hubzylinder zur Verfügung. Die Anfrage richtet sich gezielt an die Grube KG, da dieses Unternehmen, nicht nur europaweit der größte Anbieter von Forstgeräten ist, sondern auch im gewerblichen Bereich eine Spitzenposition eingenommen hat. Diese Aussage lässt sich durch die KWF-anerkannten Geräte und Maschinen belegen. Hierbei wurde deutlich, dass die Firma „Grube KG.“ Zertifikatsinhaber von 103 geprüften Produkten ist, dies entspricht 10 % der gesamten Prüfliste. Daraus wird deutlich, dass dieses Unternehmen eine Spitzenposition im Bereich der Forstgeräte belegt (KWF e.V., 2020). Neben der Vermarktung gestaltet das Unternehmen den Markt durch eigene Entwicklungen mit. Nach Aussage eines Mitarbeiters der Firma „Grube KG“ ist eine Markteinschätzung im Verkauf von Fällhilfen aufgrund der verschiedenen Verkaufsplattformen, der Herstellerzahl und den Selbstbauten, welche im Umlauf sind, schwer möglich. Abbildung 16 zeigt auf, dass sich die prozentualen Verkaufszahlen der hydraulischen Fällkeile und Hubzylinder nach der Markteinführung der mechanischen Fällkeile wesentlich verringerten (Grube KG, Persönliche Mitteilung, 30. Juli 2020).

Nach telefonischer Aussage eines Mitarbeiters der Grube KG verzehnfachte sich die Gesamtanzahl der verkauften technischen Fällhilfen im Zeitraum von 2011 bis 2020. Die Zahl der verkauften hydraulischen Fällkeile und Hubzylinder reduzierten sich um jeweils ca. 50 % (Grube KG, Persönliche Mitteilung, 30. Juli 2020).

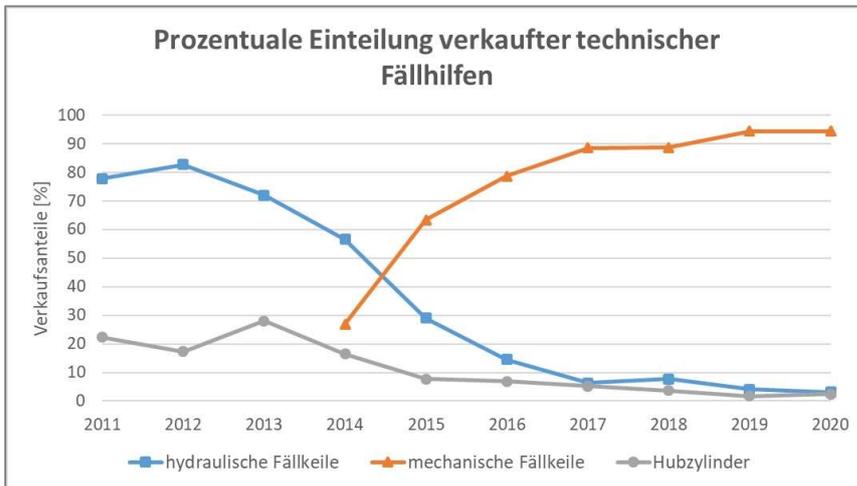


Abbildung 16: Prozentuale Einteilung der Verkaufszahlen technischer Fällhilfen (Grube KG, Persönliche Mitteilung, 30. Juli 2020)

2.5 Aufbau und Anwendung der Fällhilfen

2.5.1 Grundlagen der technischen Funktionsweise

Die Funktionsweise der Fällhilfen lässt sich in mechanische und hydraulische Systeme gliedern. Die Goldene Regel der Mechanik findet bei beiden Systemen Anwendung. Diese besagt in der Gleichung 1 „Was man an Kraft spart, muss man an Weg zusetzen.“ (Dubbel et al., 2011, S. B1 ff.)

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} * \text{Weg} \quad (1)$$

Gleichung 1: Definition Arbeit

- **Mechanik**

Mechanik bezeichnet die „[...] Bewegungsvorgänge in der Natur und der Technik. Sie befasst sich dabei mit der ebenen und räumlichen Bewegung von Körpern und der Einwirkung von Kräften“ (*Technisches Taschenbuch*, S. 130).

Überträgt man die „Goldene Regel der Mechanik“ auf Keile, bedeutet dies: Je kleiner der Keilwinkel, desto höher die entstehende Hubkraft und Keilwangenkraft (U. Fischer et al., 1990, S. 131 f.).

Die Abbildung 17 beschreibt die Keilwirkung. Durch Einwirkung der Kraft kann über den Kraftweg die Last um die Hubhöhe angehoben werden. Ist der Keilwinkel flacher, wird bei gleichem Kraftweg der Hub geringer (Böge & Böge, 2011, S. 99 ff.).

Bei einem Gewinde findet das Prinzip der Keilwirkung ebenfalls Anwendung. Hierbei gilt, je kleiner die Gewindegangsteigung, desto höher die Anzahl der benötigten Umdrehungen. Dabei reduziert sich die benötigte Kraft (Wittel et al., 2011, S. 219 ff.).

Abbildung 18 zeigt die entstehende Schraubenkraft am Gewinde. Dabei wird beschrieben, dass durch die Handkraft F_1 und die Hebellänge (Hebel) sowie die Gewindesteigung P eine höhere Kraft F_2 erzeugt wird. Bei einem mechanischen Fällkeil entspricht die Kraft F (vgl. Abbildung 17) der Schraubenkraft F_2 (vgl. Abbildung 18) (U. Fischer et al., 1990, S. 131 f.).

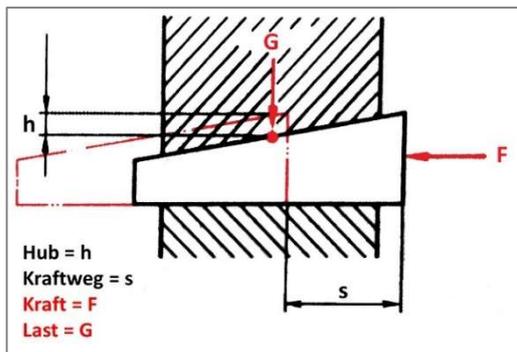


Abbildung 17: Keilwirkung (U. Fischer et al., 1990, S. 131)

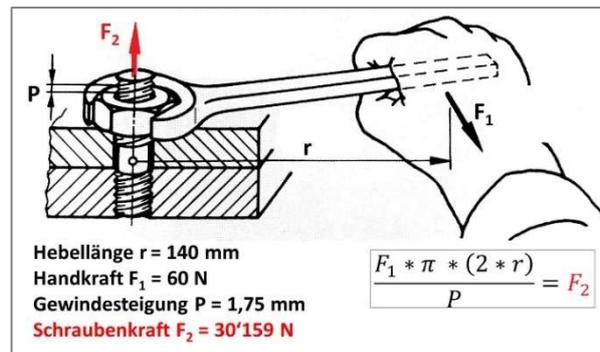


Abbildung 18: Schraubenkraft am Gewinde (U. Fischer et al., 1990, S. 132)

Die Reibung in den Gewindegängen führt zu einem Kraftverlust beim Einschrauben. Eine Schmierung des Gewindes verringert, wie in Abbildung 19 verdeutlicht, die Gleitreibungszahl und verbessert somit die Kraftübertragung (AtlasCopco, 2006, S. 7 f.).

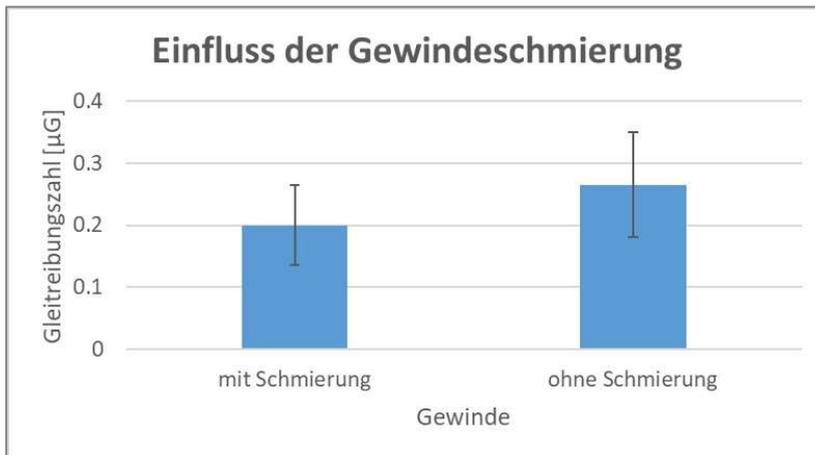


Abbildung 19: Einfluss der Gewindeschmierung auf die Reibung (AtlasCopco, 2006, S. 7)

- **Hydraulik**

Hydraulik bezeichnet die nahezu verlustfreie Übertragung von Kräften, Energien und Signalen mittels Flüssigkeiten, da diese inkompressibel sind (*Technisches Taschenbuch*, S. 180 f.). Der Hydraulikdruck, welcher auch als Systemdruck bezeichnet wird, wird von einer Pumpe erzeugt. Der Hub definiert den Weg des Zylinders zur Krafterzeugung (Dubbel et al., 2011, S. H1 ff.). Der Druck ist definiert als Kraft, dividiert durch die Kolbenfläche. Die Kraft entspricht der Last des anzuhebenden Körpers, welche auf dem Hubzylinder ruht (U. Fischer et al., 1990, 131 f.).

Die Abbildung 20 zeigt die Funktionsweise einer manuellen hydraulischen Kraftübertragung. Der Pumphebel wird mit der Kraft F abwärts bewegt. Durch die dabei entstehende Kraft F_1 wird im Pumpkolben mit der Kolbenfläche A_1 eine Hydraulikflüssigkeit aus dem Öltank in den Hubkolben mit der Kolbenfläche A_2 gedrückt. Durch die größere Kolbenfläche im Hubkolben entsteht dort die höhere Kraft F_2 . Rückschlagventile verhindern bei der Aufwärtsbewegung des Pumphebels ein Zurückfließen der Flüssigkeit (Will et al., 2007, S. 99 ff.).

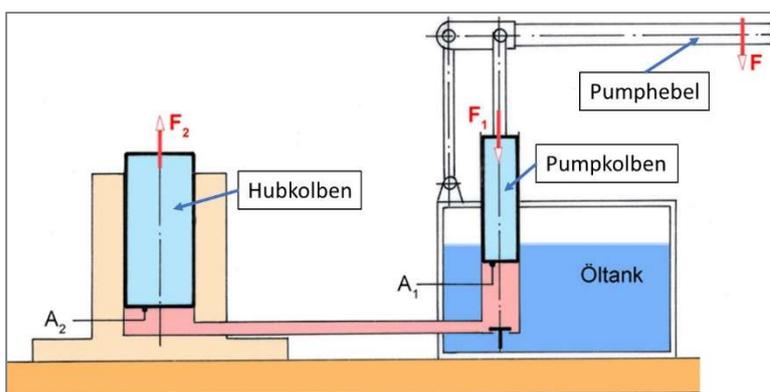


Abbildung 20: Funktionsweise der hydraulischen Presse (lehrerfreund.de, 2010)

Hydraulische Systeme sind kompakt, wartungsarm und lassen sich stufenlos einstellen. Druckbegrenzungsventile bieten einen effektiven Überlastungsschutz bei Druckspitzen. Die Kraftübertragung kann direkt aus dem Stillstand erfolgen. Die Nachteile der hydraulischen Systeme werden durch die Anwendung bei unterschiedlichen Temperaturen deutlich. Hierbei kann sich die Viskosität der Betriebsflüssigkeiten ändern. Der hohe Systemdruck kann bei hydraulischen Systemen zu Leckagen in der Anlage führen. Die verwendeten Betriebsflüssigkeiten sollten gefiltert und gereinigt in dem System vorhanden sein. Luft einschließen bei sogenannten offenen Hydrauliksystemen verändern die Verdichtungseigenschaften und führen zu Ungenauigkeiten. Das Hydrauliksystem besitzt durch die robuste Bauweise ein hohes Eigengewicht. Tabelle 2 stellt die Vor- und Nachteile hydraulischer Systeme gegenüber mechanischen Systemen dar (Will et al., 2007, S. 3 f.).

Tabelle 2: Gegenüberstellung mechanischer und hydraulischer Systeme (Will et al., 2007, S. 3 f.)

	Vorteile	Nachteile
Hydraulische Systeme	<ul style="list-style-type: none"> + Kraftübertragung auf kleinem Raum + Stufenlose Regelung + Sicherer Überlastungsschutz + Wartungsarme Anlagen + Bewegungen auch aus dem Stillstand + Einfache Bedienung 	<ul style="list-style-type: none"> - Ungenauigkeit bei Temperaturschwankungen - Dichtungsprobleme - Ungenauigkeit durch Luft einschluss - Hohe Ansprüche an Betriebsmittel - Hohes Eigengewicht
Mechanische Systeme	<ul style="list-style-type: none"> + Geringes Eigengewicht + Temperatur hat keinen Einfluss auf Bedienung + Keine Verwendung von Hydraulikflüssigkeit + Austausch einzelner Bauteile bei Defekt + Direkte Kraftübertragung 	<ul style="list-style-type: none"> - Schmierung einzelner Bauteile nötig - Höhere Losbrechkraft vorhanden - Komplexe Abstimmung einzelner Bauteile - Hoher Verschleiß der Bauteile - Komplexer Aufbau - Ungenauigkeit durch Verschleiß - Reibungsverluste

2.5.2 Aufbau und Funktionsweise der technischen Fällhilfen

Der Einsatz von Keilen ermöglicht ein Anheben schwerer Lasten durch geringen Kraftaufwand. Mechanische Fällkeile übertragen die Kraft durch eine Kombination von Gewinde und Keilwirkung. Die benötigte Handkraft ist dabei abhängig von der

Gewindesteigung und dem Keilwinkel (Wittel et al., 2011, S. 248 ff.). Hydraulische Fällkeile arbeiten nach dem Prinzip der hydraulischen Kraftübertragung und der Keilwirkung.

Mechanische und hydraulische Fällkeile bestehen, wie in Abbildung 21 zu sehen, aus ähnlichen Bauteilen. Diese sind der Druck- bzw. Einschubkeil, die Federbleche und der Hebel. Der Hauptunterschied beider Systeme liegt in der Kraftübertragung, welche über ein Trapezzgewinde oder eine Hydraulikanlage erfolgt (Reetz, 2014).

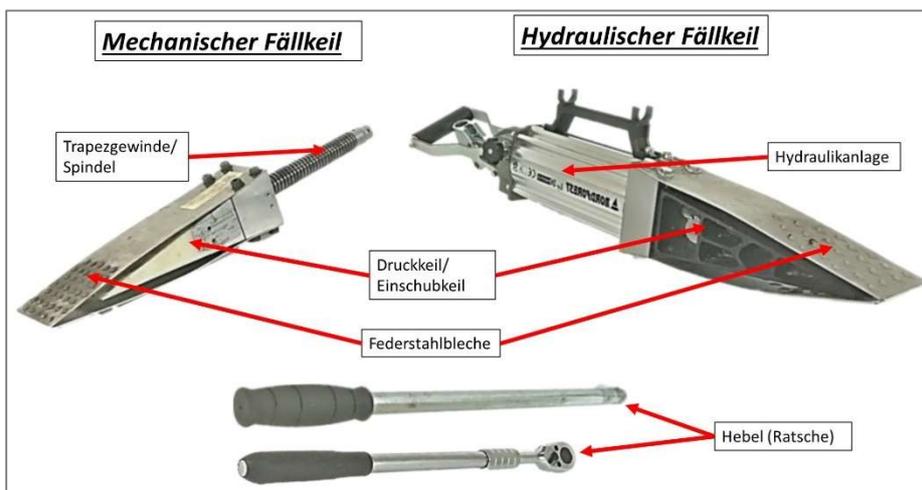


Abbildung 21: Bezeichnung der Bauteile technischer Fällkeile (Eigene Darstellung)

Ein technischer Fällkeil ist

„[...] eine Vorrichtung zum Einschieben in eine Fällschnittkerbe wie sie beim Fällen eines Baumes mittels Motorsäge hergestellt wird und anschließend Auseinanderdrücken der Schnittflächen dieser Schnittkerbe mittels Führungsblech³, Einschubkeil, Schraube, Mutter, Gehäuse und Lager bei Betätigung mittels Ratsche oder geeignetem drehenden Werkzeug“ (Miggitsch, 2014).

Die Hersteller von Fällhilfen konkurrieren in Bereichen verschiedener Antriebseinheiten, Innovationen und Bauweisen. Die Funktionsweisen sind allerdings nahezu identisch, es wird mit wenig Kraft eine große Last angehoben. Der Antrieb erfolgt über einen Handhebel oder einen Elektromotor (Eber, 2017).

Das Funktionsprinzip des hydraulischen Fällkeils ist vergleichbar mit dem eines Hubzylinders. Die Hydraulik-Handpumpe erzeugt einen Systemdruck, wodurch der

³ Im weiteren Text auch Federstahlblech genannt

Druckkeil durch den Hubkolben nach vorne bewegt wird. Die Federstahlbleche verhindern das Zurückrutschen des Fällkeils aus dem Fällschnitt (Sacher, 2006).

Bei einem mechanischen Fällkeil wird die Einschubkraft des Druckkeils mittels eines Hebels und einer Trapezgewindespindel erzeugt. Auch hier verhindern Federstahlbleche ein Zurückrutschen der Fällhilfe (Koller GmbH, 2015).

Der Einsatzbereich der technischen Fällhilfen wird durch die Hubhöhe und Hubkraft begrenzt. Die Hubkräfte der am Markt befindlichen Systeme reichen von 60 kN bis 390 kN, abhängig von der Bauweise und dem Fällhilfenmodell. Die benötigte Hubhöhe bei der Baumfällung ist unter anderem abhängig von dem Baumdurchmesser und der Schwerpunktlage des Baumes. Reicht die Hubhöhe oder die Hubkraft nicht aus, kann der Baum das Kippmoment nicht erreichen und wird dadurch nicht zu Fall gebracht (Wagner et al., 2010).

Tabelle 3 erläutert die praxisrelevanten Unterschiede der technischen Fällhilfen. Die Systematisierung nach Hubhöhe, Hubkraft und Gewicht wurde aufgrund des praktischen Einsatzes gewählt. Diese Eigenschaften der Fällhilfen sind für den Anwender relevant. Die Recherche erfolgte auf Grundlage FPA-anerkannter technischer Fällhilfen. Der hydraulische Hubzylinder kann aufgrund der hohen Hubhöhe theoretisch Bäume mit großem Rückhang fällen. Er verfügt allerdings im Vergleich zu alternativen Fällhilfen über ein hohes Eigengewicht. Die technischen Fällkeile weisen eine geringere Hubkraft und Hubhöhe auf. Im direkten Vergleich haben die mechanischen Fällkeile ein geringeres Eigengewicht und eine geringere maximale Hubkraft (KWF e.V.).

Tabelle 3: Unterschiede praxiserprobter Fällhilfen (KWF e.V.)

Bezeichnung	Hubhöhe [mm]	Hubkraft [kN]	Gewicht [kg]
Hydraulischer Hubzylinder	140	300	14
Hydraulischer Fällkeil	45 bis 80	200 bis 390	10 bis 13
Mechanischer Fällkeil	40 bis 80	60 bis 260	2 bis 10

Zur Ermittlung der maximalen Hubkräfte technischer Fällkeile hat das KWF einen Leistungsvergleich durchgeführt. Um gleichförmige Antriebsgeschwindigkeiten zu erhalten, wurden bei den Versuchen unterschiedliche funkfernbedienbare Fällkeile verwendet. Resultierend daraus zeigte sich (Abbildung 22), dass die

Hubkraftsteigerung in Abhängigkeit der Antriebseinheit und der maximalen Hubkraft der Fällhilfen zeitlich versetzt stattfindet. Bei dem funkfernbedienbaren mechanischen Fällkeil TR300 von Forstreich wurde die Hubkraft von 140 kN nach 18 Sekunden erreicht. Die funkfernbedienbaren hydraulischen Fällkeile von Strixner benötigten je nach Fällkeil mehr Zeit, um die Hubkraft von 140 kN zu erreichen. Der FK 10TK benötigt 37 Sekunden, der FK 10T 40 Sekunden und bei dem FK 20T beträgt die Zeit zur Hubkraftentwicklung 66 Sekunden (Ruppert & Lippert, 2019a).

Die Hubkraft des mechanischen Fällkeils wird im Vergleich zu den hydraulischen Systemen schneller erhöht (Ruppert & Lippert, 2019a). Der zeitlich versetzte Hubkraftanstieg der hydraulischen Fällkeile kann durch die Pumpenleistung und der notwendigen Menge an geförderter Hydraulikflüssigkeit erklärt werden. Die Pumpe muss das Volumen des Arbeitszylinder erst füllen, um den Druckkeil nach vorne zu bewegen. Das hydraulische Fällsystem von Strixner, welches als Differenzialbauweise konzipiert ist, erreicht durch unterschiedliche Baugrößen der Fällköpfe unterschiedliche Hubleistungen. Die Steigung der Hubkraftverlaufskurve des Strixner Fällkopf FK 20T ist im Vergleich zu den anderen hydraulischen Fällköpfen von diesem Hersteller, aufgrund des größeren Volumens des Arbeitszylinders, flacher. Dieser erzeugt dafür eine größere maximale Hubkraft. Bei dem mechanischen Fällkeil von Forstreich kann der steile Anstieg der Hubkraftkurve damit begründet werden, dass die Spindel direkt von der Antriebseinheit in Bewegung gesetzt wird und somit den Vorschubkeil im Vergleich zu der hydraulischen Einheit schneller bewegt (Ruppert & Lippert, 2019a).

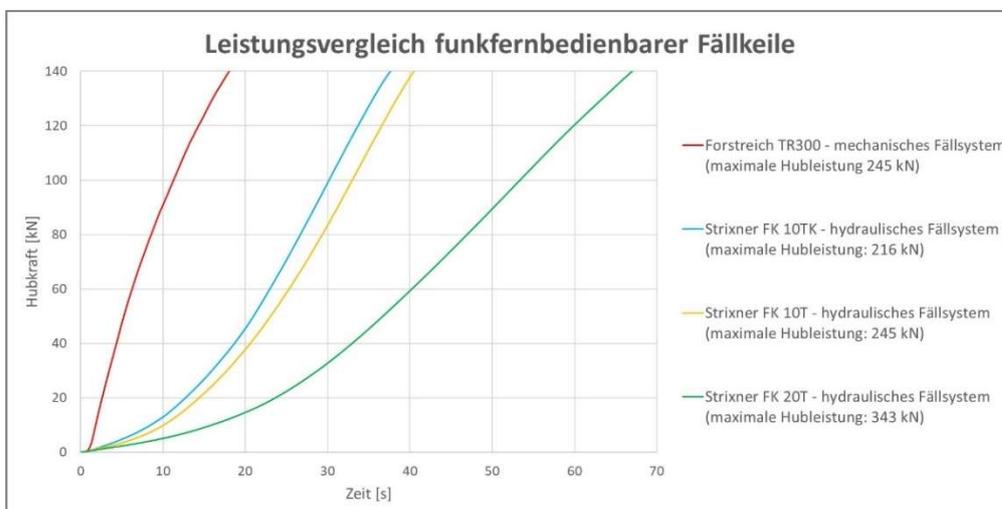


Abbildung 22: Leistungsvergleich mechanischer und hydraulischer Funkfernkeile (Ruppert & Lippert, 2019a)

Ein Faktor, welcher den Wirkungsgrad der technischen Fällkeile verschlechtert, ist die Reibung zwischen dem Einschubkeil und den beidseitig anliegenden Federstahlblechen⁴. Bei den mechanischen Fällkeilen kommt es durch die Reibung in den Gewindegängen der Spindel zu einer zusätzlichen Verschlechterung des Wirkungsgrades. Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, liegt der entstehende Hubkraftverlust zwischen einem gefetteten und ungefetteten mechanischen Fällkeil bei ca. 23 %. Im ungefetteten Zustand benötigt der Fällkeil 38 Sekunden, um eine Hubkraft von 140 kN zu erreichen. Der gefettete Fällkeil erreicht die Hubkraft innerhalb von 18 Sekunden. Die Zeitersparnis hat den Vorteil, dass der Baum schneller den Kippunkt überschreitet und dadurch äußere Einflüsse weniger relevant werden (Ruppert & Lippert, 2019a).

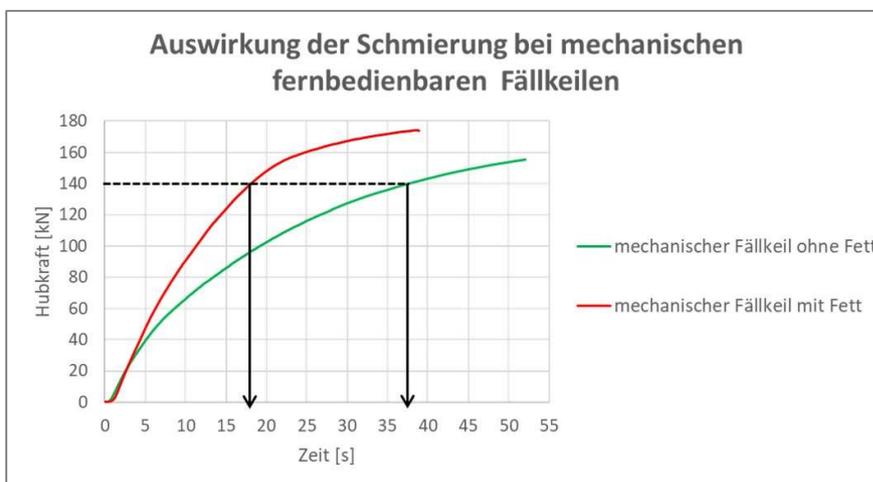


Abbildung 23: Hubkraftvergleich in Abhängigkeit der Schmierung (Ruppert & Lippert, 2019a)

2.5.3 Praktische Anwendung von Fällhilfen

Technische Fällhilfen sollten nur durch geschultes Personal, in den vom Hersteller definierten Einsatzbereichen, verwendet werden. Dieser liegt im optimalen Fall bei geradestehenden Bäumen sowie leichten Rückhängern. Vor der Anwendung ist auf einen einwandfreien Zustand des Werkzeugs zu achten und die Funktionsfähigkeit des Gerätes ist zu prüfen (Landesbetrieb ForstBW, 2016).

Die Einsatzgrenze bei der Anwendung von Fällhilfen sollte bei einem maximalen Rückhang von 1,5 m an der Kronenspitze liegen. Die technischen Fällhilfen sind nicht als Seilwindenersatz anzusehen. Bei einem größeren Rückhang besteht die Gefahr, dass die angewandte Kraft und die dadurch entstehende Spannung in der

⁴ Erläuterung erfolgt im Kapitel „Praktische Anwendung von Fällhilfen“

Bruchleiste zu einer Überbelastung der Holzfasern führen. Als Faustregel beim Einsatz der Fällhilfen gilt: „Nur Bäume, welche theoretisch händisch gekeilt werden können, sollten mit einer technischen Fällhilfe zu Fall gebracht werden“ (Ruppert, 2000).

Diese Aussage verhindert Arbeitsunfälle, welche durch eine zu hohe Belastung der Bruchleiste oder ein Überschätzen der aufgewandten Kraft entstehen. Während der Durchführung der Untersuchung fiel auf, dass der Praxisanwender kaum einen Bezug zu den entstehenden Kräften während der Fällung eines Baumes hat (siehe Kapitel: „Umfrage zur Anwendung der Fällhilfen“).

Die Vorgehensweise während der Baumfällung lässt sich in mehrere Arbeitsabschnitte gliedern. Diese Arbeitsabfolge ist nachfolgend aufgeführt (Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau [SVLFG], 2017).

1. Baumansprache und Festlegen der Fällrichtung
2. Anlage der Rückweiche
3. Fallkerbanlage und Prüfung der Fällrichtung
4. Kontrolle des Fallbereichs
5. Ausführung des Fällschnitts und Ausformung der Bruchleiste und des Stützbands
6. Setzen der Fällhilfen
7. Kontrolle des Fallbereichs
8. Durchtrennen des Stützbands
9. „Umkeilen“ des Baumes
10. Verlassen des Gefahrenbereichs Richtung Rückweiche

Die Durchführung der Baumfällung beginnt mit dem Aufsuchen des zu fällenden Baumes und der anschließenden Baumansprache. Dabei wird nach möglichem Totholz in der Krone, sowie sonstigen Gefahren geschaut. Die Fällrichtung wird daraufhin in Abhängigkeit der Nachbarbäume und der Verjüngung, unter Berücksichtigung möglicher Risiken nach den Faktoren Hangrichtung, Baumhöhe und Kronenzustand bestimmt. Daraufhin erfolgt die Anlage der Rückweiche, welche als Rückzugsort für den Forstwart nach der Durchtrennung des Haltebandes dient. Diese muss hergerichtet werden, damit mögliche Risiken ausgeschlossen werden können wie z.B. Stolpergefahren. Nachdem die Rückweiche ausgebildet ist, wird nun der Fallkerb

angelegt. Abbildung 24 beschreibt die Sicherheitsfälltechnik während der motormannuellen Baumfällung. Diese ist primär für Fällhilfen nach dem derzeitigen Stand des Wissens anzuwenden. Wie in Abbildung 25 beschrieben, sollten die Stockmaße der Regelfälltechnik bei der Baumfällung eingehalten werden. (SVLFG, 2017).

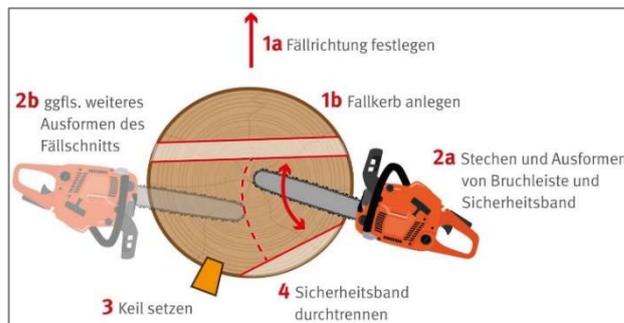


Abbildung 24: Sicherheitsfälltechnik (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. [DGUV], 2019)

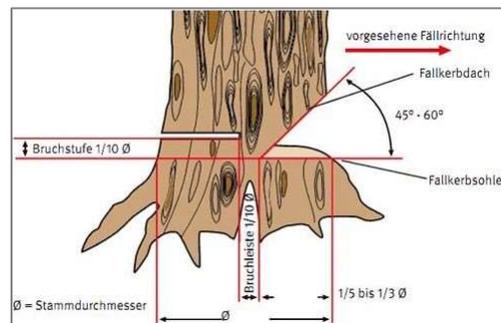


Abbildung 25: Stockmaße bei der Baumfällung (DGUV 2011)

Der Fallkerb, welcher der Einhaltung der Fällrichtung dient, sollte 25 % bis 33 % des BHD betragen. Dabei wird deutlich, dass dieser ein entscheidender Faktor für die Wahl der Fällhilfe darstellt. Aufgrund der Anwendung des Sicherheitsfällschnitts sollte der BHD je nach eingesetzter Fällhilfe ausreichend dimensioniert sein. Beispielsweise ist die Anwendung der hydraulischen Hubzylinder erst ab einem BHD von über 50 cm möglich. Bei dem Einsatz eines Hubzylinders (vgl. Abbildung 26) erfolgt die Fallkerbanlage erhöht, da dieser unterhalb des Fällschnitts in den Stammfuß eingesetzt wird. Hierfür ist eine Art „Tortenstück“ als Nische herauszuschneiden. Es ist darauf zu achten, dass die Druckkraft auf längsverlaufende Fasern gerichtet ist. Querverlaufende Fasern könnten zu einem Aufreißen des Stammes führen. Der weitere Schnittverlauf ist vergleichbar mit der Sicherheitsfälltechnik, jedoch entfällt das Stützband, da der eingesetzte Hubzylinder ein Zuklappen des Fällschnitts verhindert (Nordforest).

Die Schnitttechnik beim Einsatz eines technischen Fällkeils, dargestellt in Abbildung 27, erfolgt analog zu den klassischen Keilen. Jedoch wird aufgrund des größeren Keilwinkels die Schnittfuge im Einsatzbereich symmetrisch nach oben und unten „schnabelförmig“ ausgeformt, um ein Herausrutschen des technischen Fällkeils zu verhindern und eine Anpassung der keilförmigen Geometrie zu ermöglichen (Sitarz, 2016).



Abbildung 26: Hubzylinder (KWF e.V.)



Abbildung 27: Fällkeil „TR300“ (KWF e.V.)

Nach dem Einsetzen der technischen Fällkeile erfolgt die Ausführung des Fällschnitts. Weiterhin ist dabei, aus arbeitsschutztechnischen und ergonomischen Gründen, die Nutzung klassischer Keile notwendig. Diese dienen dem Schutz der Sägekette vor einem versehentlichen Schnitt in die technische Fällhilfe und verhindern ein Einklemmen der Kettensäge bei einem technischen Defekt der Fällhilfe (aid - Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V., 2015). Nach dem Ausformen der Bruchleiste wird die technische Fällhilfe und der klassische Fällkeil in den Fällschnitt eingesetzt und vorgespannt. Dies verhindert ein Einklemmen der Schneidgarnitur der Kettensäge im weiteren Schnittverlauf. Nach der Ausformung des Fällschnittes wird das Stützband waagrecht, diagonal oder unterhalb des Fällschnittes durchtrennt. Das Keilen des Baumes mit dem technischen Fällkeil erfolgt mit geringem Kraftaufwand. Sobald Kippbewegungen im Kronenbereich erkennbar werden, muss der Gefahrenbereich verlassen werden. Bei der Anwendung eines funkfernbedienbaren Fällkeils ist ein Aufsuchen der Rückweiche bereits nach dem Durchtrennen des Stützbandes möglich (aid - Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V., 2015).

2.5.4 Vorteile und Nachteile der technischen Fällhilfen

Die technischen Fällhilfen erleichtern die Arbeit der Forstwirte und tragen einen wesentlichen Beitrag zum Arbeitsschutz bei. Aufgrund der Möglichkeit des frühzeitigen Zurücktretens in die Rückweiche, der Verringerung von Erschütterungen in dem Kronenbereich und einer besseren ergonomischen Arbeitsweise können Arbeitsunfälle verringert werden (Mayer, 2020). Aufgrund des geringeren Erschöpfungsgrades des Forstwirtes im Tagesverlauf im Vergleich zum manuellen Keilen, kann der Einsatz technischer Fällhilfen zu einer gleichbleibend hohen Konzentrationsfähigkeit beitragen (V. Gerding, Persönliche Mitteilung, 25. August 2020).

Nach Aussage des Patents DE202015000321U1 (Strixner, Robert, Dipl.-Ing. (FH), 82216, Maisach, DE, 2015) dienen technische Fällkeile der Reduktion körperlicher Schädigungen, welche durch das händische Schlagen auftreten können. Eine Nebenfunktion haben diese Geräte im Bereich des Arbeitsschutzes durch die weitgehende Vermeidung von Erschütterungen im Kronenbereich des Baumes bei der Fällung. Dies bestätigte auch das KWF e.V. in einer Versuchsreihe (Lippert, 2020a).

In Abbildung 28 wird verdeutlicht, dass die Impulse, welche beim händischen Keilen in den Stamm übertragen werden, im Vergleich zu technischen Alternativen höher sind. Der Hammer-Schlag-Rhythmus, wie in der Grafik abgebildet, bringt hohe Impulse in den Baum ein. Diese Impulse können verstärkt zu einem Lösen von Totholz führen. Die Grafik verdeutlicht, wann und in welcher Intensität die Impulse in dem Stamm auftreten. Erkennbar sind zu Beginn leichte Beschleunigungswerte. Diese entstehen bei der Sägearbeit während des Herausschneidens des Fallkerbs und des Ausformens der Bruchleiste. Die später auftretenden Beschleunigungen während der Keilarbeit machen die eingehenden Impulse in den Baum deutlich (Lippert, 2020a).

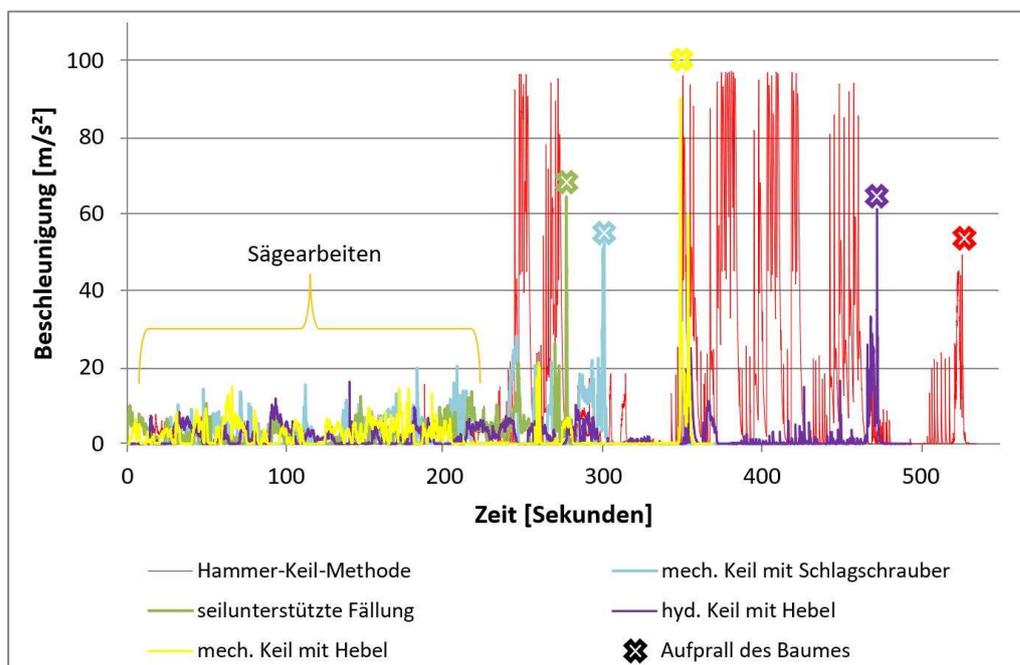


Abbildung 28: Schwingungen im Baum in Abhängigkeit eingesetzter Fällhilfen (Lippert, 2020a)

Der Einsatz technischer Fällhilfen kann nach Untersuchungen durch Schubert (2018) negative Auswirkungen auf den Körper des Anwenders haben. Diese sind die Belastung weniger Muskelgruppen, die statische Arbeit und die geringe

Bewegungsbandbreite. Die Schwingbewegungen werden durch den gesamten Körper ausgeführt. Pump- und Hebelbewegungen beanspruchen den Oberkörper, teilweise in ungünstigen Positionen. Das händische Keilen ist aufgrund des geringen Werkzeuggewichts im Vergleich zu den technischen Fällhilfen vorteilhafter. Nach Aussage von Schubert (2018) ist der zeitliche Aufwand bei der Verwendung eines mechanischen Fällkeils höher als bei der Hammer-Keil-Methode. Der Einsatz technischer Fällhilfen kann neben der Reduktion von herabfallenden Totästen auch zu neuen Unfallursachen führen. Dabei kann es bei der Nutzung der Geräte zu Ausweichbewegungen oder zu einem seitlichen Weggleiten bei der Betätigung der Ratsche kommen.

3 Material und Methoden

3.1 Umfrage zur Anwendung der Fällhilfen

Zu Beginn dieser Arbeit wurde eine Umfrage zur Anwendung und Nutzung technischer Fällhilfen durchgeführt. Ziel war es, auf Grundlage praktischer Erfahrung von professionellen Anwendern einen optimalen Versuchsaufbau zu realisieren. Die Zielgruppe bestand aus Mitgliedern des KWF-Fachausschusses „Geräte und Werkzeuge“ und weiteren praktischen qualifizierten Anwendern. Die Umfrage enthielt Fragen zur Arbeitserfahrung mit Fällhilfen, zu Einsatzmöglichkeiten und möglichen Kaufkriterien, welche eine technische Fällhilfe erfüllen sollte. Ein Schwerpunkt der Umfrage lag darin herauszufinden, ob die praktische Relevanz einer Tabelle zur Bestimmung einer anwendbaren Fällhilfe hinsichtlich ihrer Hubkraft praxistauglich erscheint. Dies sahen 86 % der Befragten als hilfreich an. Die daraus abzuleitende Hilfstabelle soll in Anlehnung an die Calmbacher Hilfstabelle (Abbildung 29) entstehen, welche bereits eine in der Praxis angewandte Hilfstabelle für die seilunterstützte Fällung ist.

BHD	BHD	BHD	Laubbäume Zugkraft (t)					Nadelbäume Zugkraft (t)					
etwa	leichter	starker	bei Anschlaghöhe										
gerade	Rückhänger		bei Anschlaghöhe					bei Anschlaghöhe					
stehend	bis 2 m	bis 5 m	5 m	7,5 m	10 m	15 m	20 m	5 m	7,5 m	10 m	15 m		
	oder	Faktor >	3,6	2,4	1,8	1,2	0,9	3,6	2,4	1,8	1,2		
45	hindernde		1,1	0,7	0,6	0,4	0,3	0,9	0,6	0,4	0,3		
50	Aste		1,4	0,9	0,7	0,5	0,3	1,1	0,7	0,5	0,4		
55	39		1,6	1,1	0,8	0,5	0,4	1,3	0,9	0,6	0,4		
60	43	24	2,0	1,3	1,0	0,7	0,5	1,5	1,0	0,8	0,5		
70	50	28	3,0	2,0	1,5	1,0	0,8	2,4	1,6	1,2	0,8		
80	57	32	4,0	2,7	2,0	1,3	1,0	3,1	2,1	1,5	1,0		
90	64	36	5,0	3,4	2,5	1,7	1,3	3,9	2,6	2,0	1,3		
100	71	40	6,2	4,1	3,1	2,1	1,6	4,8	3,2	2,4	1,6		
110	79	44	7,5	5,0	3,8	2,5	1,9	5,9	3,9	2,9	2,0		
120	86	48	9,0	6,0	4,5	3,0	2,2	7,0	4,6	3,5	2,3		
130	93	52	10,5	7,0	5,3	3,5	2,6	8,2	5,4	4,1	2,7		
140	100	56	12,2	8,1	6,1	4,1	3,0	9,5	6,3	4,7	3,2		
150	107	60	14,0	9,3	7,0	4,7	3,5	10,9	7,3	5,4	3,6		
160	114	64	15,9	10,6	8,0	5,3	4,0	12,4	8,3	6,2	4,1		
170	121	68		12,0	9,0	6,0	4,5	14,0	9,3	7,0	4,7		
180	129	72		13,4	10,1	6,7	5,0	15,7	10,4	7,8	5,2		
200	143	80		16,6	12,4	8,3	6,2		12,9	9,7	6,4		
220	157	88			15,1	10,0	7,5		15,6	11,7	7,8		
240	171	96				11,9	9,0			13,9	9,3		
260	186	104				14,0	10,5			16,3	10,9		
280	200	112				16,3	12,2				12,6		
300	214	120					14,0				14,5		
320	229	128					15,9				16,5		

Abbildung 29: Calmbacher Hilfstabelle (Kieser & Bopp, 2009)

Abbildung 30 verdeutlicht die Messgrößen, welche nach der Auswertung der Fragebögen mit in die Tabelle eingebunden werden sollten.

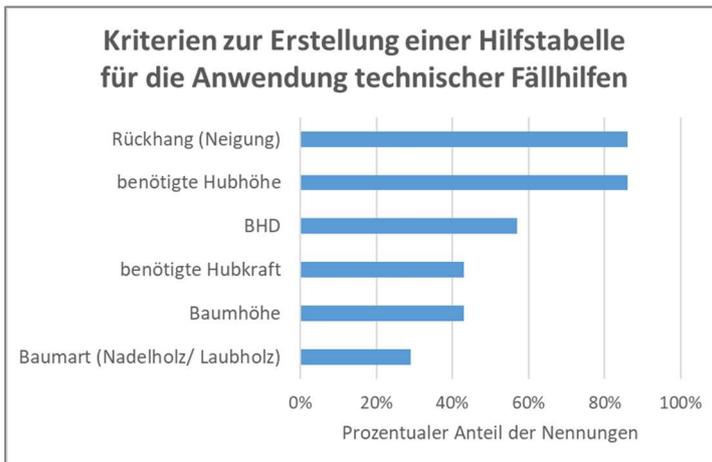


Abbildung 30: Relevante Faktoren zur Erstellung einer Hilfstabelle für Fällhilfen (Eigene Darstellung)

Die Mehrheit der Befragten empfand den Rückhang und die benötigte Hubhöhe bei der Baumfällung als die relevantesten Faktoren für die Nutzung einer Hilfstabelle. Diese Aussage deckt sich mit der allgemein üblichen Lehrmeinung, dass die Hubhöhe der begrenzende Faktor bei der Baumfällung mit den technischen Fällhilfen ist. Die Relevanz zwischen Hubhöhe und Rückhang wird bei den Experten unterschiedlich gesehen. Dabei entstehen zwei Meinungsverschiedenheiten: Die eine Gruppe vertritt die Meinung, nahezu jeder Baum kann unabhängig vom Rückhang durch eine Fällhilfe mit entsprechender Hubhöhe gefällt werden. Die zweite Personengruppe ist der Meinung, dass bei einem zu starken Rückhang des Baumes die Zugfestigkeit des Baumes in der Bruchleiste überschritten wird und diese abreißt.

57 % der Anwender gaben an, mit den technischen Fällhilfen auch stärkere Rückhänger zu fällen, als sie es mit händischen Keilen tun würden.⁵ 60 % der Befragten würden einen Baum mit einem Rückhang von maximal 1 m auf diese Art fällen. Die Fällung von stärkeren Rückhängern im Vergleich zum klassischen Keilen wurde dadurch begründet, dass ein wesentlich geringerer Kraftaufwand benötigt wird, um den Baum in die gewünschte Richtung zu fällen. Welche Hubkraft für eine Fällung tatsächlich benötigt wird, konnte nicht zielführend beantwortet werden. Entscheidend für die Hubkräfte sind die Eigenschaften des zu fällenden Baumes selbst. Demnach kann die Meinung der Experten so interpretiert werden, dass eine Fällhilfe mit einer Hubkraft von 250 kN für jede Situation beim Fällen von Bäumen

⁵ Diese Aussage widerspricht der allgemeinen Lehrmeinung

ausreichend sein sollte. Diese Aussage gilt es, in der folgenden Bachelorarbeit zu verifizieren oder falsifizieren.

3.2 Annahmen und Basisdaten für die Hubkraftermittlung

Die benötigte Hubkraft, welche durch die technischen Fällhilfen bei der Fällung von Bäumen aufgebracht werden muss, wird durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Diese sind teilweise von dem Baum selbst, aber auch von externen Gegebenheiten abhängig. Da die Bäume wachstumsbedingt unterschiedliche Strukturen haben, ist eine Darstellung nur in einer Näherung möglich. Zur Darstellung und Herleitung der Basisdaten für die Verrechnungen zur benötigten Hubkraft wurden Annahmen getroffen.

Annahmen für die theoretische Berechnung der Hubkraft:

1. Die Schnittfläche des Baumstamms ist kreisrund.
2. Der Stamm hat die Form eines Kegelstumpfs.
3. Die Abholzigkeit liegt bei 1 cm pro laufenden Meter.
4. Die Äste außerhalb der Krone werden nicht berücksichtigt.
5. Die Krone besitzt die Form einer Kugel.
6. Das Reisholz⁶ befindet sich ausschließlich in der Krone.
7. Dichte und Wassergehalt sind gleichmäßig verteilt.
8. Der Fällschnitt wird nach der Sicherheitsfälltechnik und den damit verbundenen geometrischen Verhältnissen durchgeführt.

Diese Annahmen eignen sich, die Stamm- und Baumform anhand einzelner Faktoren für die Berechnung aufzubereiten. Daneben dienen die erhobenen Baummessdaten einer exakten Berechnung der Hubkräfte.

Das Holzvolumen des Baumes ist die Grundlage für die Berechnungen der Hubkraft. Ziel ist es, aus den Baummessdaten das Gewicht und den Schwerpunkt in guter Näherung zu ermitteln. Das Derbholzvolumen⁷ des Baumes wird mittels einer Formel aus dem Bereich der Holzmesslehre berechnet. Aus dem Grund der geringen Astdurchmesser in dem Kronenraum ist der Kronenvolumenanteil meist unbekannt (Prodan, 1965, 7 f.). Die Berücksichtigung des Reisholzes ist jedoch für die Schwerpunktberechnung notwendig. Ein erhöhtes Volumen im oberen

⁶ Reisholz = oberirdische Holzmasse unter 7 cm Durchmesser mit Rinde (Prodan (1965, S. 7 f.)

⁷ Derbholz = oberirdische Holzmasse über 7 cm Durchmesser mit Rinde (Prodan (1965, S. 7 f.)

Baubereich führt zu einer Veränderung des Schwerpunktes. Die Ermittlung des Reisholzes ist in heutiger Zeit aufgrund der ökonomischen und ökologischen Betrachtungsweise unüblich. Nach Schober et al. (1952) beträgt der Anteil des Reisholzes am Derbholzvolumen für die Buche zwischen 11 % und 14 %. Eine individuelle Herleitung der Versuchsbaum-Rohgewichte und Volumina wurde durch ein Schätzmodell der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft (FAWF) ermöglicht. Die daraus abgeleiteten Anteile des Reisholzes liegen im Bereich von 11 % bis 15 %. Das Rohgewicht der Versuchsbuchen wurde auf 590 kg bis 680 kg pro Festmeter (Fm) geschätzt (Block et al., 2016).

Der Wassergehalt der Versuchsbäume wurde zur Gewichtsermittlung benötigt. Dazu wurden mehrere Probestücke aus den Bäumen herausgeschnitten, gewogen, in einem Trockenofen heruntergetrocknet und erneut gewogen.

Das Gewicht vor der Trocknung beinhaltet das Stammteil inklusive des Wassergehaltes. Die Trocknung ermöglicht eine Verdunstung des Wassers, daraufhin beschreibt das Gewicht nach der Trocknung die Masse des Holzes bei 0 % Wassergehalt. Die Differenz der Gewichte stellt den Wasseranteil dar. Dadurch wird ausgesagt, wie viel Prozent von dem Gesamtgewicht des Probestücks Wasser ist. Der Wassergehalt darf nicht mit der Holzfeuchte verwechselt werden. Die Holzfeuchte beschreibt den Anteil des Wassers in Abhängigkeit des Trockengewichts. Die angewandte Formel zur Berechnung des Wassergehalts wird in der Gleichung 2 erläutert.

$$\text{Wassergehalt} = \frac{\text{Wassermasse}}{\text{Trockenmasse} + \text{Wassermasse}} \quad (2.1)$$

$$\text{Wassermasse} = \text{Feuchtemasse} - \text{Trockenmasse} \quad (2.2)$$

$$\text{Wassergehalt [\%]} = \frac{\text{Gewicht}_{\text{vorher}} - \text{Gewicht}_{\text{nachher}}}{\text{Gewicht}_{\text{vorher}}} * 100 \quad (2.3)$$

Gleichung 2: Herleitung des Wassergehaltes

Eine Verrechnung des Rohgewichts mit dem Wassergehalt ermöglicht die Ermittlung des Baumgewichts im feuchten Zustand.

Tabelle 4 stellt die Messwerte dar, welche die Herleitung des Wassergehalts ermöglichen.

Tabelle 4: Ermittlung des Wassergehaltes der Versuchsbäume (Eigene Darstellung)

Probe- stück	Gewicht vor der Trocknung [g]	Gewicht nach der Trocknung [g]	Wassergehalt [g]	Wassergehalt [%]
1	149,9	97,7	52,2	34,82
2	157,9	102,6	55,3	35,02
3	160	102,9	57,1	35,69
4	155,1	99,2	55,9	36,04
5	251	162	89	35,46
6	175	110,8	64,3	36,71
7	138,8	90,2	48,6	35,01
8	147,3	96,2	51,1	34,69
9	209,4	134,9	74,5	35,58
10	186,9	121,7	65,2	34,88
Mittel- wert	173,1	111,8	61,3	35,39

Nachfolgend werden die getroffenen Annahmen begründet und mit der Realität verglichen.

Begründung der Annahmen und Realitätsdarstellung

1. Die Schnittfläche des Baumstammes ist kreisrund

Die Annahme eines kreisrunden Stammquerschnitts wurde aufgrund der vereinfachten Berechnung des Volumens und des Schwerpunktes gewählt. Die reale Form des Baumquerschnitts ist von ungleichmäßigen Einbuchtungen geprägt (Prodan, 1965, S. 50 ff.).

2. Der Stamm hat die Form eines Kegelstumpfes

Durch die Annahme eines Kegelstumpfes als Stammform lässt sich bei unterschiedlichen Durchmessern in unterschiedlichen Stammhöhen ein angepasstes Berechnungsmodell erstellen. Abbildung 31 verdeutlicht die geometrischen Formen, welche die Stammabschnitte des Baumes beschreiben. Nach Prodan, (1965, 50 ff.) wird der untere Stammabschnitt als Neiloid oder Kegel beschrieben. Das mittlere Stammteil besitzt die Form einer Walze oder eines Paraboloids während der obere Stammabschnitt einem Kegel gleicht.

Aufgrund durchgeführter Lasermessungen war es möglich, den Stamm in Annäherung an die Realität digital abzubilden. Darauf aufbauend wurde eine mehrteilige Kegelstumpf-Form als Grundlage für die Berechnung gewählt. Eine Berechnung aufgrund, der durch Prodan beschriebenen Stammformen ist aufgrund mangelnder Anzahl von Messpunkten hier nicht durchführbar.

3. Die Abholzigkeit liegt bei 1 cm pro laufenden Meter

Die Abholzigkeit eines Baumes ist aufgrund unterschiedlicher Faktoren verschieden ausgeprägt. Diese Annahme besagt, dass der Durchmesser pro Meter Stamm um einen cm abnimmt. Sie wurde zur einfachen Ermittlung des Volumens und des Schwerpunkts bei der Hubkraftkalkulation getroffen. Den Ursprung hat diese Annahme in der forstlichen Messung der Abholzigkeit an Bäumen. Dort wird ein Baum mit einer Durchmesserabnahme von unter 1 cm/m als vollholzig bezeichnet (Mette et al., 1989, S. 84 f.). Bei der Berechnung der Versuchsbäume sind die Durchmesser aufgrund der einzelnen Messungen bekannt.

4. Die Äste außerhalb der Krone werden nicht berücksichtigt

Die Verteilung der Äste auf den Kronenbereich erleichtert die Berechnung der Gewichtsverteilung zwischen Krone und Stamm.

In der Realität sind kleinere sowie stärkere Äste am Stammbereich möglich, welche den Schwerpunkt des Baumes verlagern. Aufgrund der Stammvermessung mittels Laser sind die Darstellungen der Äste sowohl in der Krone als auch am Stamm nicht möglich.

5. Die Krone besitzt die Form einer Kugel

Die Kugelform der Krone erleichtert sowohl die Volumenberechnung als auch die Schwerpunktberechnung des Baumes. Dies sorgt ebenfalls für eine idealisierte Baumdarstellung. In der Realität kann die Kronenform des Baumes teilweise oval, einseitig oder auch kegelförmig ausgeprägt sein.

6. Das Reisholz befindet sich ausschließlich in der Krone

Die Annahme, dass sich das Reisholz ausschließlich in der Krone befindet, begründet sich durch den nicht ermittelbaren Anteil des Reisholzes im

Stammbereich. Zur einfachen Berechnung des Volumens und des Schwerpunktes wurde das Reisholz in der Krone verortet.

In der Realität können Wasser- oder Angstreiser im Stammbereich als Reisholz vorkommen. Einzelvorkommende Äste im Stammbereich ändern allerdings wenig an der Schwerpunktveränderung.

7. Dichte und Wassergehalt sind gleichmäßig im Baum verteilt

Die Annahme eines Körpers mit einer gleichmäßigen Dichte und des Wassergehalts erleichtert die Schwerpunktberechnung.

Die Inhomogenität der Holzdichte in einem Buchenstamm ist in Abbildung 32 dargestellt. Die Rohdichte der Buche liegt im Bereich von 550 kg bis 800 kg pro m^3 . Die beeinflussenden Faktoren für die Dichte sind der Durchmesser und die Höhe des Stammes.

Die Verteilung des Wassergehalts im Holz ist von verschiedenen Einflussfaktoren, wie dem Wuchsort, dem Boden, der Wasserversorgung oder der Einschlagszeit abhängig. Die Annahme eines durchschnittlichen, im Baum gleichmäßig verteilten Wassergehalts, welcher bei den Versuchsbäumen bei 35 % liegt, erleichtert die Schwerpunktberechnung.

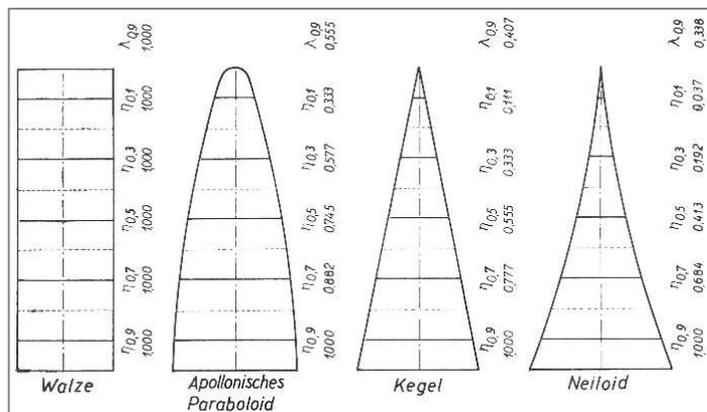


Abbildung 31: Geometrische Formen der Stammschnitte (Prodan, 1965, S. 51)

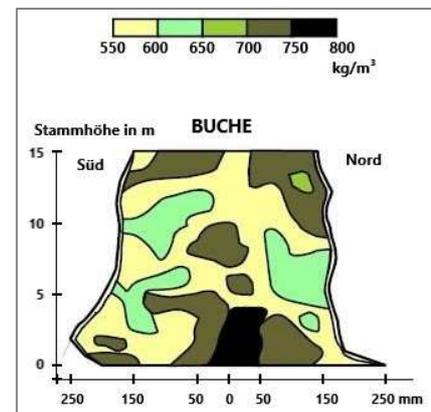


Abbildung 32: Darstellung der Inhomogenität einer Buche (Thienel, 2016, S. 23)

3.3 Beschreibung der Grundlagen der Versuchsreihen

3.3.1 Verwendete Mess- und Hilfsmittel

Das KWF stellte die verwendeten Mess- und Hilfsmittel für die Versuchsdurchführung und deren Auswertung zur Verfügung. Die Keilarbeit während der

Versuchsfällungen wurde mit einem Hydraulikzylinder durchgeführt und die Hubkräfte wurden mit einer Kraftmessdose aufgezeichnet. Die Vermessung der Hangrichtung des Baumes erfolgte mittels Bautachymeter. Die Dokumentation fand durch Bild- und Videoaufnahmen, Messprogrammen sowie manuelle Messungen statt. Die Datenauswertung und -analyse erfolgte mit Hilfe von Messprogrammen und Open-Source-Software. Dazu zählen neben den Standardprogrammen von Microsoft-Office auch Statistik- und Bildbearbeitungssoftware. In Tabelle 5 werden die verwendeten Mess- und Hilfsmittel vorgestellt.

Tabelle 5: Verwendete Mess- und Hilfsmittel (Eigene Darstellung)

	Gerätetyp	Bezeichnung	Hersteller	Kenngößen
Messmittel	Bautachymeter	Leica Builder R100M	Leica und Teuber	Messgrößen: Länge, Breite, Höhe Skalierung: 1 mm Toleranz: 3 mm
	Fluchtstab	Prismenstab L23	Teuber + Vetter Vermessungstechnik	Länge: bis 208 cm justierbare Dosenlibelle
	Kraftmessdose	K-450	Lorenz Messtechnik	Messbereich: bis 500 kN Toleranz: 0,1 % bis 0,3 %
	Laborwaage	KB 5000-1	Kern	Messgröße: Gewicht Messbereich: bis 5,1 kg Skalierung: 0,1 g Toleranz: +- 0,3 g
	Materialprüfmaschine	BZ1-MM14650.ZW02	ZwickRoell GmbH & Co.KG	Messgrößen: Kraft, Länge Messbereich: bis 40 kN, bis 120 cm Toleranz: ± 0,3 %, ± 0,2 %
	Maßband	Taschenrollbandmaß	Richter	Messgröße: Länge Messbereich: bis 300 cm Skalierung: 0,1 cm
	Wasserwaage	Stabila Typ 96 electronic.	Stabila-Messgeräte Gustav Ullrich GmbH	Messgröße: Winkel Toleranz: 1° bis 90° = 0,2°
Hilfsmittel	UAV⁸ (Drohne)	Mavic Pro Platinum	DJI	Sensor: 12,35 Megapixel Videoaufnahme: C4K
	Digitalkamera	Nikon D60 SLR	Nikon	Sensor: 10 Megapixel Objektiv: AF-S Nikkor 18-55mm
	Hydraulikzylinder	YG-30100	Hydraforce	Arbeitsbereich: max. 294 kN; Kolbenhub: 100 mm
	Trockenofen	Heizschrank	Memmert GmbH & Co.KG	Messgröße: Temperatur Arbeitsbereich: 30 °C bis 300 °C Toleranz: ± 1°C

⁸ unpiloted aerial vehicle (Unbemanntes Luftfahrzeug)

3.3.2 Basisdaten und technische Grundlagen

Die Ermittlung der Hubkräfte zur Erzeugung eines Kippmoments bei Rotationskörpern wurde anhand von drei Versuchsreihen durchgeführt. Die erste Versuchsreihe basierte auf einer Baumsimulation. Die zweite fand an Hochstümpfen und die dritte mit Vollbäumen statt.

Wachstumsbedingte geometrische Eigenschaften wie z.B. der BHD, Masse, Höhe der Schwerpunktlage und die Neigung beschreiben Messgrößen, welche eine resultierende Eigenkraft bilden, welche durch die Hubkraft der Fällhilfe ebenfalls aufgebracht werden muss, um den Schwerpunkt des Ganzbaumes über den Kippunkt zu verlagern. Durch die Messreihe mit den Hochstümpfen konnte die benötigte Hubkraft der Fällhilfe, ohne den Einfluss der Baumkrone, bestimmt werden. Somit konnte die in der Bruchleiste erzeugte Biegespannung ermittelt werden, welche überwunden werden muss, um die Bruchleiste zu brechen. Der Ganzbaumversuch diente dazu, die berechneten Werte der Schwerpunktverlagerung des Ganzbaumes und die benötigte Kraft zum Brechen der Bruchleiste zu summieren und diese mit realen Messwerten abzugleichen.

Die Berechnung und Vermessung der individuellen Faktoren jedes einzelnen Baumes waren notwendig, um unterschiedliche Baumeigenschaften, welche sich auf die Hubkraft auswirken, zu berücksichtigen. Abbildung 33 soll einen Freischnitt der wirkenden Kräfte und Spannungen während des Fällvorgangs mit einer Fällhilfe verdeutlichen. Die Hubkraft, welche durch die Fällhilfe aufgebracht wird (F_{Hub_G}), muss größer sein als die Summe der Gewichtskraft des Baumes (F_{GB}) und die Kraft, die zum Brechen der Bruchleiste benötigt wird ($F_{\text{Hub}_{\text{BL}}}$). Abhängig von den wirkenden Strecken bilden diese Kräfte ein Drehmoment um den Kippunkt (KP).

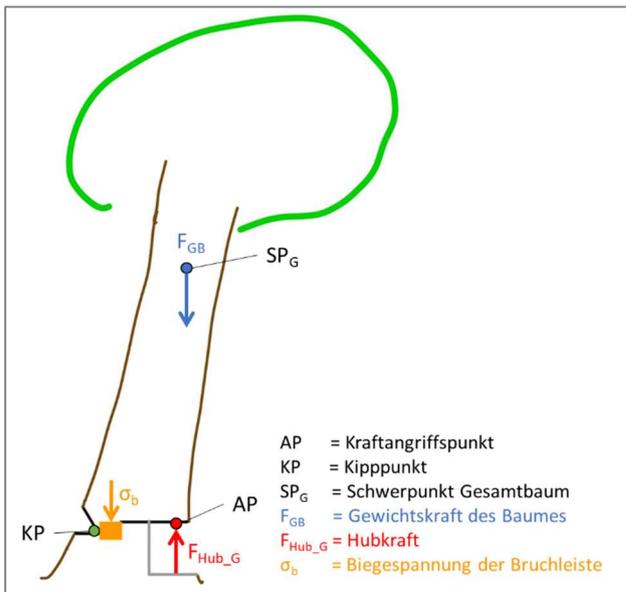


Abbildung 33: Freischnitt der Kräfte und Spannungen während der Baumfällung mit einer Fällhilfe (Eigene Darstellung)

3.3.3 Anforderungen und Beschreibung der Versuchsbestände

Die Versuchsflächen für die praktischen Versuchsreihen an den Bäumen wurden in enger Abstimmung mit Revierleitern ausgewählt, da diese einige Anforderungen erfüllen mussten. Benötigt wurden unbelaubte Buchenbestände mit geringem Bestockungsgrad, sichtbaren Trockenschäden und einem BHD von 30 cm bis 80 cm. Der unbelaubte Zustand der Bäume bietet eine bessere Einschätzung hinsichtlich der potenziellen Gefahren, welche durch herabfallende Kronenteile entstehen können. Der geringe Bestockungsgrad sorgt für weite Baumabstände, dadurch verringert sich die Beeinflussung der Fällrichtung durch Verjüngung oder Nachbarbäume. Die Gefahr, welche durch Trockenschäden entstehen kann, wurde in einem vorherigen Gespräch mit dem Revierleiter analysiert und einzelne Bäume nach einer Begutachtung zur Fällung ausgewählt. Bei der Auswahl der Bäume wurde auf ein Ausgleich zwischen praxisnahen Messungen, Arbeitssicherheit und dem Naturschutz geachtet.

Die Nutzung von Fichten für eine weitere Versuchsreihe wurde größtenteils ausgeschlossen. Der Grund hierfür ist die derzeitige Schadholzlage in der Forstwirtschaft, welche eine Fällung von frischen Fichten in dem benötigten Umfang nicht erlaubte. Ein Einsatz von Fällhilfen bei Käferfichten ist aus ergonomischen und arbeitssicherheitstechnischen Gründen durchaus denkbar. In dieser Versuchsreihe ist die Buche als Baumart jedoch aufgrund der großen Krone und des Baumgewichts von Vorteil.

Nachteilig ist dort jedoch der Stammverlauf, welcher aufwändig vermessen werden musste.

Die zweite Versuchsreihe zur Ermittlung der Bruchleistenspannung fand in einem weiteren Buchenbestand statt. Nach Angaben der letzten Forsteinrichtung aus dem Jahr 2009 handelte es sich bei dem 9,6 Hektar⁹ großen Bestand um einen Buchen-Eichen-Mischbestand mit Buchen im Unter- und Zwischenstand. Der aus 70 % Buchen bestehende Bestand ist im Durchschnitt 150 Jahre alt und wurde im Jahr 2019 durch einen Sturm beschädigt. Dadurch hat sich der ursprüngliche Bestockungsgrad von 99 % stark reduziert. Dies ist in Abbildung 34 verdeutlicht. Die Windbruch-Buchen, welche auf Höhen von 7 m bis 12 m gebrochen sind, eigneten sich aufgrund der fehlenden Kronen hervorragend zur Bestimmung der benötigten Hubkraft, um die Bruchleiste zu brechen (Abbildung 35).



Abbildung 34: Bestand der Versuchsreihe an Hochstümpfen (Eigene Darstellung)



Abbildung 35: Baumansicht „Buchen-Hochstumpf“ (Eigene Darstellung)

Die Versuchsreihe zur Erfassung der Daten an den unbelaubten Ganzbäumen fand in einem lichten Buchenwald (Abbildung 36) im März 2020 statt. Der Buchenbestand befindet sich in kommunalem Besitz und wird durch das Forstamt Dieburg im Landesbetrieb Hessenforst betreut. Dieser Bestandsteil befindet sich im „Natura - 2000“-Raum und ist somit nach der „Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie“ geschützt. Die Buchen sind zwischen 136 Jahre und 157 Jahre alt. Der Bestand befindet sich auf einer Höhe von 325 m bis 340 m über dem Meeresspiegel und ist in Richtung

⁹ 1 Hektar entspricht einer Fläche von 10.000 m²

Westen-Nordwesten schwach geneigt. Der Wasser- und Nährstoffhaushalt ist frisch bis wechselfeucht mit mittlerer Basenversorgung. Die natürliche Waldgesellschaft wird als Flattergras-Buchenwald beschrieben. Laut der Forsteinrichtung aus dem Jahr 2009 besteht der Bestand aus mittlerem bis starkem Baumholz mit einzeln beigemischter Eiche und Lärche mit Buchen-Unterstand. Es handelt sich aktuell um einen Buchenbestand, welcher von 90 % Buchen einzeln beigemischten Lärchen und Eichen geprägt ist. Aufgrund der Trockenheit haben viele der Buchen erhebliche Trockenschäden und wegen des Rückgangs der Verjüngung wurden vereinzelt Douglasien in den Bestand eingebracht.



Abbildung 36: Luftaufnahme des Bestandes der Ganzbaum-Versuchsreihe (Eigene Darstellung)

Die Auswahl des Buchenbestandes fand aufgrund der zunehmenden Klimaveränderung und der Folgen in dem Zusammenhang mit dieser Baumart statt. Wie in Abbildung 37 verdeutlicht, sind die vorhandenen Trockenschäden in dem Kronenbereich der Buchen. Diese werden durch die Totäste ersichtlich und weisen auf einen idealen Bestand für den Einsatz von technischen Fällhilfen hin. Die entstehenden Trockenschäden am Stammverlauf werden in der Abbildung 38 aufgezeigt.



Abbildung 37: Krone eines Baumes der Ganzbaum-Versuchsreihe (Eigene Darstellung)



Abbildung 38: Trockenschäden am Stammverlauf der Ganzbaum-Versuchsreihe (Eigene Darstellung)

3.3.4 Berechnungsgrundlagen

3.3.4.1 Grundlagen der Lasermessung

Die Lasermessung zur Ermittlung der Hangrichtung des Stammverlaufs stellte den ersten Schritt der Datenaufnahme dar. Die gleichzeitige Bestandsbegutachtung diente der Erfassung von BHD-Werten der Versuchsbäume und der Erkennung von möglichen Gefahren. Ziel war es, die Fällrichtung jeden Baumes entgegen der natürlichen Hanglage zu legen und den Rückhangwinkel zu bestimmen. Durchgeführt wurde die Lasermessung mit einem Bautachymeter. Dieses Messmittel kann individuell für jede Art der Längen und Winkelvermessung im ein-, zwei- oder dreidimensionalen Raum angewandt werden. Die Vermessung erfolgt auf der Grundlage einer Entfernungsmessung und der Darstellung im dreidimensionalen Raum als Koordinatenpunkte. Die Fällrichtung fand auf der Grundlage einer fachlichen Einschätzung unter der Berücksichtigung waldbaulicher und verkehrsrechtlicher Aspekte statt.

Das Bautachymeter, dargestellt in Abbildung 39, wurde für eine optimale Vermessung in ausreichender Entfernung zum Baum in Fällrichtung platziert. Da die Lasermessungen der Versuchsbäume aufeinanderfolgend stattfanden, war eine Markierung des Standorts des Vermessungsgerätes erforderlich, um die Fällrichtung im späteren Versuchsablauf einzuhalten. Ein senkrecht stehender Fluchtstab neben dem Baum ermöglichte das Einmessen und das Setzen der Koordinaten des Bautachymeters. Die Vermessung erfolgte über das Anvisieren variabler Höhenpunkte innerhalb des Stammverlaufs, abhängig von der Stamm- und Astform. Abbildung 40 stellt anhand einer Skizze die Lasermessung zur exakten Bestimmung des

Rückhangs an den verschiedenen Höhenpunkten dar. Das Setzen einer „Bauachse“ sorgt dafür, dass die Koordinaten des Messgerätes genullt werden. Die Entfernungsmessung bis zum nächsten Punkt, in Kombination mit dem Winkel des Lasers, sorgt für die Messdatenerfassung. Während der Baumvermessung werden die Durchmesser der entsprechenden Stammabschnitte über die Erfassung der Koordinaten bestimmt. Die Werte der Durchmesser und der Höhenabschnitte bilden die Basisdaten der Volumenberechnung. Die Messpunkte entlang des Stammverlaufs bilden die Grundlagen der Schwerpunktermittlung. Jeder Messpunkt stellt dabei den Beginn und das Ende eines Kegelstumpfes dar.



Abbildung 39: Bautachymeter zur Ermittlung der Baumgeometrie (Eigene Darstellung)

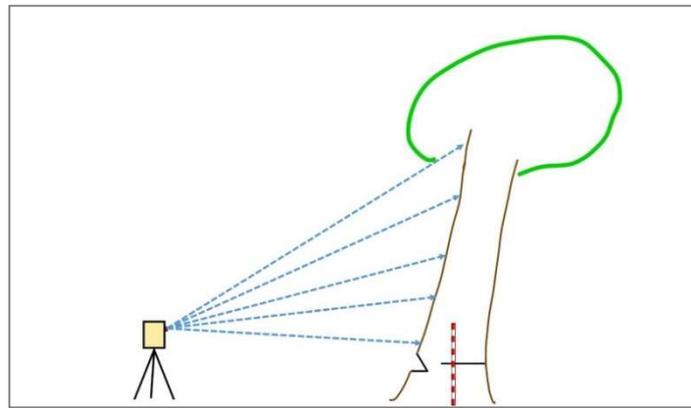


Abbildung 40: Skizze der Lasermesspunkte entlang der Stammwalze (Eigene Darstellung)

Die Lasermessungen wurden in der Mittelachse des Stammes auf der Stammoberfläche durchgeführt. Die Ermittlung des Durchmessers in entsprechender Stammhöhe wurde durch die Koordinaten beidseitig des Stammrandes ermöglicht.

Aufgrund der Verzweigung in der Krone ermöglichen die Lasermessungen keine Erfassung der Kronenbreite. Da diese Werte jedoch relevant für die Schwerpunktermittlung sind, erfolgt die Vermessung der Krone durch eine fotooptische Methode. Ein Fluchtstab (Abbildung 41), im rechten Winkel zur Fällrichtung, dient als Referenzmaß. Die Fotoaufnahmen wurden in einer Seitenansicht von 90° zur Fällrichtung erstellt. Zur genauen Ausrichtung der Kamera wurde bei den Einstellungen (vgl. Abbildung 42) die Option „Horizontale Ebene“ aktiviert. Diese Einstellung ermöglicht eine Fotoaufnahme in der Waagrechten. Die entstandene Bilddatei führt im weiteren Vorgehen zu einer Ermittlung des geometrischen Kronenmittelpunktes, Abbildung 43.



Abbildung 41: Fluchtstab mit Libelle (Eigene Darstellung)



Abbildung 42: Ganzbaum-Fotodokumentation (Eigene Darstellung)



Abbildung 43: Ganzbaum-Darstellung (Eigene Darstellung)

3.3.4.2 Grundlagen der Baumdarstellung

Aufgrund der Lasermessung war es nicht möglich, immer exakt in der Stammmitte zu messen. Gleichung 3 beschreibt die Herleitung von den Messwerten bis zu der Abweichung des Messpunktes bis zu dem Mittelpunkt. Abbildung 44 stellt die Berechnung für die Korrektur der Lasermessdaten dar. Die Y-Werte bezeichnen den Rückhang des Baumes. Die X-Werte, welche einen Seithang des Baumes beschreiben, sind für die Herleitung der Werte notwendig.

Der Mittelpunkt des Stammquerschnitts auf der X-Achse (X_n) ergibt sich aus den Randmessungen RMP_1 und RMP_2 . Y_n ist der Mittelpunkt des Stammquerschnittes auf der Y-Achse. Ziel ist es, den Mittelpunkt des Stammes (MP_s) anhand der beiden Lasermesspunkte (LMP) zu errechnen, welche den Stammdurchmesser in unterschiedlichen Höhen beschreiben. Dazu wurde der Wert für die Strecke Y_1 ermittelt. Mit Hilfe des „Satz des Pythagoras“ konnte die Strecke y_2 , woraus sich der gesuchte Wert ableitet, berechnet werden.

$$r = (M_2 - M_1)/2 \quad (3.1)$$

$$x_2 = r - L \quad (3.2)$$

$$x_1 = r - x_2 \quad (3.3)$$

$$y_2 = \sqrt{r^2 - x_1^2} \quad (3.4)$$

$$y_1 = r - y_2 \quad (3.5)$$

Gleichung 3: Korrektur der Lasermessdaten

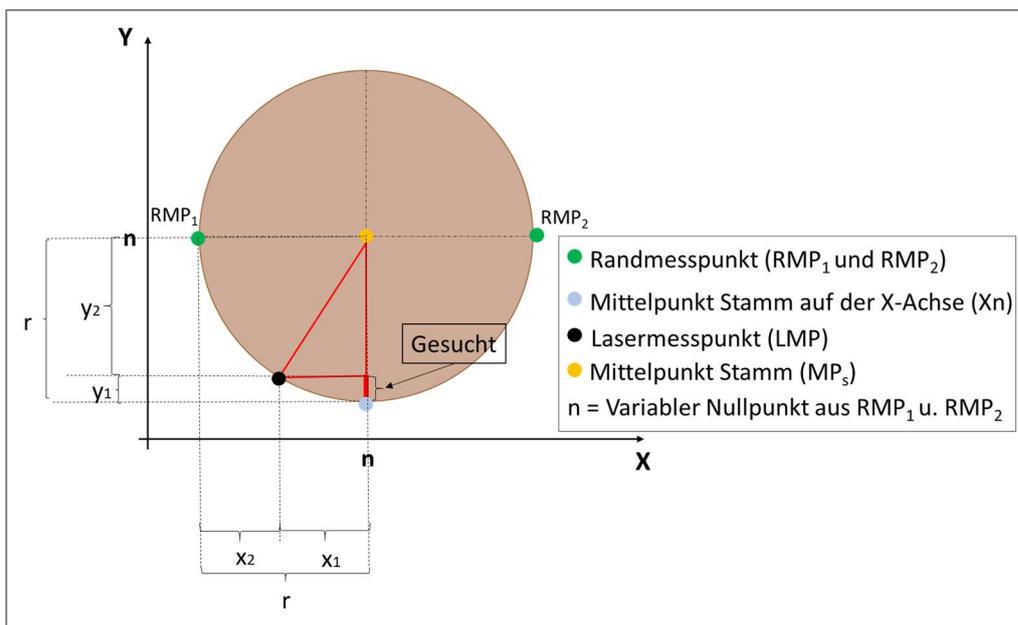


Abbildung 44: Skizze der Korrektur der Lasermessdaten hinsichtlich des Stammdurchmessers (Eigene Darstellung)

In Abbildung 45 wird, durch die Nutzung der Lasermessdaten, die Hangrichtung des Stammverlaufs in einem dreidimensionalen Raum verdeutlicht. Dies ermöglicht einen Überblick über die Hangrichtung des Baumes jedoch ohne den Kroneneinfluss, da dieser durch die fotoptische Vermessung noch hinzugefügt werden muss. Die Linie zwischen 1a und 1b stellt dabei die Hangrichtung dar, entgegengesetzt liegt die Fällrichtung des Stammes. Die b-Seite stellt einen Seithang nach rechts dar, a einen Seithang nach links.

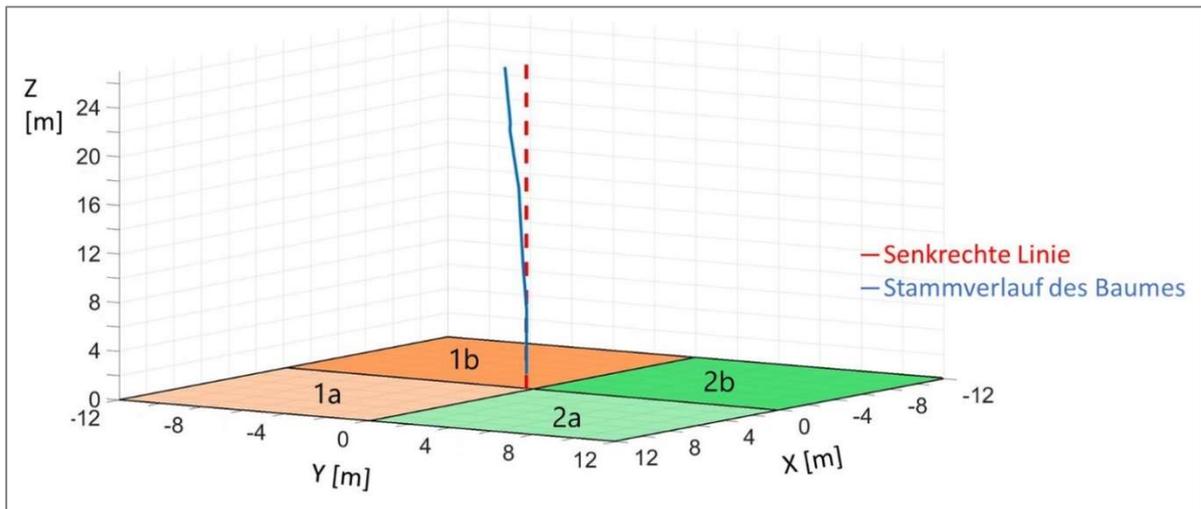


Abbildung 45: Darstellung der Hangrichtung des Stammverlaufs eines vermessenen Stammes (Eigene Darstellung)

Die Kronenform und der Kronenmittelpunkt wurden über die Fotodokumentation ermittelt. Dabei wurde der ausnivellierte Fluchtstab in dem Foto mittels erweiterter Linie in den Kronenbereich verlängert (Abbildung 46). Das Bildbearbeitungsprogramm „GIMP“ ermöglichte eine digitale Vermessung der Baumkrone (gelbe Linie) und die Kennzeichnung des daraus festgestellten geometrischen Mittelpunktes (Abbildung 47). Aus diesen beiden geometrischen Beschreibungen des Stammes und der Baumkrone wurde der Rückhang des Baumes und dessen Volumen bestimmt. Ein Faktor, welcher sich aus der Kronenbreite auf dem Foto und der tatsächlichen Kronenbreite des Baumes errechnet, ermöglicht die Anpassung des Bildrückhangs in die Realität.



Abbildung 46: Verlängerung der Fluchtstachse (Eigene Darstellung)

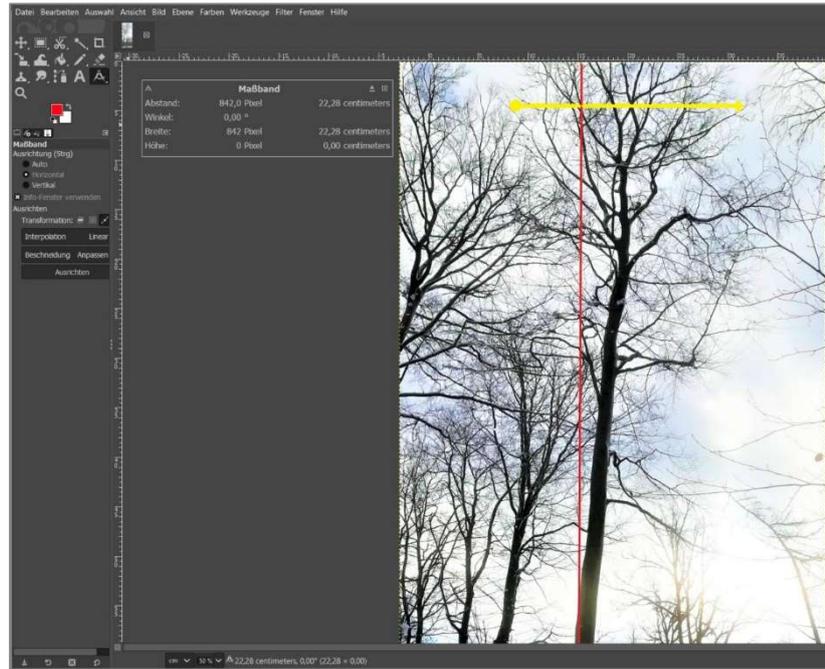


Abbildung 47: Bildbearbeitungsprogramm zur Kronenvermessung (Eigene Darstellung)

Die Erfassung der Basisdaten entstand somit auf der Grundlage zweier unterschiedlicher Erhebungen. Diese sind die Lasermessung und die fotooptische Vermessung des Kronenmittelpunktes. Die Lasermessung führte zu der Beschreibung des Stammverlaufs. Die fotooptischen Messwerte beschreiben die Geometrie des Kronenbereichs. Auf Grund der unterschiedlichen Messverfahren mussten zwei kartesische Koordinatensysteme definiert werden (Abbildung 48). Zur „automatisierten“ Berechnung wurde eine Funktion erstellt, welche einen Wechsel zwischen den Koordinatensystemen ermöglicht. Abbildung 49 verdeutlicht dabei die Darstellung der Koordinatensysteme im dreidimensionalen Raum. Die Lasermessung (in den Abbildungen blau dargestellt) erfolgte in einem Koordinatensystem, welches für die Schwerpunktberechnung unpassend ist, da sich der Ursprung auf der Stammoberfläche befindet. Sinnvoll für die Schwerpunktberechnung ist ein Koordinatensystem, das im Mittelpunkt des Baumes seinen Ursprung hat. Dieses ist bei der manuellen Kronenvermessung (in den Abbildungen rot dargestellt) der Fall. Durch den Fluchtstab in der Mittellinie des Stammes wird der Ursprung bei der Kronenvermessung in den Baummittelpunkt gelegt. Die Berechnung des Schwerpunkts und der Hubkraft hat den Ausgangspunkt ebenfalls im Mittelpunkt des Baumes.

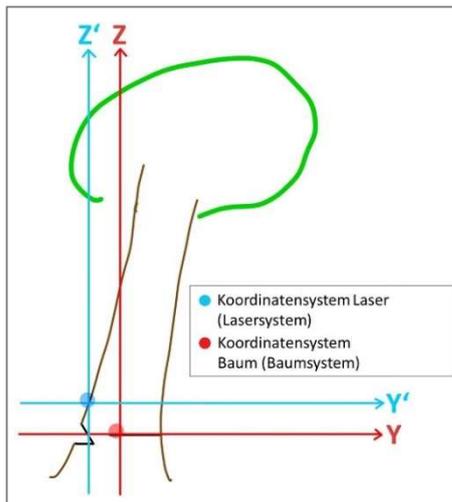


Abbildung 48: Skizze der Koordinatensysteme zweidimensional (Eigene Darstellung)

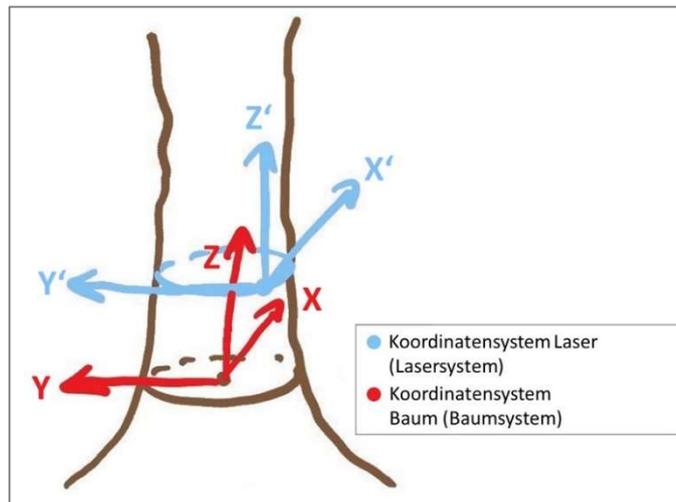


Abbildung 49: Skizze der Koordinatensysteme dreidimensional (Eigene Darstellung)

In Abbildung 50 wurden die Messwerte der Stammwalze und des Kronenbereiches zusammengefasst und ein resultierendes Modell erstellt, welches den realen Baum in guter Näherung als digitalen Zwilling abbildet. Dieses digitale Modell stellt die Grundlage für die folgende Berechnung der Schwerpunktlage des Ganzbaumes dar.

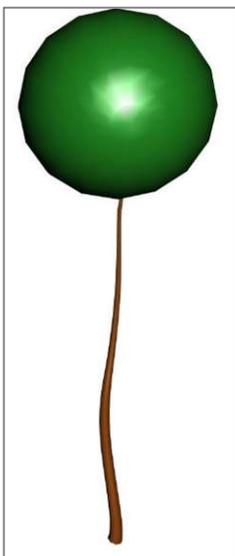


Abbildung 50: Modell eines vermessenen Baumes (Eigene Darstellung)

3.3.4.3 Grundlagen der Volumenberechnung

Die Schwerpunkt- und Hubkraftberechnungen erfolgten mit Hilfe der Statistik-Software „R-Studio“. Die Basisdaten, welche sich in Excel-Dokumenten befinden, werden in die Berechnungssoftware eingegeben und über Berechnungsfunktionen als Modell ausgegeben. Der Vorteil ist, dass die Berechnungen der geometrischen

Ausrichtung und der damit verbundenen Lage des Schwerpunktes nicht für jeden Baum einzeln berechnet werden müssen. Dies reduziert den Bearbeitungsaufwand und Fehleingaben.

Für die Gewichts- und Schwerpunktberechnung ist eine Volumenberechnung notwendig. Da bedingt durch die Holzfeuchte und Holzdichte, zwischen dem Kronen- und dem Stammbereich unterschieden werden muss, findet die Berechnung der Körper einzeln statt. Es wurden Annahmen definiert, dass die Krone aus einer Kugel besteht und der Stamm aus mehreren Kegelstümpfen. Aufgrund der Schwierigkeit der Bestimmung des Kronenvolumens wurde das Gesamtbaumvolumen in guter Näherung durch ein Schätzmodell der FAWF ermittelt. Die Berechnung des Stammvolumens erfolgte durch Aufteilung des Stammes in einzelne Kegelstümpfe und deren Volumenberechnung. Gleichung 4 beschreibt die Herleitung des Kegelstumpf-Volumens. Abbildung 51 verdeutlicht die Messpunkte und die einzelnen Abschnitte an einem Beispiel des Ganzbaumes. Jeder einzelne Abschnitt besitzt die Form eines Kegelstumpfes. Das Summieren der berechneten Volumen der Kegelstümpfe und das Volumen der Baumkrone bilden das Gesamtbaumvolumen. Der untere Teil, vom Boden bis zum Fällschnitt, darf allerdings nicht in die Schwerpunktberechnung mit aufgenommen werden, da dieser Teil des Baumes als Baumstumpf stehen bleibt. Die Einzelansicht des Kegelstumpfes ist in Abbildung 52 verdeutlicht.

$$V_{Kegelstumpf} = \frac{\pi * h}{12} (r_a^2 + r_a * r_b + r_b^2) \quad (4)$$

Gleichung 4: Berechnung des Kegelstumpf-Volumens

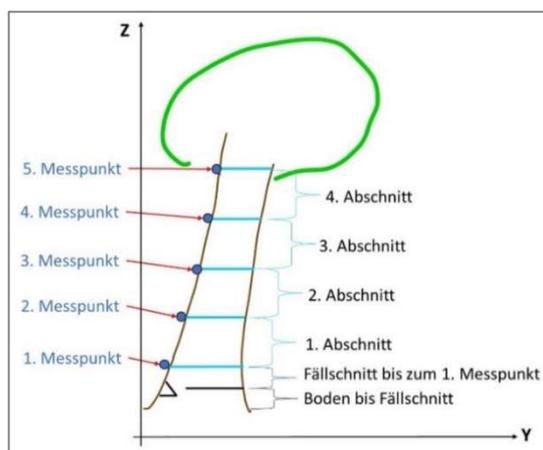


Abbildung 51: Gesamtdarstellung der Stammabschnitte (Eigene Darstellung)

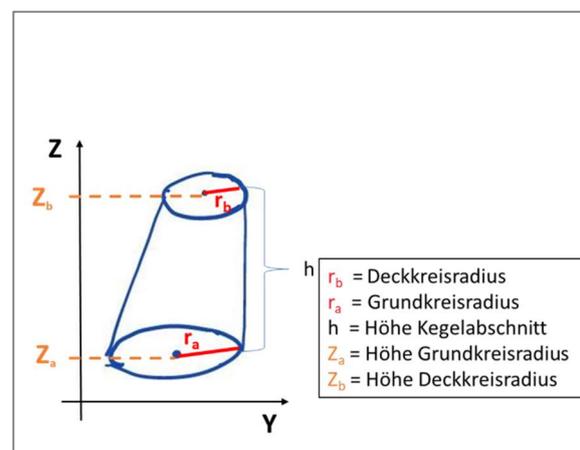


Abbildung 52: Einzelansichtsskizze eines Kegelstumpfes (Eigene Darstellung)

Es wurde die Annahme definiert, dass die Krone kugelförmig ist und somit Breite und Höhe identisch sind. Der Stamm kann allerdings in den Kronenraum ragen. Dies würde zu einer fehlerhaften Berechnung des Kronenvolumens führen, da in diesem Abschnittsbereich das Stammvolumen als Kronenvolumen definiert werden muss. Einer Annahme zufolge hat ein Baum mit einer Höhe von 30 m und 10 m Kronendurchmesser eine theoretische Stammlänge von 20 m. Da dies jedoch nur auf einer Annahme beruht und die tatsächliche Stammlänge auch länger sein kann, könnte es zu Messwerten kommen, welche in einer Höhe über der Stammlänge entstanden sind. Diese Werte verfälschen das Stammvolumen, wodurch es zu einem geringeren Kronenvolumen und einer veränderten Schwerpunktlage kommen kann. Das Vorgehen in diesem Fall wird in Abbildung 53 aufgezeigt. Der gekennzeichnete Kegelstumpf liegt auf der Grenze zwischen dem theoretischen Stamm- und Kronenbereich. Z_a definiert dabei den unteren Teil des Kegelstumpfes, welcher sich im Stammbereich befindet. Z_b beschreibt den oberen Teil des Kegelstumpfes, der zu dem Kronenbereich zählt. Zur Trennung dieser Bereiche wird die Variable Z' an dem Übergang zum Kronenbereich eingefügt. Diese Variable übernimmt die Funktion von Z_b als Deckradius des Kegelstumpfes. Abbildung 54 verdeutlicht das mathematische Vorgehen bei der Bereinigung der Werte grafisch. Dadurch konnte ein weiterführender Messwert erstellt werden, welcher eine annahmetreue Berechnung des Stammvolumens ermöglicht. Der Stamm wird dabei an dem Übergang in die Krone „abgeschnitten“. Dabei wurde der Schnitt parallel zum Boden durchgeführt.

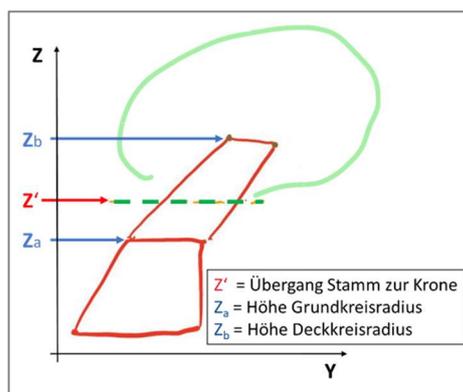


Abbildung 53: Skizze der Wertkorrektur im Stammverlauf (Eigene Darstellung)

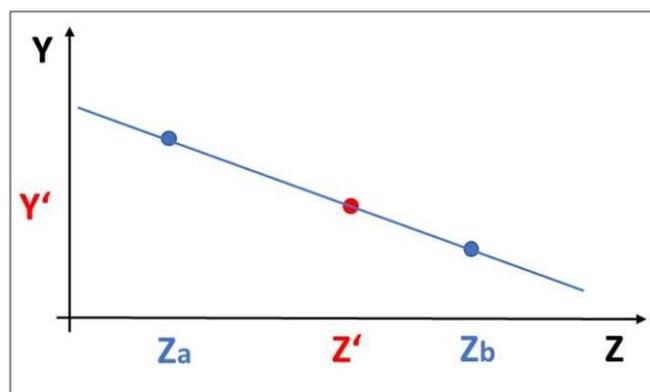


Abbildung 54: Grafische Darstellung des mathematischen Vorgehens der Wertkorrektur im Stammverlauf (Eigene Darstellung)

Die Differenz zwischen dem Gesamtvolumen und dem Stammvolumen ergab demnach das Kronenvolumen.

3.3.4.4 Grundlagen der Schwerpunktbestimmung

Nach der Ermittlung der geometrischen Daten, welche den Ganzbaum beschreiben, fand die Schwerpunktberechnung der Körper statt. Diese basiert auf den Grundlagen von Baumvolumen, Baumgeometrie und Holzdichte. Die Lage des resultierenden Stammschwerpunktes wurde aus mehreren Kegelstümpfen ermittelt. Der Kronenschwerpunkt ist der geometrische Mittelpunkt der Kugel, welcher mittels der beschriebenen fotooptischen Vermessung aufgezeichnet wurde. Es wurde die Annahme getroffen, dass die einzelnen Körper als homogen anzusehen sind. Ein homogener Körper besitzt seinen Schwerpunkt im geometrischen Mittelpunkt. Gleichung 5 beschreibt dabei die Herleitung des Schwerpunktes für den Kegelstumpf und Gleichung 6 die für eine Kugelform. Die allgemeine Formel für den Schwerpunkt eines Kegelstumpfs und einer Kugel lautet:

$$Z_s = \frac{h}{4} * \frac{r_a^2 + 2r_a * r_b + 3r_b^2}{r_a^2 + r_a * r_b + r_b^2} \quad (5.1)$$

$$x_s = 0 \quad (5.2)$$

$$y_s = 0 \quad (5.3)$$

Gleichung 5: Herleitung des Kegelstumpf-Schwerpunktes

Der Schwerpunkt einer Kugel liegt in ihrem Ursprung. Dadurch ergibt sich die folgende Formel:

$$Z_s = 0 \quad (6.1)$$

$$x_s = 0 \quad (6.2)$$

$$y_s = 0 \quad (6.3)$$

Gleichung 6: Herleitung des Kugel-Schwerpunktes

Die einzelnen Schwerpunkte, welche nun für den Stammverlauf definiert sind, lassen sich mittels Summenformel zusammenfassen. Daraus kann ein Gesamtschwerpunkt des Stammes, in Abbildung 55 dargestellt, gebildet werden. Gleichung 7 beschreibt die Herleitung des Gesamtschwerpunktes.

$$z_s = \frac{\sum \bar{z}_i \Delta m_i}{m} \quad (7.1)$$

$$x_s = \frac{\sum \bar{x}_i \Delta m_i}{m} \quad (7.2)$$

$$y_s = \frac{\sum \bar{y}_i \Delta m_i}{m} \quad (7.3)$$

Gleichung 7: Herleitung des Gesamtschwerpunktes

Eine Verrechnung des Stammschwerpunktes mit dem Kronenschwerpunkt führt zu einem resultierenden Gesamtschwerpunkt (SP_G) des Baumes (Abbildung 56).

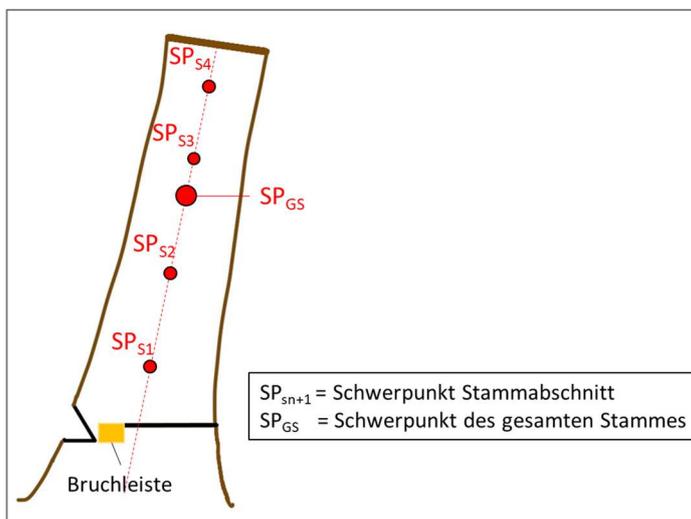


Abbildung 55: Skizze des resultierenden Schwerpunktes im Stamm (Eigene Darstellung)

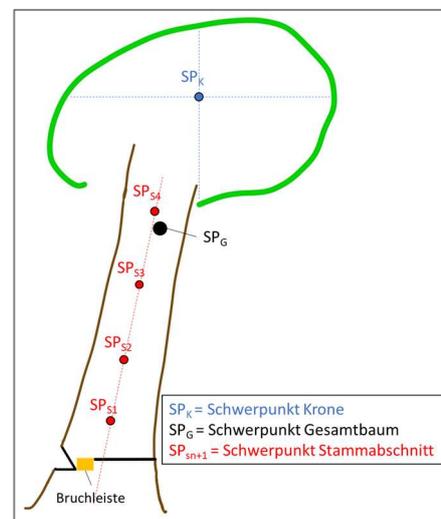


Abbildung 56: Skizze des resultierenden Gesamtschwerpunktes im Baum (Eigene Darstellung)

3.3.4.5 Herleitung des Rückhangs

Der berechnete Gesamtschwerpunkt ermöglicht die Ermittlung des Rückhangs im Schwerpunkt. Dieser ist definiert als Kraftstrecke zwischen dem Mittelpunkt am Stammfuß und der Schwerpunktlage in horizontaler Richtung (Abbildung 57). In Abbildung 58 wird der Rückhang als Draufsicht verdeutlicht. Durch die dreidimensionale Stammbeschreibung kann der Schwerpunkt in allen Raumrichtungen bestimmt werden.

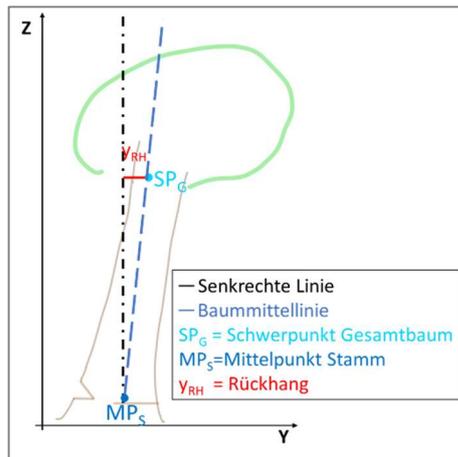


Abbildung 57: Skizze des Baumrückhangs (Eigene Darstellung)

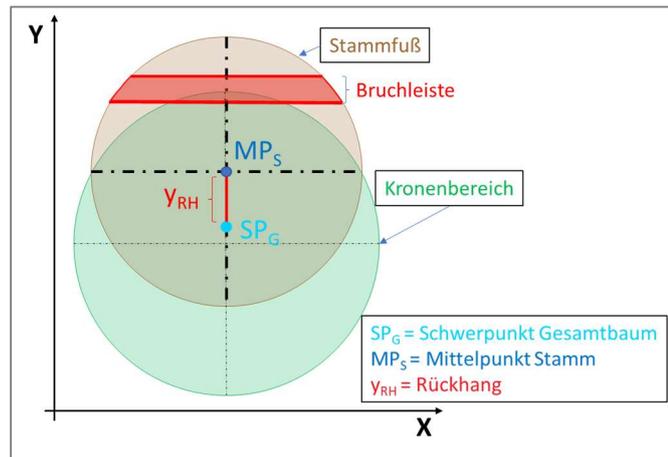


Abbildung 58: Skizze des Baumrückhangs (Draufsicht) (Eigene Darstellung)

3.3.4.6 Grundlagen der Hubkraftberechnung

Die Hubkraft, welche von der Fällhilfe aufzubringen ist, kann nun über die Berechnungsformel hergeleitet werden. Dazu werden das Eigengewicht des Baumes, der Rückhang im Schwerpunkt und die Geometrie des Fällschnittes benötigt. Die Geometrie des Fällschnittes entspricht laut Annahme den Abmessungen der Sicherheitsfälltechnik und steht somit im geometrischen Verhältnis zum BHD.

Die Masse des Baumes (m) wurde, wie in Gleichung 8 dargestellt, durch eine Verrechnung des Rohgewichts, des Wassergehalts und des Volumens ermittelt.

$$m = 1000 * V_{Baum} * \frac{\text{Wassergehalt}}{100} + \text{Rohgewicht} * V_{Baum} \quad (8)$$

Gleichung 8: Herleitung des Baumeigengewichtes

Abbildung 59 verdeutlicht die Kraftangriffspunkte am Stamm. Die Berechnung der Strecken erfolgt über trigonometrische Beziehungen der einzelnen Vektoren zueinander (Gleichung 9). Die Eigenmasse (m) wird mit der Gravitationskraft (g) multipliziert und ergibt die Gewichtskraft (F_{GB}). Diese liegt im Schwerpunkt (SP_G) des Baumes. Die Gewichtskraft in Kombination mit dem Hebelarm (y_{RH}), welche den Abstand des Schwerpunktes zum Drehpunkt beschreibt, ergibt ein Drehmoment (M), welches am Drehpunkt angreift.

$$M = y_{RH} * F_G \quad (9.1)$$

$$M = y_{RH} * m * g \quad (9.2)$$

Gleichung 9: Herleitung des Drehmoments am Drehpunkt des Baumes

Die Bruchleiste ist nach dem Ausarbeiten des Fällkerbs und des Fällschnittes die einzige Verbindung zwischen Stamm und Baumstumpf und dient als Drehlager. Abbildung 60 beschreibt die geometrischen Verhältnisse am Stammfuß und Gleichung 10 die rechnerische Herleitung der Hubkraft. Die benötigte Hubkraft (F_{Hub_G}) wird am Kraftangriffspunkt der Fällhilfe (AP) eingeleitet. Der zweite Hebelarm (y_{DV}) beschreibt die Strecke zwischen dem Mittelpunkt im Fällschnitt (MP_S) und der Mittellinie der Bruchleistenbreite. Diese definiert die neutrale Faser der Bruchleiste. Die gesamte Strecke y_{RH} und y_{DV} beschreibt dabei den gesamten Hebelarm ($y_{RH}+y_{DV}$). Die Kraftstrecke (y_{Hub}) zwischen dem Kraftangriffspunkt und der Mittellinie in der Bruchleiste definiert die Strecke zwischen der neutralen Faser und dem Kraftangriffspunkt.

$$F_{Hub_{SP}} = \frac{F_{GB} * h_g}{y_{Hub}} \quad (10)$$

Gleichung 10: Herleitung der Hubkraft zur Verlagerung des Schwerpunktes

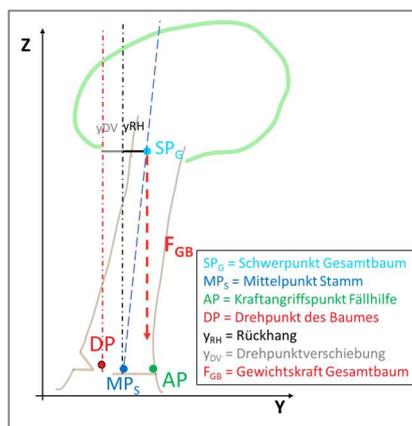


Abbildung 59: Skizze zur Hubkraftermittlung (Eigene Darstellung)

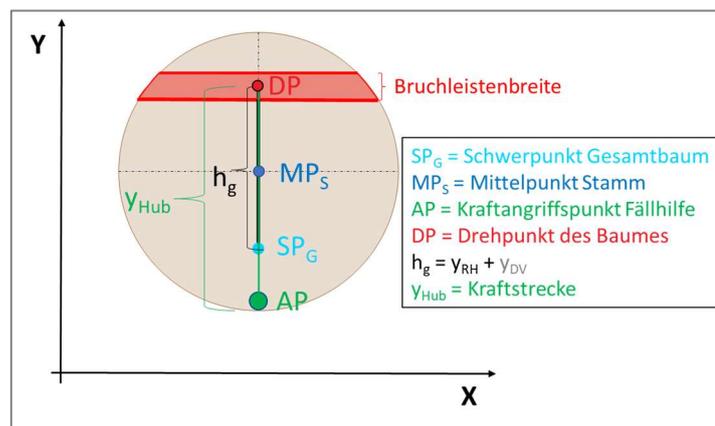


Abbildung 60: Skizze zur Hubkraftermittlung (Draufsicht) (Eigene Darstellung)

3.3.5 Grundlagen der Hubkraftmessung

Die Durchführung der praktischen Hubkraftmessung erfolgte unter der Anwendung von den in Kapitel 3.3.1 genannten Mess- und Hilfsmitteln. Die Hubkraft während der Baumfällung wurde durch einen Hydraulikzylinder mit einer manuellen Pumpe aufgebracht (Abbildung 61 und Abbildung 62). Der Einsatz dieses Systems bietet den Vorteil, dass die Hubkraft auf eine definierte Fläche sowie Abstand zum Drehlager auf den Baumstamm übertragen wird. Durch die Verwendung einer externen Handpumpe kann die Arbeitssicherheit durch das Verlassen des Gefahrenbereichs

erhöht werden. Der einfachwirkende Hubzylinder wird pro Pumpenhub um 3 mm ausgefahren. Die maximale Hubhöhe des Systems beträgt 100 mm. Die Auflageplatte auf dem Hubzylinder sorgt für eine großflächige Druckübertragung in den Baumstamm.



Abbildung 61: Hydraulikzylinder für die Hubkraftenerzeugung (Eigene Darstellung)



Abbildung 62: Handpumpe zum Ansteuern des Zylinders (Eigene Darstellung)

Das Hydrauliksystem kann mit einem maximalen Betriebsdruck von 700 bar belastet werden und ermöglicht das Anheben einer Last von maximal 294 kN, dies entspricht ca. 30 Tonnen. Eine in Reihe geschaltete Kraftmessdose ermöglicht das Aufzeichnen der exakten Hubkräfte, welche während der Fällung eines Baumes auftreten. Die verwendeten Messmittel werden in Abbildung 63 dargestellt. Die Kraftmessdose zeichnet die entstehende Kraft auf und kann mit bis zu 500 kN belastet werden. Ein Messverstärker, welcher über eine externe Stromquelle versorgt wird, sendet die aufbereiteten Messdaten an den Messlaptop. Dieser visualisiert die Messdaten und sichert sie zur weiteren Verwendung.

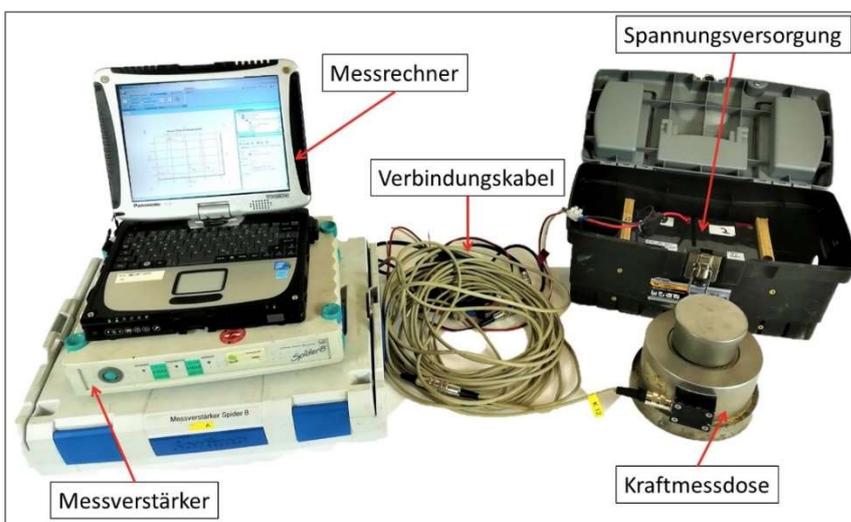


Abbildung 63: Verwendete Messmittel zur Bestimmung der Hubkraft bei der Fällung von Bäumen (Eigene Darstellung)

Abbildung 64 stellt das Verhältnis von der aufgezeichneten Hubkraft zu dem Systemdruck der Fällhilfe dar. Die Werte wurden durch einen Wertabgleich zwischen dem Druckmanometer des Hydrauliksystems und der Kraftmessdose ermittelt. Die Hubkraft ist von dem Betriebsdruck des Hydraulikzylinders abhängig. Durch die Erhöhung des Hydraulikdrucks steigt die gemessene Hubkraft linear an.

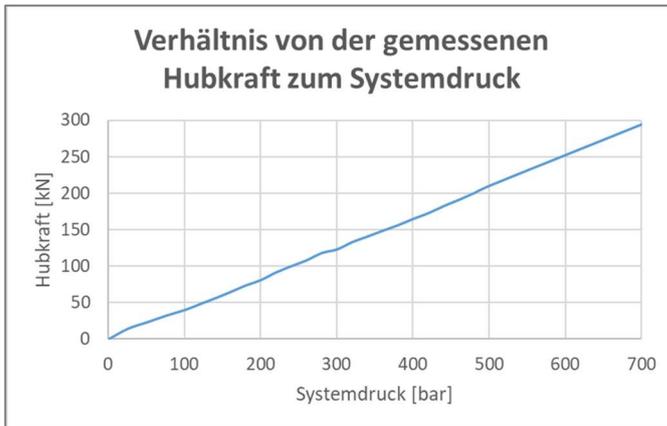


Abbildung 64: Verhältnis von der gemessenen Hubkraft zum Systemdruck (Eigene Darstellung)

Der Messmittelaufbau wurde in Anlehnung an die Versuche von Ruppert und Lippert (2019) durchgeführt.

Vor der Fällung wurde das Stammumfeld freigelegt und der Fallkerb in Fällrichtung angelegt. Die Anlage der Nische für den Hubzylinder und die Kraftmessdose erfolgte gegenüber des Fallkerbs (vgl. Abbildung 65). Die Kraftmessdose und der darauf platzierte Hubzylinder wurden eingesetzt und mit der Messeinheit verbunden (Abbildung 66).

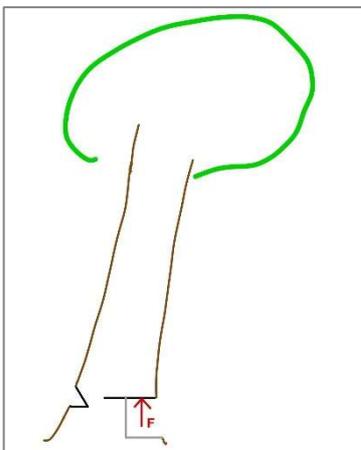


Abbildung 65: Skizze des Kraftangriffspunktes des Hubzylinders (Eigene Darstellung)



Abbildung 66: Vorbereitete Kraftmessdose und Hubzylinder (Eigene Darstellung)

Wenn der Messaufbau montiert ist, wird dieser mit einer Vorspannkraft beaufschlagt. Dies stellt sicher, dass der Baum sich durch die Sägearbeiten nicht weiter entgegengesetzt der Fällrichtung neigt. Durch das Ausbilden des Fällschnittes drückt die Gewichtskraft des Baumes auf den Hubzylinder und somit auf die Kraftmessdose. Die Durchführung des Fällschnittes erfolgte fachgerecht. Das „Umkeilen“ des Baumes wurde nach dem Betreten der Rückweiche in ausreichender Entfernung zum Stammfuß durchgeführt. Da die Hubkraft welche für die Fällung des Gesamtbaumes (F_{Hub_G}) senkrecht in den Baum eingeleitet wird und der Drehpunkt des Baumes in der Bruchleiste liegt, entsteht eine minimale seitliche Belastung auf die Messeinheit, welche sich nicht vermeiden lässt.

Nach der Fällung erfolgte die Dokumentation des Schnittbildes. Hierbei sind die Bruchleistenfläche sowie die Entfernung zu dem Kraftangriffspunkt der Fällhilfe bis zum Drehpunkt besonders relevant für die Berechnungen. Die Abbildung 67 stellt eine Schnittfläche mit eingesetztem Hubzylinder dar.

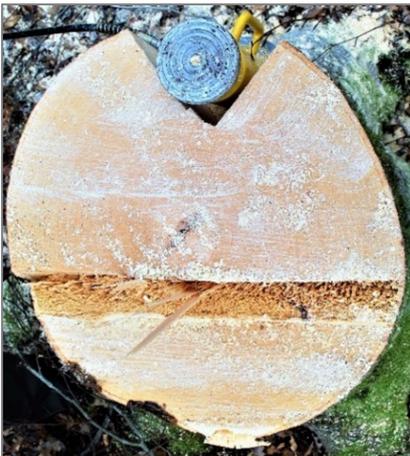


Abbildung 67: Abbild eines Stocks mit Hubzylinder nach dem Fällen (Eigene Darstellung)

Abbildung 68 verdeutlicht dabei die Messpunkte und relevanten Maße des Stockbildes.

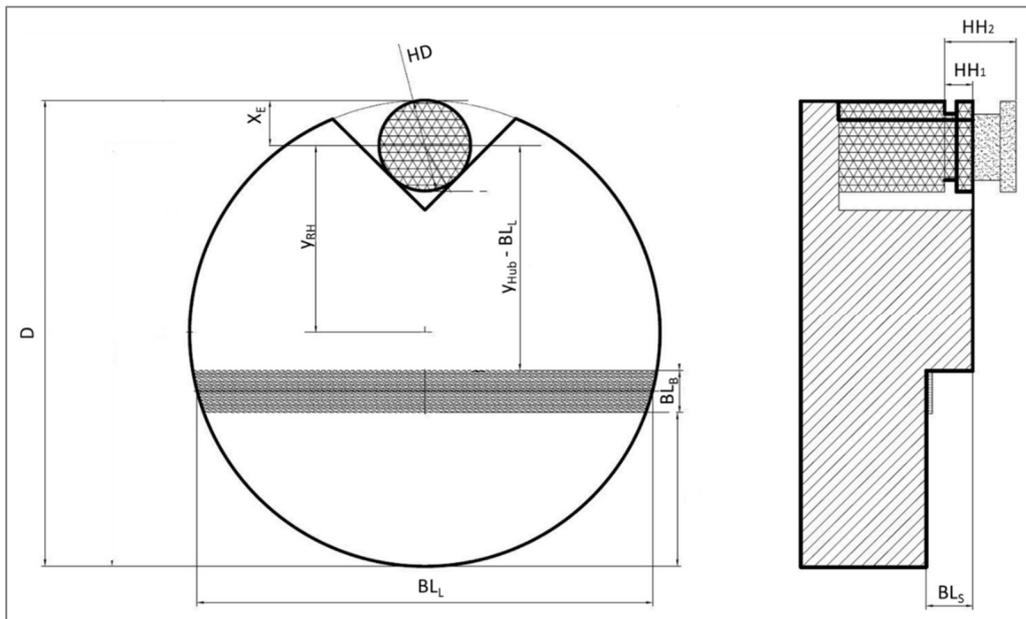


Abbildung 68: Zeichnung eines Stockbildes inkl. Hubzylinder (Eigene Darstellung)

Zur Zuordnung der Vermessungsdaten des Stockbildes dient die Tabelle 6. Dabei werden die Abkürzungen aus der technischen Zeichnung in der Abbildung 68 den passenden Definitionen zugeordnet.

Tabelle 6: Beschreibung der Strecken aus Abbildung 68 (Eigene Darstellung)

Bezeichnung	Definition
D	Durchmesser
x_E	Einschubtiefe
BL_L	Bruchleistenlänge
BL_B	Bruchleistenbreite
BL_S	Bruchstufenhöhe
$y_{Hub} - BL_L$	Druckpunkt bis Bruchleiste

Bezeichnung	Definition
y_{RH}	Druckpunkt bis Baummittelpunkt
HD	Hubzylinderdurchmesser
HH1	Hubhöhe Start
HH2	Hubhöhe nach Fällung

3.4 Berechnung und Abgleich mit Messwerten

3.4.1 Hubkraft für die Verlagerung des Massepunktes

3.4.1.1 Versuchsaufbau

Die benötigte Kraft für eine Schwerpunktverlagerung wird durch eine Baumsimulation verdeutlicht. Ein Fichtenbalken stellt den Körper dar, dessen Kippbewegung durch ein Scharnier ermöglicht wird. Der Aufbau des Messstandes, in Abbildung 69 dargestellt, ermöglicht eine optionale Anpassung des Kraftangriffspunktes, wodurch unterschiedliche Situationen nachgebildet werden können. Der Kraftangriffspunkt ist der Hebelarm

an unterschiedlichen Entfernungen zum Scharnier des „Baumes“. Dadurch konnte die Hubkraft, welche zur Überwindung des Rückhangs bzw. der Schwerpunktlage des Stammes benötigt wird, ohne Einfluss der Kronenform und der Bruchleistenbreite bestimmt werden. Die Variablen der simulierten Baumfällung sind die Lage des Schwerpunktes (Rückhang) und die Hebellänge. Durch die Hebellänge kann der Kraftangriffspunkt der Fällhilfe nachgestellt werden.

Das Ziel des Versuchsaufbaus bestand darin, die Grundlagen der Hubkraftberechnung mit einer realen Messung zu vergleichen. Dieser Vergleich ist notwendig, um die Berechnung zu prüfen.

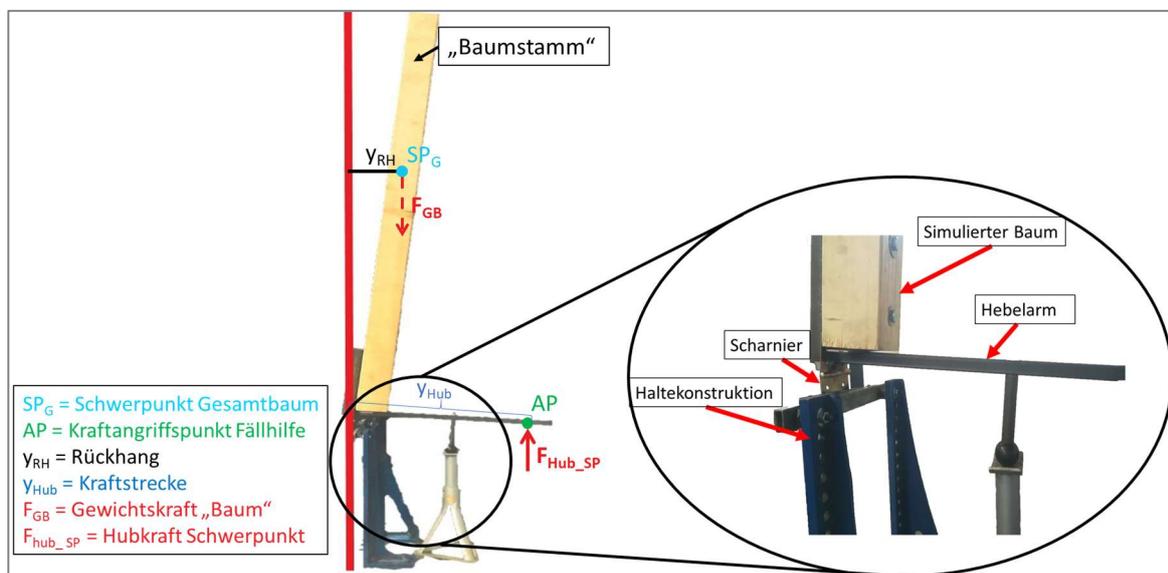


Abbildung 69: Versuchsaufbau zur Schwerpunktvorlagerung (Eigene Darstellung)

3.4.1.1 Berechnung der benötigten Hubkraft

Die Schwerpunktlage des Balkens wird durch eine geometrische Berechnung ermittelt. Durch die Eigengewichtskraft und der Strecke (y_{Hub}) zwischen der Schwerpunktlage und dem Drehpunkt lässt sich das Drehmoment (M) bestimmen. Die Hebellänge beeinflusst den Kraftaufwand. Eine Division des Drehmoments durch die Hebellänge ermöglicht, wie in Gleichung 11 aufgezeigt, die Berechnung der Hubkraft am Kraftangriffspunkt.

$$Hubkraft_{Schwerpunkt} = \frac{Eigengewichtskraft * Rückhang}{Kraftstrecke} \quad (11.1)$$

$$F_{Hub_SP} = \frac{F_{GB} * y_{RH}}{y_{Hub}} \quad (11.2)$$

Gleichung 11: Berechnung der benötigten Hubkraft zur Vorlagerung des Schwerpunktes

In Abbildung 70 wird die Abhängigkeit der benötigten Kraft ($F_{\text{Hub_SP}}$) zum Rückhang (y_{RH}) deutlich. Die Hebellänge (y_{Hub}) ist dabei ein entscheidender Faktor für die Kraft. Je geringer die Hebellänge, desto höher ist der Kraftaufwand in Abhängigkeit des Rückhangs. Das Bestimmtheitsmaß (R^2), welches die Streuung der Daten beschreibt, liegt bei 1. Dies ist dadurch erklärbar, dass die Hubkraft auf der Grundlage des Rückhangs und der Hebellänge berechnet wurde. Bei einer Hebellänge von 0,1 m steigt die berechnete Kraft um 97,5 N pro weitere 10 cm Rückhang. Bei einer Hebellänge von 0,6 m sind es 16 N pro weitere 10 cm. Eine Hebellänge von 0,5 m benötigt somit die 5-fache Kraft der Hebellänge von 0,1 m.

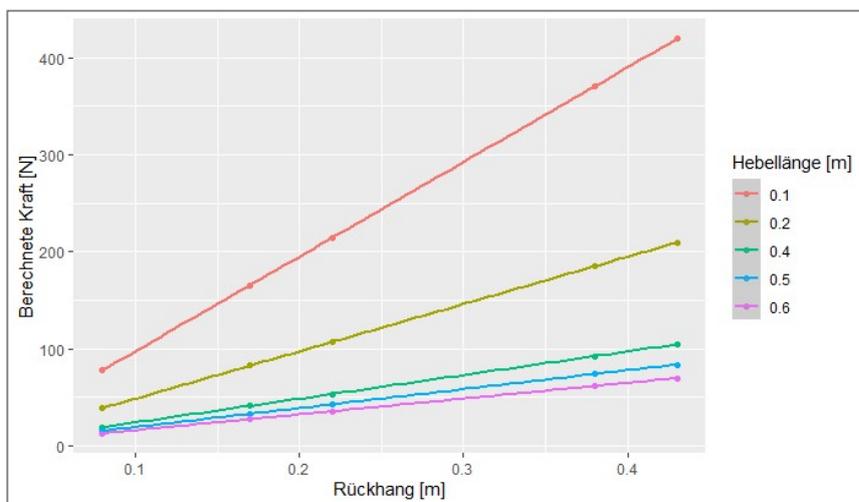


Abbildung 70: Berechnete Kraft in Abhängigkeit vom Rückhang (Eigene Darstellung)

Die Abbildung 71 verdeutlicht den Einfluss der Hebellänge, unterteilt in den Rückhang, auf die gemessene Hubkraft der Versuchsreihe. Das Diagramm zeigt, dass die berechnete Kraft mit reduzierter Hebellänge ansteigt.

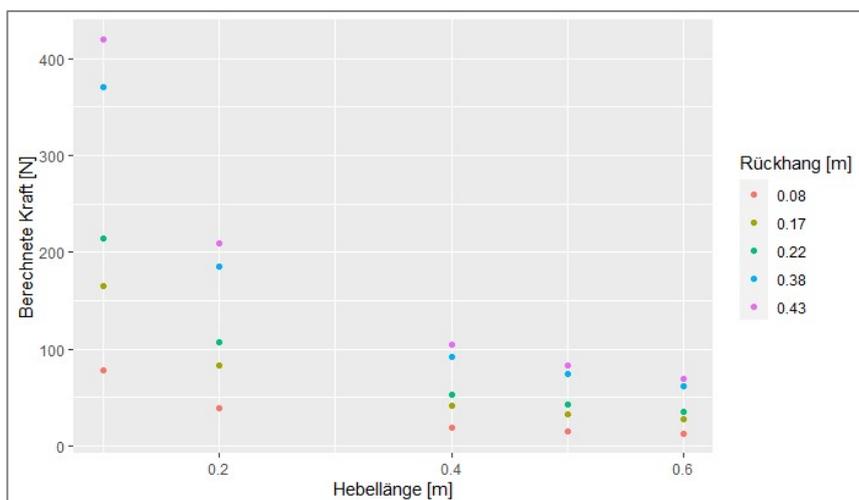


Abbildung 71: Berechnete Kraft in Abhängigkeit von der Hebellänge (Eigene Darstellung)

3.4.1.2 Messung der benötigten Hubkraft

Ein Anheben des Hebelarms in entsprechendem Abstand zum Drehpunkt ermöglicht die Durchführung eines Versuches, welcher eine reale Baumfällung nachstellen soll. Die Messung der Hubkraft erfolgte, aufgrund der Reproduzierbarkeit, an einer Prüfmaschine. Die benötigten Werte der Hebelarmlänge, Schwerpunktlage, Hubkraft und Hubhöhe wurden notiert und die Messwerte mit den Berechnungen abgeglichen.

Der Kraftverlauf während der Baumsimulation in Abbildung 72 verdeutlicht das Verhältnis zwischen Hubkraft und der benötigten Strecke. Die Messung der benötigten Kräfte bestand aus 25 einzelnen Versuchen. Sobald sich der Körper bewegt, wurde die maximale Hubkraft erreicht. Anhand der Aufzeichnungen des Hubwegs wird deutlich, dass für diese Hubkraft, welche den Körper in Bewegung setzt, eine Strecke zurückgelegt wird. Der Baum oder das Modell wird durch die aufgewendete Kraft leicht gestaucht und geht bei zurückgehender Krafteinwirkung elastisch in die Ausgangsposition zurück.

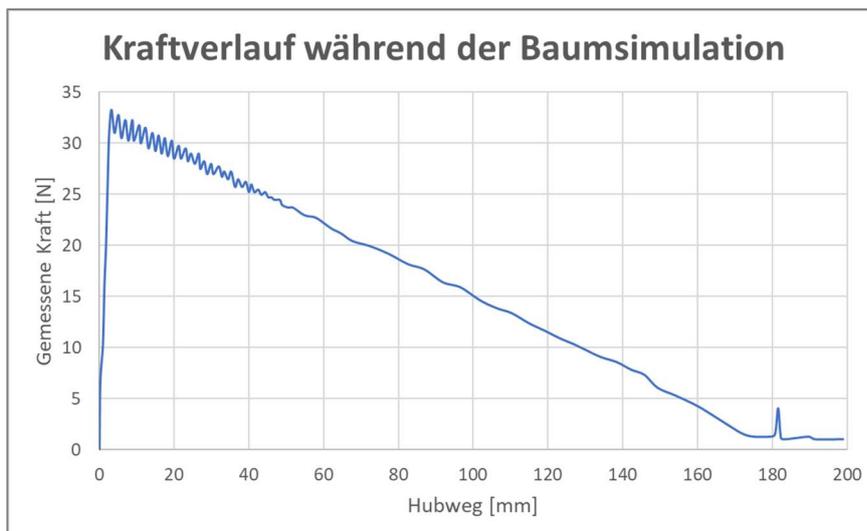


Abbildung 72: Kraftverlauf während der Schwerpunktverlagerung (Eigene Darstellung)

Die Abbildung 73 zeigt die gemessene Kraft in Abhängigkeit zur Hebellänge unter Berücksichtigung des Rückhangs. Dabei wird deutlich, dass die Kraft mit einem längeren Hebelarm abnimmt und dass bei einem geringeren Rückhang eine geringere Kraft benötigt wird.

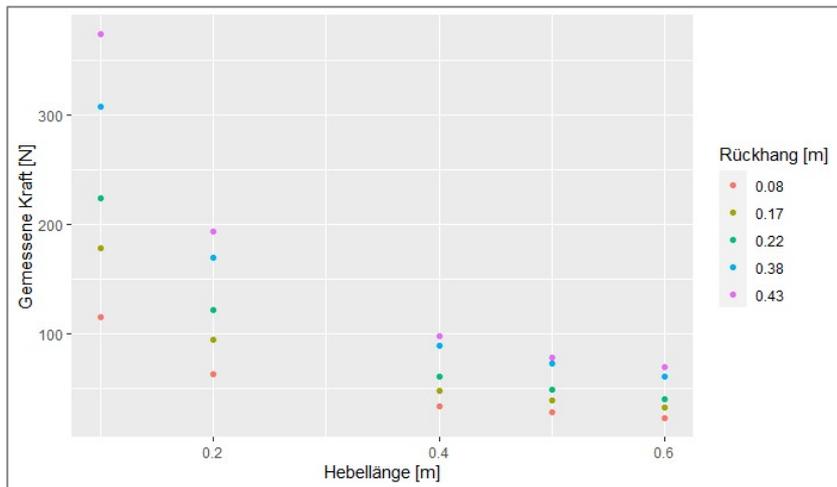


Abbildung 73: Gemessene Kraft in Abhängigkeit von der Hebellänge (Eigene Darstellung)

Abbildung 74 stellt die Abhängigkeit der gemessenen Kraft vom Rückhang, unterteilt in die Hebellängen, dar. Hierbei steigt die gemessene Kraft pro 10 cm Rückhang bei einem Hebelarm von 0,1 m um 70 N. Bei einem Hebelarm von 0,6 m ist eine Steigung von 13 N pro 10 cm Rückhang erkennbar. Es besteht kein Verhältnis zwischen den unterschiedlichen Hebellängen bei der Abhängigkeit der gemessenen Kraft zum Rückhang. Bei einer Rückhangsteigerung von 0,1 m auf 0,6 m wird die gemessene Kraft um das 5-fache erhöht. Diese Fehlerwerte lassen sich durch die manuellen Messungen in Kombination mit der Konstruktion erklären. Das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt bei einem Wert von 98 % bis 99 %. Dies besagt, dass die Streuung der Daten durch die lineare Gleichung gut abgebildet wird. Dabei wird deutlich, dass das R^2 bei den höheren Hebellängen etwas höher liegt. Der dunkelgraue Bereich (Konfidenzbereich) beschreibt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % die wahre Lage der Geraden.

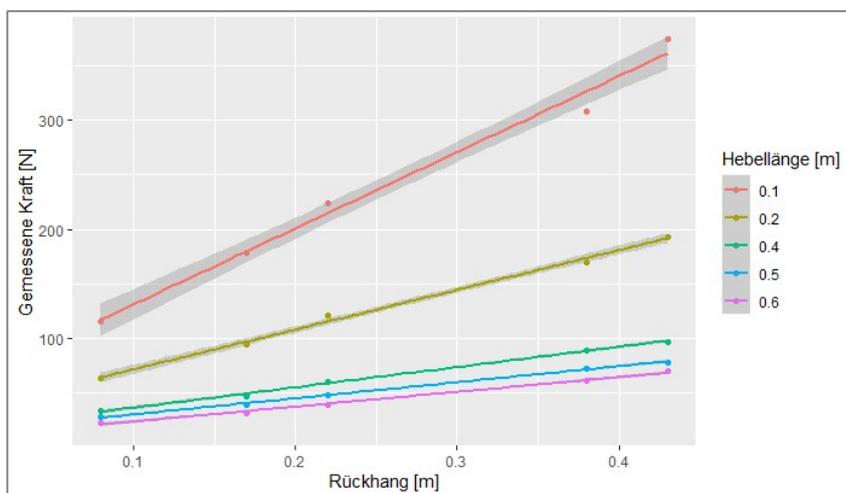


Abbildung 74: Gemessene Kraft in Abhängigkeit vom Rückhang (Eigene Darstellung)

3.4.1.3 Analyse der gemessenen und berechneten Werte

Die Berechnungsgrundlage konnte durch die Simulationsversuchsreihe geprüft werden. Die Übereinstimmung von der Berechnung zum gemessenen Wert liegt bei 93 %.

Die Auswertung der gemessenen und berechneten Kraft erfolgte durch eine Gegenüberstellung beider Werte. Die gemessene Kraft in Abhängigkeit der berechneten Kraft erzeugt einen Faktor, welcher das Verhältnis beider Werte wiedergibt. Die in Abbildung 75 dargestellte Gerade besitzt eine Steigung von 93 %. Dies deutet darauf hin, dass eine berechnete Kraft von 200 N einer gemessenen Kraft in Höhe von 186 N entspricht. Das Bestimmtheitsmaß (R^2), welches beschreibt wie sehr die Varianz der Daten durch das verwendete lineare Modell erklärt werden kann, liegt bei 98 %. Dies deutet darauf hin, dass dieses Modell für die Darstellung geeignet ist. Abweichende Messpunkte von der Geraden entstanden aufgrund von Messabweichungen durch die Kraftmessung. Die Berechnung kann ebenfalls auf Grund der inhomogenen Gewichtsverteilung der Simulation Differenzen aufweisen.

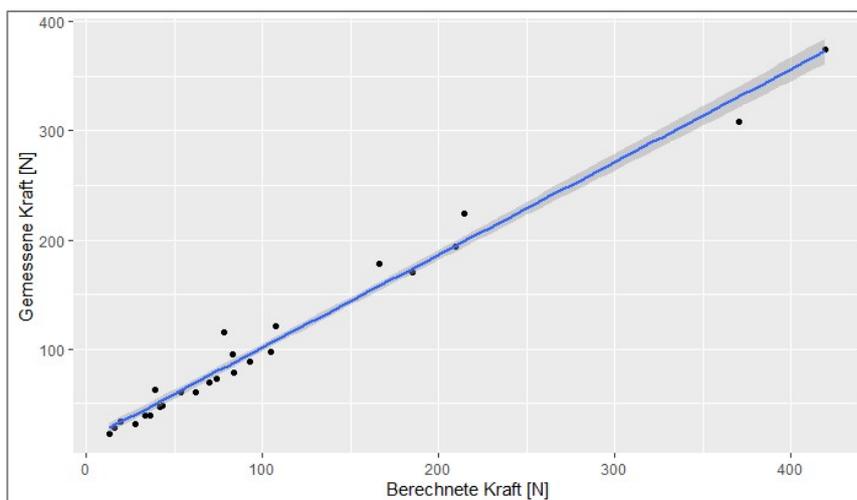


Abbildung 75: Verhältnis von gemessener zu berechneter Kraft hinsichtlich der Schwerpunktverlagerung (Eigene Darstellung)

Abbildung 76 verdeutlicht das Verhältnis von gemessener zu berechneter Kraft unter Einfluss der Hebellänge. Je größer die Hebellänge, desto näher liegen die Werte beieinander. Eine Hebellänge von 0,1 m besitzt eine Steigung von 71 %. Dies bedeutet, pro N berechnete Kraft steigt die gemessene Kraft um weitere 0,71 N. Bei einer Hebellänge von 0,6 m liegt die Steigung bei 83 %. Dabei steigt die gemessene Kraft um 0,83 N pro weitere N berechnete Kraft. Diese Differenzen der Steigung sind durch die Hebellängen und die Messfehler der gemessenen Kraft erklärbar. Das

Bestimmtheitsmaß R^2 liegt im Bereich von 98 % bis 99 %. Die Streuwerte können durch das lineare Modell gut erklärt werden.

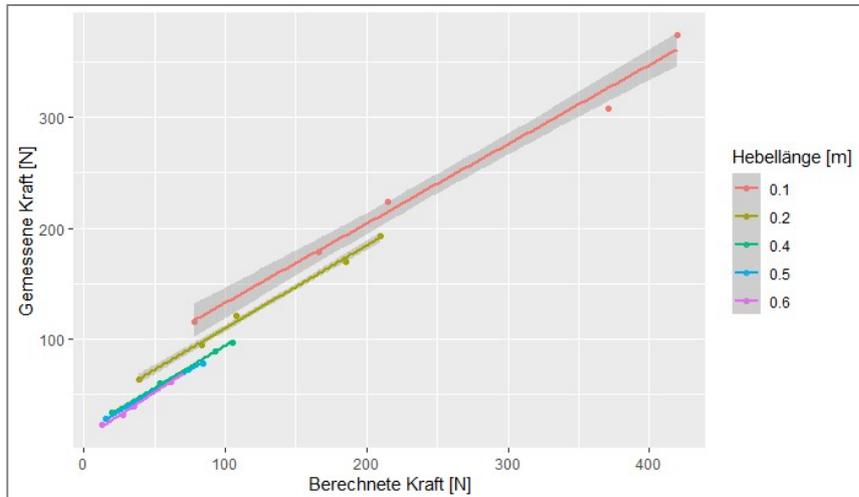


Abbildung 76: Verhältnis von gemessener zu berechneter Kraft unter Einfluss der Hebellänge (Eigene Darstellung)

In Abbildung 77 wird das Verhältnis von gemessener zu berechneter Kraft unter dem Einfluss des Rückhangs dargestellt. Die Gerade welche den Rückhang in Höhe von 8 cm darstellt, besitzt eine Steigung von 150 %. Das bedeutet, dass die Erhöhung der berechneten Kraft um ein N, eine Steigerung der gemessenen Kraft in Höhe von 1,5 N zur Folge hat. Die Steigung des Rückhangs bei 38 cm liegt bei 86 %. Während sich die berechnete Kraft um ein N erhöht, steigt die gemessene Kraft um 0,86 N.

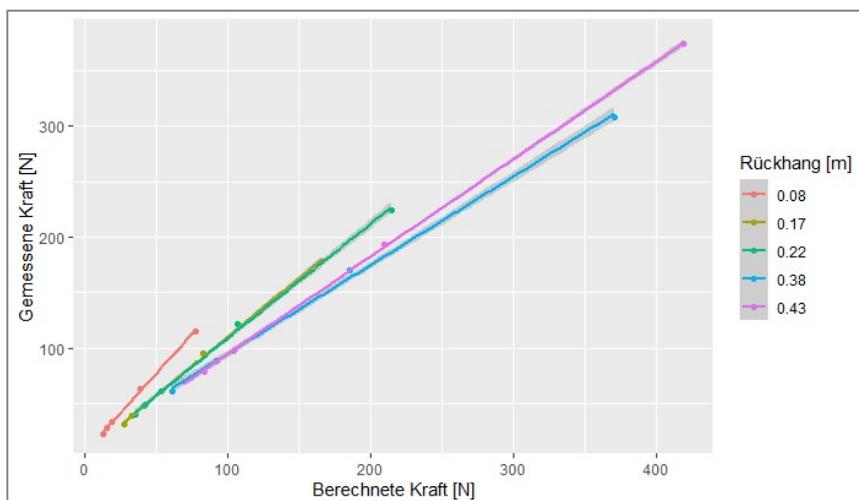


Abbildung 77: Verhältnis von gemessener zu berechneter Kraft unter Einfluss des Rückhangs (Eigene Darstellung)

Die einzelnen Faktoren der gemessenen und berechneten Hubkraft werden in Tabelle 7 verdeutlicht. Dabei wird erkennbar, dass der Rückhang und die Hebellänge nicht im gleichen Verhältnis die Hubkraft beeinflussen.

Tabelle 7: Faktoren aus der Baumsimulations-Versuchsreihe (Eigene Darstellung)

Nr.	G.K [N]	B.K [N]	y_{RH} [m]	Hebellänge [m]
1	116	78	0,08	0,1
2	374	420	0,43	0,1
3	225	215	0,22	0,1
4	308	371	0,38	0,1
5	178	166	0,17	0,1
6	63	39	0,08	0,2
7	194	210	0,43	0,2
8	121	107	0,22	0,2
9	170	185	0,38	0,2
10	95	83	0,17	0,2
11	33	20	0,08	0,4
12	97	105	0,43	0,4
13	61	54	0,22	0,4

Nr.	G.HK [N]	B.HK [N]	y_{RH} [m]	Hebellänge [m]
14	89	93	0,38	0,4
15	48	42	0,17	0,4
16	28	16	0,08	0,5
17	78	84	0,43	0,5
18	49	43	0,22	0,5
19	73	74	0,38	0,5
20	39	33	0,17	0,5
21	23	13	0,08	0,6
22	70	70	0,43	0,6
23	40	36	0,22	0,6
24	61	62	0,38	0,6
25	32	28	0,17	0,6

G.K. = gemessene Kraft

B.K. = berechnete Kraft

y_{RH} . = Rückhang im Schwerpunkt

3.4.2 Spannungen in der Bruchleiste

3.4.2.1 Versuchsaufbau

Die Spannungen in der Bruchleiste wurden durch eine Versuchsreihe mittels Messungen an Hochstümpfen ermittelt. Diese fand an 8 Baumstümpfen mit unterschiedlichen Höhen statt. Durch das Fehlen der Baumkrone kann deren Einfluss auf die Messung der Bruchleistenspannung und die damit verbundene Hubkraft vernachlässigt werden. In Abbildung 78 wird die durch die Hubkraft entstehende Biegespannung in der Bruchleiste dargestellt. Diese Versuchsreihe dient dazu, die Hubkraft (F_{Hub_BL}) zum Brechen der Bruchleiste zu bestimmen und die entstehenden Spannungen mit berechneten Werten abzugleichen.

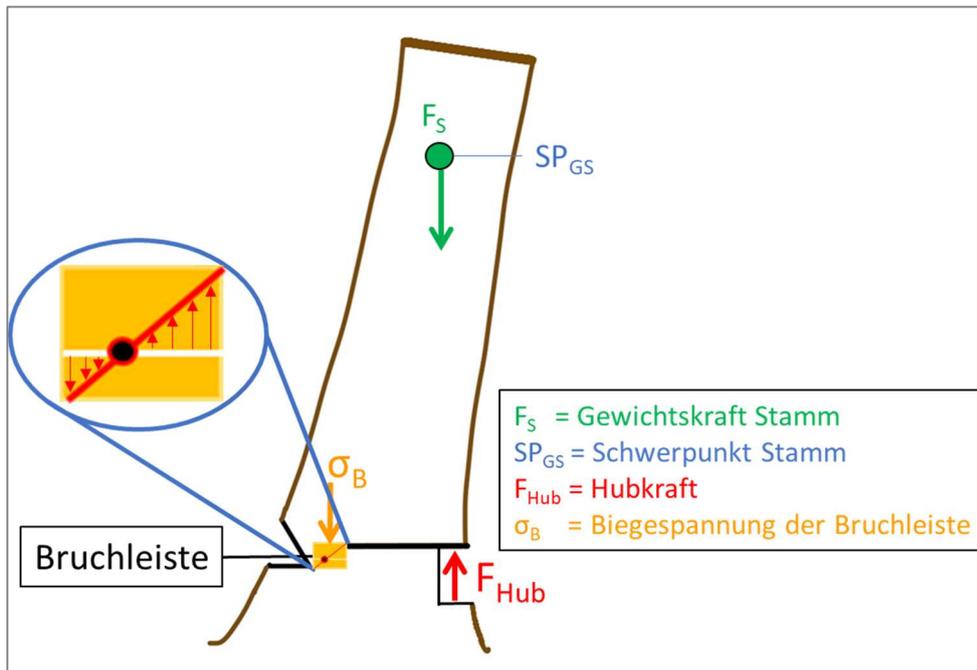


Abbildung 78: Freischnitt der Kräfte und Spannungen in der Bruchleiste (Eigene Darstellung)

3.4.2.2 Simulation und Berechnung der Spannungen

Das Ziel der Fällung ist es, den Schwerpunkt des Baumes über seinen Kippunkt zu bringen. Die Bruchleiste dient dazu, dem Baum während der Fällung eine Führung zu geben. Durch den Keilvorgang bei der Fällung wird der Baum am Kraftangriffspunkt angehoben, dies führt zu einer Belastung der Bruchleiste. Bei einem großen Rückhang muss eine entsprechend hohe Hubhöhe erbracht werden, um den Baum über den Kippunkt zu heben. Diese sorgt dafür, dass die Bruchleiste geschwächt wird. Je stärker die Schwächung durch eine steigende Hubhöhe voranschreitet, desto größer ist die Gefahr, dass die Bruchleiste des Baumes versagt, bevor der Kippunkt erreicht wird. Dies führt zu einem Fall des Baumes entgegen der gewünschten Fällrichtung. Die benötigte Hubhöhe, welche zu einem Versagen der Bruchleiste führt, ist abhängig von der Kraftstrecke (y_{Hub}), der Bruchleistenbreite (BL_B) und dem Kippunkt des Baumes (KP). Abbildung 79 zeigt dieses auf. Die Spannungen in der Bruchleiste teilen sich in Druck- und Zugspannung auf. Je höher der Baum angehoben werden muss, umso stärker wird die Bruchleiste überwiegend auf der Zugseite belastet. Daraufhin beginnen einzelne Holzfasern auf der Zugseite zu versagen. Dadurch verteilt sich die Belastung auf eine geringer werdende Anzahl an Holzfasern. Diese werden im weiteren Verlauf der Hubhöhenentwicklung einer steigenden Belastung ausgesetzt. Sobald diese die maximale Biegespannung des Holzes überschreitet, kommt es zu einem Versagen der Bruchleiste.

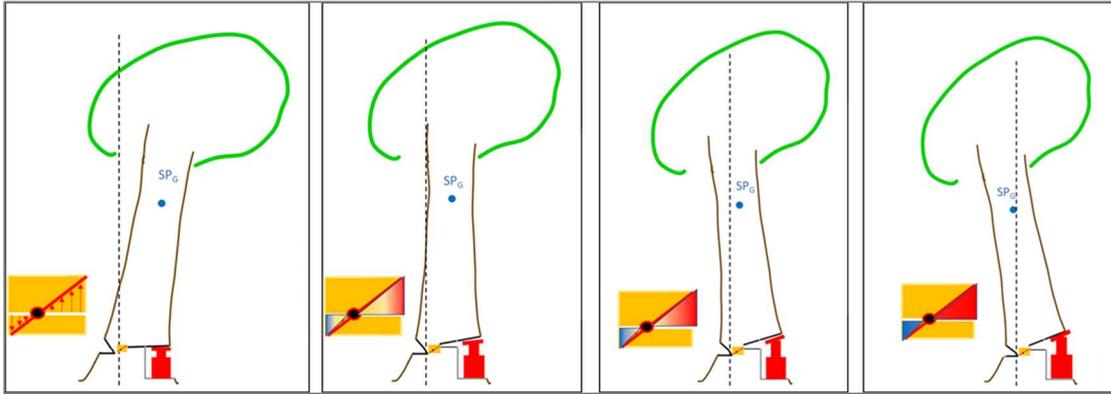


Abbildung 79: Darstellung der Beanspruchung der Bruchleiste (Eigene Darstellung)

Die maximale Biegespannung beschreibt eine Kraft, mit der ein Körper bis zum Versagen beansprucht werden kann.

Die Simulation der Biegespannung der Bruchleiste wurde über ein CAD-Programm durchgeführt. Abbildung 80 zeigt dabei ein Modell eines Baumstammes, welches zur Simulation der Spannungen in der Bruchleiste dient. Es ist zu erkennen, dass sich die neutrale Faser in der Mitte der Bruchleiste ausbildet. Diese beschreibt den Punkt der Bruchleiste, welcher weder auf Zug noch auf Druck belastet wird. Die, bei der Fällung entstehenden Spannungen in der Bruchleiste werden in Abbildung 81 verdeutlicht. Es ist zu erkennen, dass in verschiedenen Bereichen der Bruchleiste unterschiedlich hohe Belastungen auftreten. Hierbei liegen die höchsten Spannungswerte an der Zugseite der Bruchleiste vor.

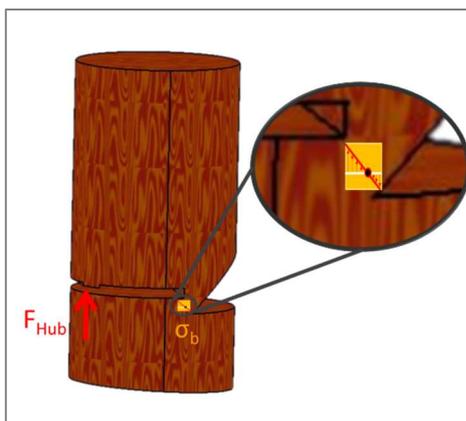


Abbildung 80: Simulation Biegespannung (Lippert, 2020b)

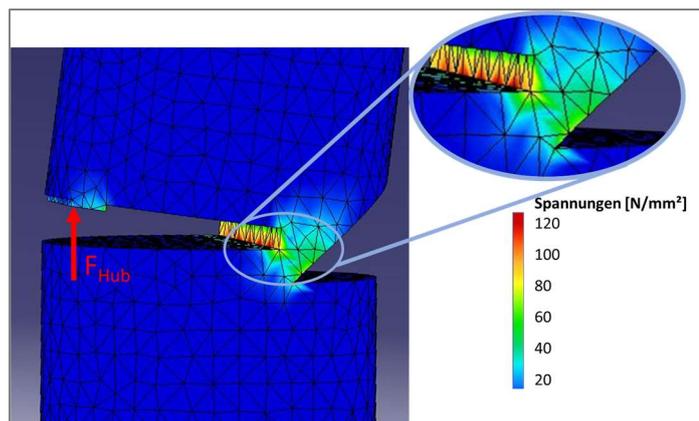


Abbildung 81: Entstehende Spannungen in der Bruchleiste (Lippert, 2020b)

Abbildung 82 verdeutlicht anhand einer Skizze die Herleitung der Berechnung für die Hubkraft zum Versagen der Bruchleiste. Die Kraft (F_{Hub_G}) entsteht hierbei an dem Kraftangriffspunkt (AP). Die Biegespannung errechnet sich durch die Division des Biegemoments (M_b) mit dem Biege widerstandsmoment (W_b).

Das Biegemoment errechnet sich aus der Kraft am Kraftangriffspunkt und der Strecke zwischen Kraftangriffspunkt und Bruchleiste. Das Biege widerstandsmoment entsteht durch das axiale Flächenträgheitsmoment 2. Grades und dem Abstand zwischen der neutralen Faser und dem Rand der Bruchleiste. Für die Berechnung dieses Flächenträgheitsmoments werden die Maße der Bruchleiste benötigt. Die benötigte Hubkraft, welche für das Versagen der Bruchleiste aufgewendet werden muss, ist abhängig von der Bruchleistenbreite, dem Wert der Biegespannung sowie der Kraftangriffsstrecke.

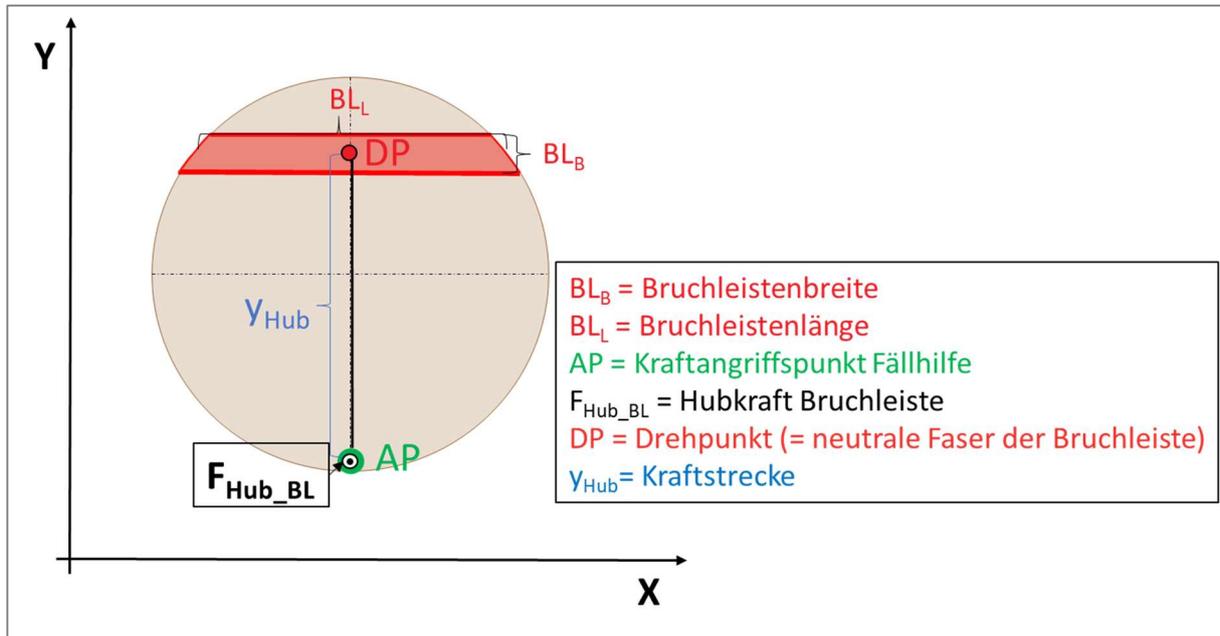


Abbildung 82: Skizze der geometrischen Verhältnisse zur Herleitung der Biegespannung in der Bruchleiste (Eigene Darstellung)

Gleichung 12 dient zur Berechnung der benötigten Hubkraft für den Bruch der Bruchleiste.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \quad (12.1)$$

$$\Sigma_{MIDP} = 0 = F_{Hub_{BL}} * (y_{Hub} - F_S * y_{Rh} + y_{DV}) \quad (12.2)$$

$$F_G = V * \delta * g \quad (12.3)$$

$$F_{Hub} = V * \delta * g * \frac{y_{Rh} + y_{DV}}{y_{Hub}} \quad (12.4)$$

$$M_b = F_{Hub_{BL}} * y_{Hub} \quad (12.5)$$

$$W_b = \frac{I}{a_{max}} = \frac{\frac{h * b^3}{12}}{a_{max}} = \frac{BL_L * (BL_B^3)}{12 * a_{max}} \quad (12.6)$$

$$a_{max} = \frac{b}{2} = \frac{BL_B}{2} \quad (12.7)$$

$$W_b = \frac{BL_L * BL_B^3}{12} * \frac{2}{BL_B} = \frac{BL_L * BL_B^2}{6} \quad (12.8)$$

$$\sigma_b = \frac{F_{Hub_{BL}} * y_{Hub} * 6}{BL_L * BL_B^2} \quad (12.9)$$

$$F_{Hub_{BL}} = \frac{\sigma_b * BL_L * BL_B^2}{y_{Hub} * 6} \quad (12.10)$$

Gleichung 12: Herleitung der benötigten Hubkraft zum plastischen Verformen der Bruchleiste

Die maximal ertragbaren Spannungswerte sind abhängig von dem Wassergehalt des Holzes, dessen Dichte und Homogenität. Für die Rückrechnung zur Bestimmung der Hubkraft wurde ein Wert der ertragbaren Biegespannung von 22,5 N/mm² angenommen. Wird diese Spannung in der Bruchleiste überschritten, beginnt die Bruchleiste zu versagen. Die Annahme des Spannungswertes von Buchenholz in frischem Zustand wird durch den Stuttgarter Festigkeitskatalog (Wessolly & Erb, 2014, S. 227 f.) begründet. Als Wert für die Buche im trockenen Zustand können 70 N/mm² angenommen werden. Aufgrund des Zustandes der Baumstümpfe musste von dem geringeren Wert 22,5 N/mm² ausgegangen werden.

Im Folgenden werden die Abhängigkeiten der benötigten Hubkraft für die Bruchleiste auf die beeinflussenden Faktoren dargestellt. Hierbei wurden Beispielmaße eines Stockes zugrunde gelegt und darauf aufbauend die benötigten Hubkräfte ermittelt. Die einzelnen Faktoren wurden dabei durch variable Werte ersetzt. Gleichung 13

beschreibt eine Beispielgleichung für die Berechnung der benötigten Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste. Hierbei wurde die Berechnung anhand von Beispielwerten durchgeführt. Die Kraftstrecke (y_{Hub}) ist 0,45 m lang, die Bruchleistenbreite (BL_B) beträgt 5 cm, die Bruchleistenlänge (BL_L) 60 cm und die Biegespannung (σ_B) hat einen Wert von 22,5 N/mm².

$$F_{Hub_{BL}} = \frac{\sigma_B * BL_L * BL_B^2}{y_{Hub} * 6} = \frac{22,5 \frac{N}{mm^2} * 0,6 m * 0,05m^2}{0,45 m * 6} = 12'500 N = 12,50 kN \quad (13)$$

Gleichung 13: Grundgleichung des Bruchleistenhubkraft-Vergleichs

Abbildung 83 beschreibt die Hubkraft, welche zum Brechen der Bruchleiste benötigt wird, in Abhängigkeit der Kraftstrecke (y_{Hub}). Hierbei wurde die Strecke durch eine Variable n ersetzt und im Bereich von 0,20 m bis 0,65 m, in 5 cm-Stufen durchkalkuliert. Als Werte der Geometrie wurde die Bruchleistenbreite (BL_B) mit 5 cm, die Bruchleistenlänge (BL_L) mit 60 cm und die Biegespannung (σ_B) mit 22,5 N/mm² angenommen. Es wird deutlich, dass die Hubkraft mit steigender Strecke exponentiell abnimmt. Der Einfluss bei einer kürzeren Strecke ist dabei höher.

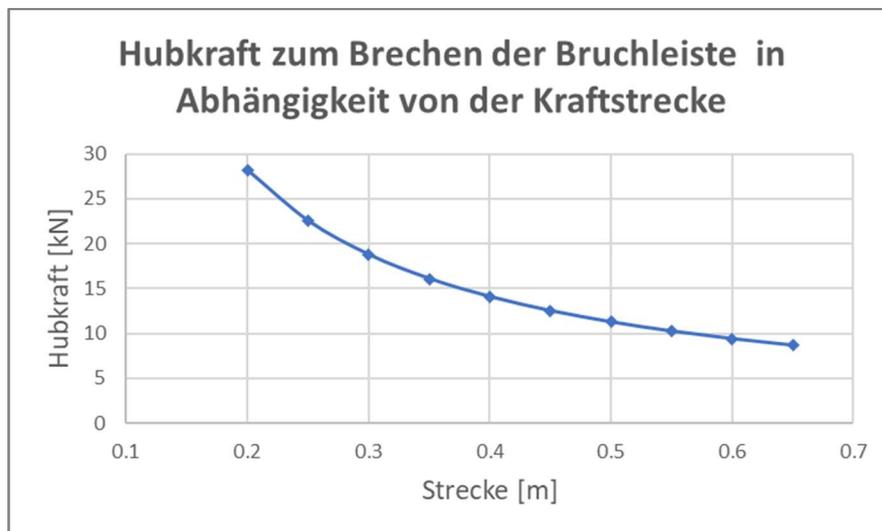


Abbildung 83: Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste in Abhängigkeit von der Strecke zwischen Drehpunkt und Kraftangriffspunkt (Eigene Darstellung)

Ein weiterer Einflussfaktor ist durch die Bruchleistenbreite in Abbildung 84 gegeben. Unter der Annahme einer Kraftstrecke (y_{Hub}) von 0,45 m und einer Bruchleistenlänge (BL_L) von 0,60 m sowie einer Biegespannung (σ_B) von 22,5 N/mm² steigt die benötigte Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste bei steigenden Bruchleistenbreite. Dadurch, dass dieser Wert als Quadrat in die Gleichung eingeht, nimmt die Hubkraft exponentiell

zu. Die Annahmewerte für die Bruchleiste liegen im Bereich von 1 cm bis 10 cm und decken somit den im Forstbereich üblichen Einsatzbereich ab.

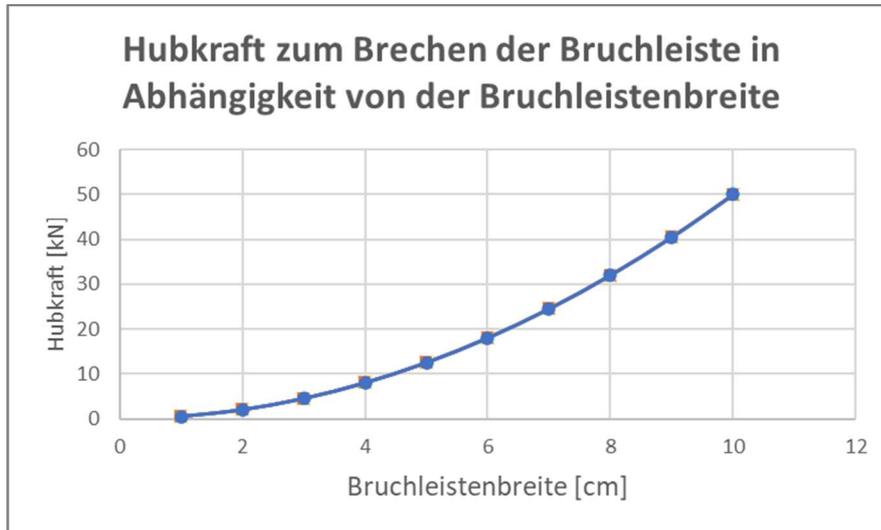


Abbildung 84: Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste in Abhängigkeit von der Bruchleistenbreite (Eigene Darstellung)

Die Bruchleistenlänge (BL_L), welche in Abbildung 85 dargestellt ist, wird als Faktor in die Hubkraftermittlung für den Bruch der Bruchleiste einkalkuliert. Bei einer Kraftstrecke (y_{Hub}) von 0,45 m, einer Bruchleistenbreite (BL_B) von 5 cm und einer Biegespannung (σ_B) von 22,5 N/mm² steigt die benötigte Hubkraft mit zunehmender Bruchleistenlänge (BL_L) linear an.

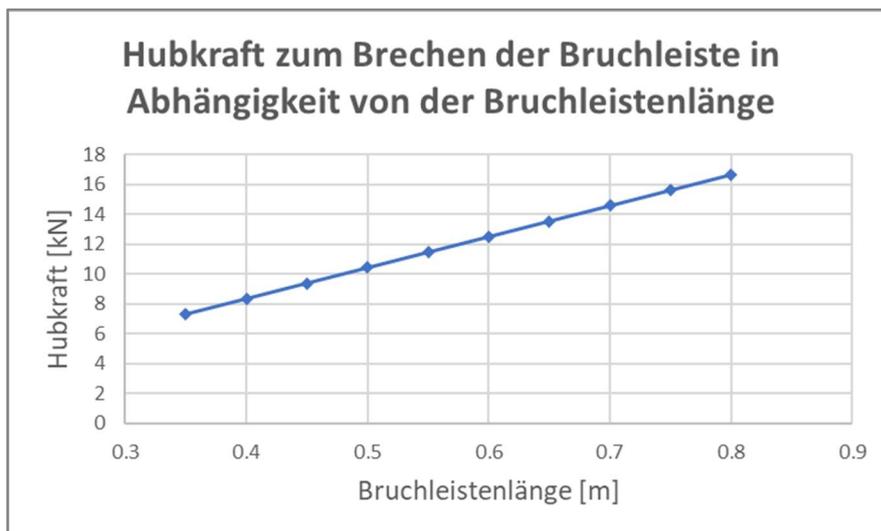


Abbildung 85: Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste in Abhängigkeit von der Bruchleistenlänge (Eigene Darstellung)

Die Biegespannung (σ_B) ist ebenfalls ein Faktor für die benötigte Hubkraft. Abbildung 86 zeigt, dass die benötigte Hubkraft mit steigender Biegespannung (σ_B) linear ansteigt. Bei einer Kraftstrecke (y_{Hub}) von 0,45 m, einer Bruchleistenbreite (BL_B) von

5 cm, einer Bruchleistenlänge (BL_L) und einer Biegespannung (σ_B) von $22,5 \text{ N/mm}^2$ wird eine Hubkraft in Höhe von $12,50 \text{ kN}$ zum Brechen der Bruchleiste benötigt.

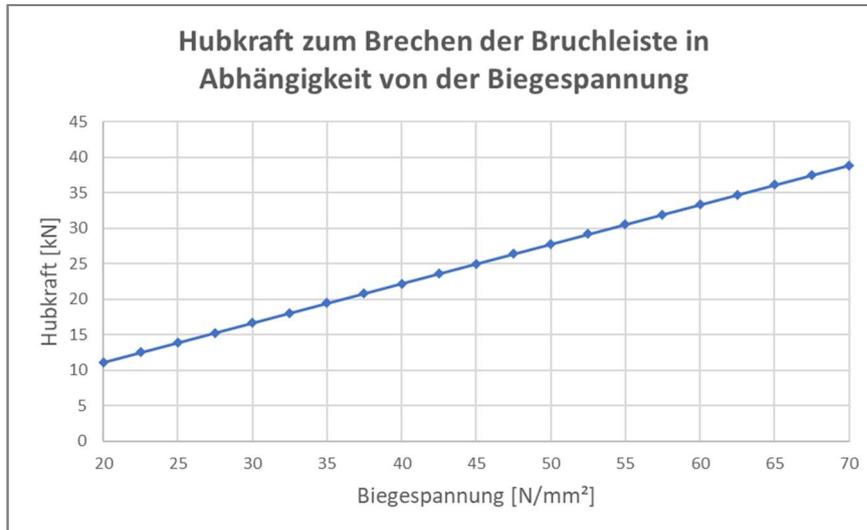


Abbildung 86: Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste in Abhängigkeit von der Biegespannung (Eigene Darstellung)

3.4.2.3 Messung der Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste

Zur Bestimmung der Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste wurden die Versuchsreihen mit den Hochstümpfen durchgeführt. Die Abbildung 87 stellt einen Hochstumpf aus der Versuchsreihe dar.



Abbildung 87: Darstellung eines Hochstumpfes (Eigene Darstellung)



Abbildung 88: Hubkraftermittlung an einem Hochstumpf (Eigene Darstellung)

Die Messung der Hubkraft an den Hochstümpfen erfolgt wie oben beschrieben. Demnach wird die Fällrichtung bestimmt, der Baum mit Hilfe eines Lasers vermessen und die Fällung durchgeführt. Die Kraftaufnahme erfolgt mittels der Kraftmessdose.

Die gemessenen Hubkräfte ermöglichen einen Abgleich mit den berechneten Werten, welche für die Biegung der Bruchleiste erforderlich sind. Hierbei wurde das

Eigengewicht des Baumes aus dem Rohgewicht, dem Volumen sowie dem Wassergehalt berücksichtigt. Die Hubkraft beinhaltet neben der Überwindung der Biegespannung auch einen Teil der Holzmasse. Entscheidend für die benötigte Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste ist die Kraftstrecke des Kraftangriffspunktes (y_{Hub}), die Bruchleistenbreite (BL_B) sowie der Rückhang des Baumes. Je größer der Rückhang, desto gefährdeter ist die Bruchleiste aufgrund des Versagens der Biegespannung (σ_B) in der Bruchleiste.

3.4.2.1 Abgleich der gemessenen und berechneten Werte

Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Hubkräften der Hochstümpfe in Abbildung 89 zeigt eine rechnerische Annäherung der benötigten Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste in Abhängigkeit der Messwerte. Die Abweichungen zwischen den Messwerten und der Berechnung liegt im Rahmen der statistischen Standardabweichung. Die berechneten Hubkräfte für die Biegespannung der Bruchleiste liegt im Bereich von 6 kN bis 77 kN. Die gemessenen Hubkräfte liegen bei 17 kN bis 100 kN.

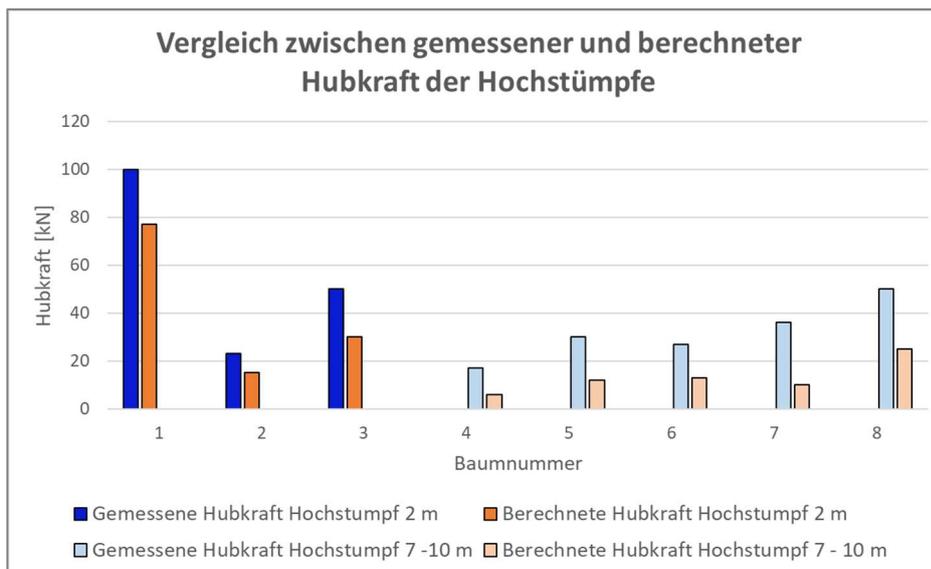


Abbildung 89: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Hubkraft der Hochstümpfe (Eigene Darstellung)

Tabelle 8 zeigt die entscheidenden Faktoren der benötigten Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste. Dabei wird deutlich, dass die Einflüsse auf die benötigte Hubkraft nicht exakt auf einen speziellen Messwert bezogen werden können.

Tabelle 8: Hubkraft-Faktoren der Hochstumpf-Versuchsreihe (Eigene Darstellung)

BNr. ¹⁰	G.HK ¹¹ [kN]	B.HK-BL ¹² [kN]	y _{RH} ¹³ [m]	BHD [cm]	BL _B ¹⁴ [cm]	BL _L ¹⁵ [cm]	y _{Hub} ¹⁶ [m]	Gewicht [kg]
1	100	77	0,18	70	10	70	0,34	580
2	23	15	0,20	55	5	56	0,32	200
3	50	30	0,15	70	7	62	0,37	460
4	17	6	0,2	57	3	55	0,32	3670
5	30	12	0,5	73	6	60	0,35	2680
6	27	13	0,5	79	5	68	0,49	3180
7	36	10	0,7	81	4,5	60	0,44	3690
8	50	25	0,6	75	5,5	69	0,31	3140

3.4.3 Hubkraft zur Fällung eines Ganzbaumes

3.4.3.1 Versuchsaufbau

Die Versuchsreihe, welche sich mit den Ganzbäumen befasste, dient dazu, die benötigte Hubkraft bei der Fällung eines Baumes zu bestimmen. Hierbei wird der Fällschnitt nach den Geometrien der Sicherheitsfälltechnik durchgeführt. Die Basisdatenerfassung fand an 27 unbelaubten Buchen und an vier Fichten statt. Dazu wurde der Baum mittels Laser vermessen und der Kronenrückhang bestimmt. Der Rückhang konnte mittels durchgeführter Verfahren aus Kapitel „Herleitung des Rückhangs“ bestimmt werden. Eine Hubkraftmessung dient dem Abgleich der berechneten Daten. Die Grundlagen des Versuchsaufbaus sind die Messung des Schwerpunktes und der Biegespannungen in der Bruchleiste. Ziel ist es, die benötigte Hubkraft des Ganzbaumes bei der Fällung zu bestimmen. Dabei wirken, wie in Abbildung 90 aufgezeigt, die Gewichtskraft des Baumes und die Spannungen der Bruchleiste gegen die Hubkraft des Hubzylinders.

¹⁰ Baumnummer

¹¹ Gemessene Hubkraft

¹² Berechnete Hubkraft Bruchleiste

¹³ Rückhang

¹⁴ Bruchleistenbreite

¹⁵ Bruchleistenlänge

¹⁶ Kraftstrecke von neutraler Faser bis Kraftangriffspunkt

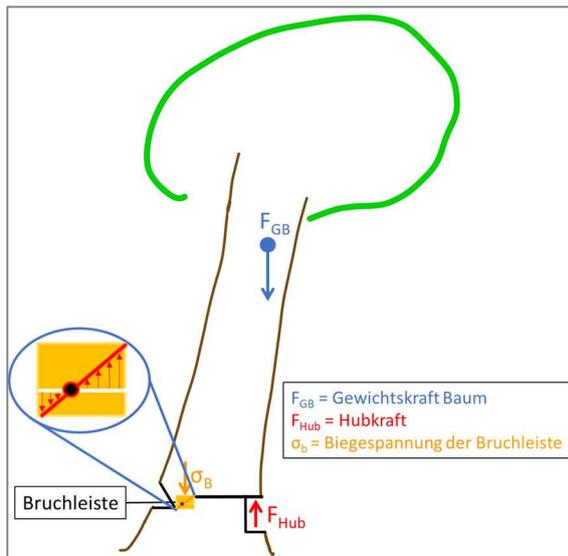


Abbildung 90: Freischnitt der Kräfte und Spannungen am Ganzbaum (Eigene Darstellung)

3.4.3.2 Berechnung der benötigten Hubkraft von Ganzbäumen

Die benötigte Hubkraft setzt sich aus zwei Teilberechnungen zusammen. Im ersten Teilabschnitt wurde die Kraft ermittelt, welche benötigt wird, um den Kippunkt zu überschreiten (vgl. Kapitel „Hubkraft für die Verlagerung des Massepunktes“). Im zweiten Teilabschnitt wird die Kraft bestimmt, welche zum Brechen der Bruchleiste benötigt wird (Kapitel „Spannungen in der Bruchleiste“). Berechnet wurden die Hubkräfte, welche zur Fällung von Ganzbäumen notwendig sind. Hierbei konnten zum Vergleich sowohl die Fichten als auch die Buchen kalkuliert werden. Die für die Buchen getroffenen Annahmen wurden in diesem Fall auch bei den Fichten zugrunde gelegt. Jedoch liegt die Biegefestigkeit frischen Fichtenholzes bei 21 N/mm^2 (Wessolly & Erb, 2014, S. 227 f.). Dabei wird die Berechnungsgrundlage des Hochstumpf-Versuchs genutzt. Die maximale Biegespannung der Buchen im frischen Zustand liegt bei $22,5 \text{ N/mm}^2$. Die Formel zur Berechnung der Hubkraft wird in Gleichung 14 beschrieben.

$$F_{HubG} = F_{HubBL} + F_{HubSP} \quad (14.1)$$

$$F_{HubBL} = \frac{\sigma_B * BL_L * BL_B^2}{y_{Hub} * 6} \quad (14.2)$$

$$F_{HubSP} = \frac{F_{GB} * (y_{RH} + y_{DV})}{y_{Hub}} \quad (14.3)$$

$$F_{HubG} = \frac{F_{GB} * y_{RH} + y_{DV}}{y_{Hub}} + \frac{\sigma_B * BL_L * BL_B^2}{y_{Hub} * 6} \quad (14.4)$$

Gleichung 14: Berechnung der gesamten benötigten Hubkraft zur Fällung eines Ganzbaumes

Die Faktoren sind abhängig von dem BHD. Dieser bestimmt die Bruchleistenbreite und die Kraftstrecke (y_{Hub}). Ein schwach dimensionierter Baum hat einen geringen BHD, dies führt dazu, dass die Strecken und die Bruchleistenbreite geringer sind. Jedoch ist auch das Volumen und die Masse des Baumes geringer, dies gleicht das Kräfteverhältnis aus. Folgende Grafiken stellen die Abhängigkeiten zwischen der Hubkraft und den Einflussfaktoren dar. Dazu wurde die Berechnung der gesamten benötigten Kraft anhand eines Beispiels durchkalkuliert. Ziel ist es, die unterschiedlichen Abhängigkeiten der Hubkraft von den Einflussfaktoren separat zu ermitteln.

Abbildung 91 beschreibt die Hubkraft in Abhängigkeit von der Bruchleistenbreite. Dabei wird deutlich, dass die Bruchleistenbreite einen Einfluss auf die Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste hat. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die Bruchleistenbreite als Quadrat in die Berechnung einfließt. Dies führt zu dem exponentiellen Anstieg mit einer steigenden Bruchleistenbreite. Bei der benötigten Hubkraft zur Veränderung des Schwerpunktes, in Bezug zur Bruchleiste, konnte auf der Grundlage der Bruchleistenvariation keine Veränderung festgestellt werden. Nach dieser Darstellung führt die Veränderung der Bruchleistenbreite nicht zu einer Veränderung der Kraftstrecke. Dies kann durch eine Anpassung der Fallkerbtiefe erklärt werden. Weiterhin wird deutlich, dass die Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste deutlich über der Hubkraft zur Schwerpunktverlagerung liegt. Mit steigender Bruchleiste wird allerdings die Differenz geringer.

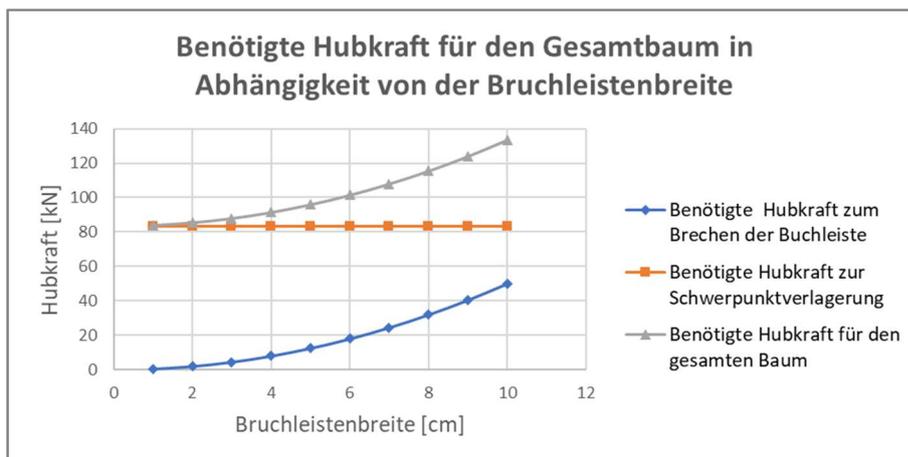


Abbildung 91: Hubkraft des Gesamtbaumes in Abhängigkeit von der Bruchleistenbreite (Eigene Darstellung)

Abbildung 92 verdeutlicht, dass die Hubkraft ebenfalls von der Bruchleistenlänge abhängt. Die Hubkraft, welche zum Brechen der Bruchleiste aufgebracht werden muss, liegt deutlich unter der Hubkraft zur Schwerpunktverlagerung. Ein, im Vergleich zu den

weiteren Einflussfaktoren, geringer Anstieg der Gesamthubkraft für die Baumfällung ist durch die Kraft zum Bruch der Bruchleiste gegeben.

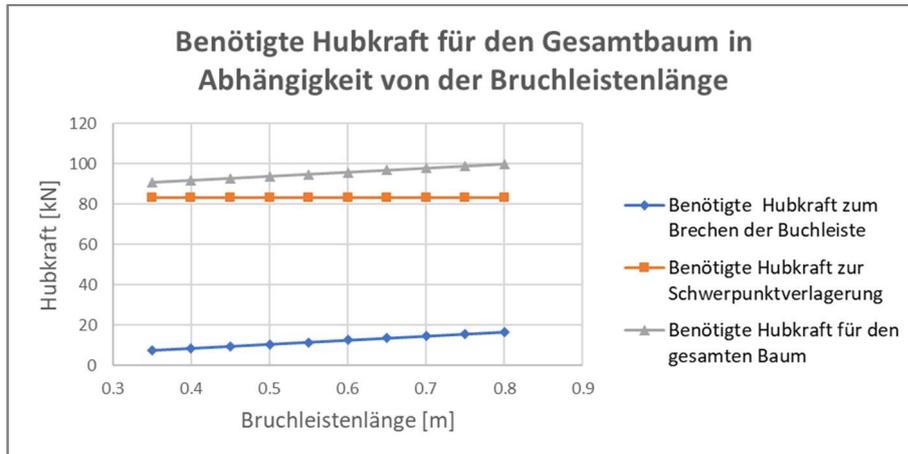


Abbildung 92: Hubkraft des Gesamtbaumes in Abhängigkeit von der Bruchleistenlänge (Eigene Darstellung)

In Abbildung 93 wird deutlich, dass eine Abhängigkeit zwischen der Hubkraft und der Kraftstrecke zwischen den Kraftangriffspunkt und dem Drehpunkt besteht. Mit einer steigenden Strecke sinkt die benötigte Hubkraft. Auffällig ist, dass eine geringe Kraftstrecke sowohl bei der Hubkraft, welche zum Versagen der Bruchleiste führt, als auch bei der Hubkraft für die Schwerpunktverschiebung als Einflussfaktor wirkt. Die Schwerpunktverlagerung hat jedoch einen Einfluss auf die Hubkraft.

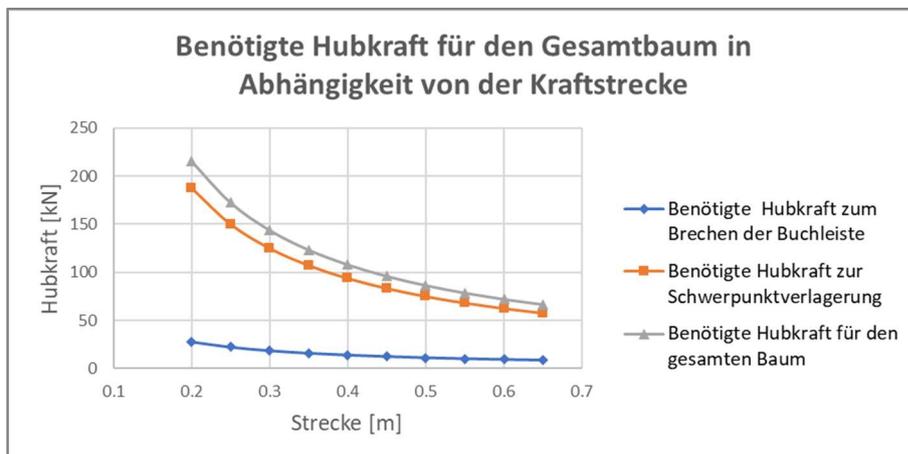


Abbildung 93: Hubkraft des Gesamtbaumes in Abhängigkeit von der Kraftstrecke (Eigene Darstellung)

In Abbildung 94 wird verdeutlicht, dass die Hubkraft von dem Baumgewicht abhängig ist. Einen großen Einfluss hat das Baumgewicht dabei auf den Teil der Hubkraft, welcher für die Schwerpunktverlagerung, und somit für das Erreichen des Kippunktes verantwortlich ist. Die Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste liegt dabei im unteren Bereich.

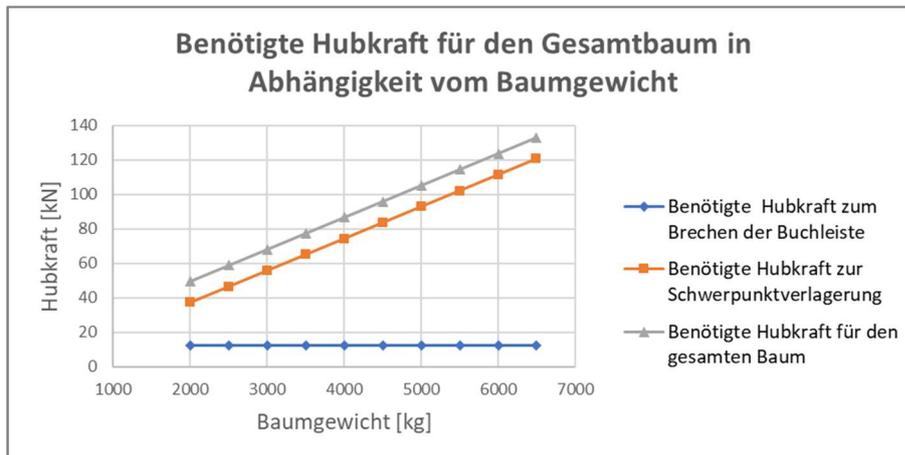


Abbildung 94: Hubkraft des Gesamtbaumes in Abhängigkeit von dem Baumgewicht (Eigene Darstellung)

Die Abbildung 95 zeigt auf, dass sich die Abhängigkeit der Hubkraft von dem Rückhang und der Drehpunktverlagerung überwiegend auf die benötigte Kraft zur Schwerpunktverlagerung auswirkt. Die Drehpunktverlagerung beschreibt die Strecke zwischen dem Stammmittelpunkt und der Bruchleistenmitte. Der Hubkraftwert steigt mit zunehmender Strecke linear an. Die benötigte Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste liegt im geringen Bereich.

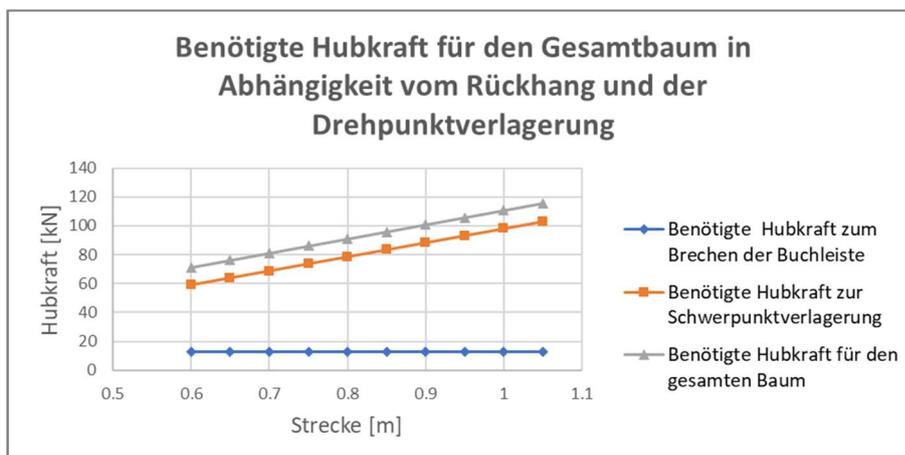


Abbildung 95: Hubkraft des Gesamtbaumes in Abhängigkeit von dem Rückhang und der Drehpunktverlagerung (Eigene Darstellung)

3.4.3.3 Messung der benötigten Hubkraft der Ganzbäume

Die Abbildung 96 zeigt den Zusammenhang zwischen BHD und Baumhöhe der Versuchsbäume in Abhängigkeit von den Baumarten. Daraus wird deutlich, dass die stärker dimensionierten Bäume auch höher sind. Diese Baumhöhe wirkt sich bei einem, vom Stammmittelpunkt versetzten Schwerpunkt, stärker auf den Rückhang aus. Des Weiteren verändert sich durch den größeren Durchmesser die Kraftstrecke (y_{Hub}) zwischen dem Drehpunkt (DP) und den Kraftangriffspunkt (AP).

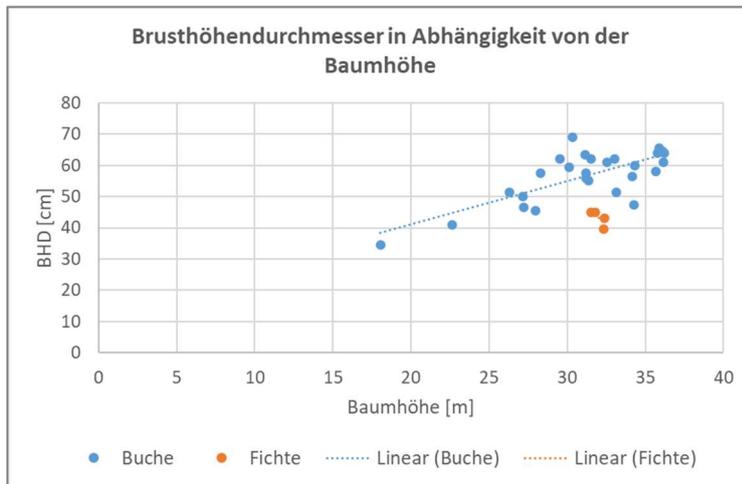


Abbildung 96: Brusthöhendurchmesser in Abhängigkeit von der Baumhöhe für die Versuchsbäume (Eigene Darstellung)

Die Verlaufskurve der Hubkräfte der Ganzbaumversuchsreihe wird in Abbildung 97 verdeutlicht. Die Grafik zeigt, dass die höchste Hubkraft an der Stelle benötigt wird, an welcher der Baum das erste Mal in Bewegung gebracht wird. Das Diagramm einer Verlaufskurve der Hubkraftmessung zeigt die Belastung des Hubzylinders während der Fällung an.

An dem dargestellten Baum wurde der Hubzylinder mit einer maximalen Last von 86 kN beaufschlagt, was bedeutet, dass für die Fällung eine Hubkraft von 86 kN erforderlich war. Der Vordruck bei der Fällung liegt bei 24 kN. Der flache Anstieg des Kurvenabschnittes während der Sägearbeit entsteht durch die Belastung auf dem Hubzylinder, welche durch die Ausformung der Bruchleiste entsteht. Der Baum neigt sich durch die reduzierte Schnittfläche in Hangrichtung und belastet den Hubzylinder zusätzlich. Die maximale Hubkraft ist erreicht, sobald der Baum sich in Fällrichtung bewegt. Die benötigten Hubkräfte der Ganzbaum-Versuchsbäume lagen im Bereich von 20 kN bis 212 kN und sind abhängig von dem Rückhang, BHD und der Position des Kraftangriffspunktes hinsichtlich des Drehpunktes.

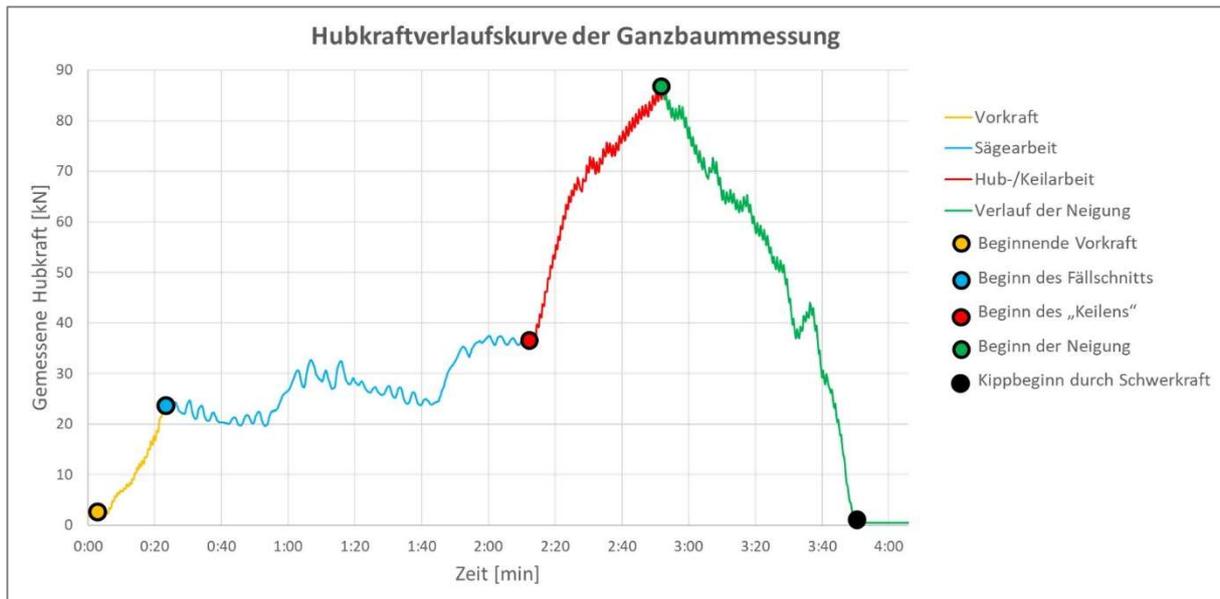


Abbildung 97: Hubkraftverlaufskurve der Ganzbaummessung (Eigene Darstellung)

3.4.3.4 Abgleich der Messwerte mit der Berechnung

In Abbildung 98 werden die gemessenen mit den berechneten Hubkräften der Vollbäume verglichen. Hierbei wird zwischen Fichten und Buchen unterschieden. Erkennbar ist, dass die berechneten Werte über den gemessenen Werten liegen. Die Differenz zwischen den gemessenen und den berechneten Hubkräften lässt sich aufgrund der idealisiert angenommenen Baumform erklären. Die Berechnung basiert auf der Schwerpunktermittlung und berücksichtigt die Bruchleiste des Baumes. Dabei wurde der Wassergehalt und die Dichte als ein homogener Faktor angenommen. Auffällig ist, dass sich die Hubkraftwerte der Fichten im unteren Bereich befinden. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Fichten ein geringeres Rohgewicht, eine geringere Biegespannung (σ_B) und eine schmale Kronenform aufweisen.

Der Baum 26 ist bereits während der Ausführung des Fällschnitts, ohne Zuhilfenahme des Hubzylinders gefallen. Dadurch war keine Aufnahme der Hubkraft möglich.

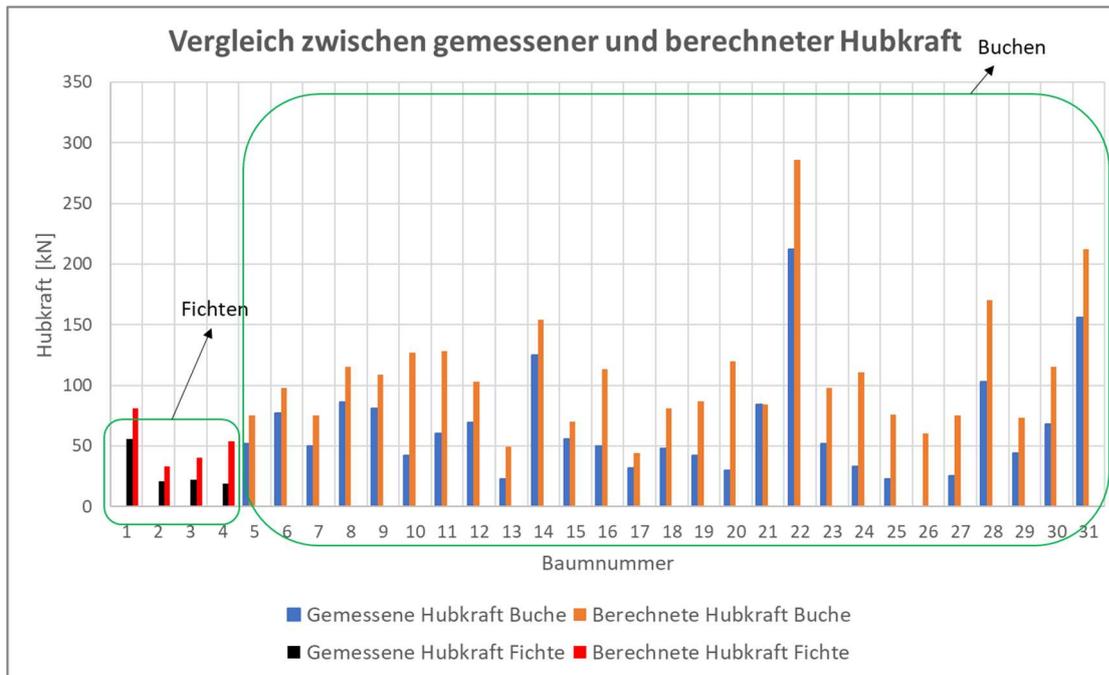


Abbildung 98: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Hubkraft (Eigene Darstellung)

Die folgenden Grafiken verdeutlichen die Abhängigkeit der berechneten und gemessenen Hubkraft von einzelnen Faktoren. Dabei sind die Einflussgrößen unterschiedlich hoch.

Die Abbildung 99 verdeutlicht die Abhängigkeit der Hubkraft von der Bruchleistenbreite während der Ganzbaumversuchsreihe. Erkennbar ist, dass die Bruchleistenbreite einen Einfluss auf die Hubkraft hat. Die Trendlinien der einzelnen Messpunkte der Buchen ergeben bei der berechneten Hubkraft eine Steigung von 14 kN pro weiterer 1 cm Bruchleistenbreite. Bei der Messung liegt die Steigung bei 7,5 kN pro weiterer 1 cm. Die Hubkräfte der Fichten in Abhängigkeit der Bruchleistenbreite liegen im Vergleich zu den Buchen im unteren Bereich.

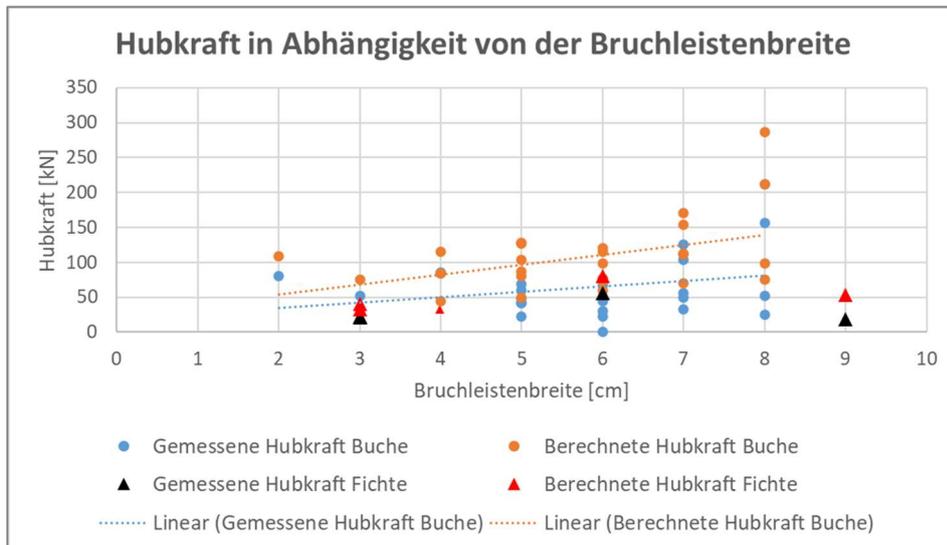


Abbildung 99: Hubkraft in Abhängigkeit von der Bruchleiste

In Abbildung 100 wurde die Hubkraft in Abhängigkeit vom Rückhang dargestellt. Durch einen größeren Rückhang steigt die Hubkraft, sowohl bei den gemessenen als auch den berechneten Werten. Die Grafik lässt erkennen, dass der Rückhang ein entscheidender Faktor für die Hubkraft darstellt. Die Fichtenwerte liegen im unteren Hubkraftbereich, dies liegt an dem geringeren Gewicht und dem engeren Kronenaufbau. Die Trendlinie der berechneten Hubkraft zeigt, dass der Einfluss des Rückhangs auf die berechnete Hubkraft in einem höheren Maße stattfand als bei den gemessenen Werten. Dabei steigt die berechnete Hubkraft um 125 kN und die gemessene um 108 kN pro weiterem Meter Rückhang. Die höhere Steigung der berechneten Werte lässt sich durch das Berechnungsmodell erklären.

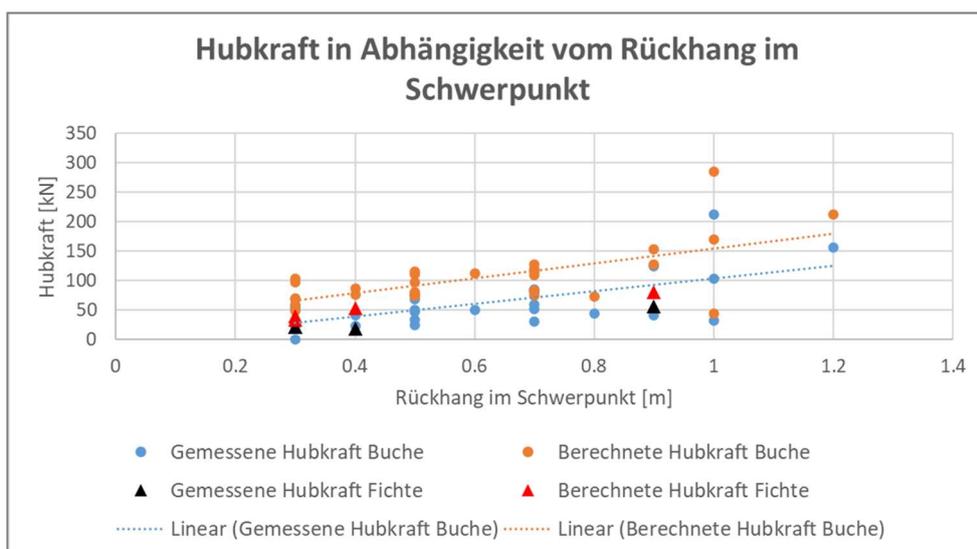


Abbildung 100: Hubkraft in Abhängigkeit vom Rückhang im Schwerpunkt (Eigene Darstellung)

Abbildung 101 beschreibt die Abhängigkeit der Hubkraft von dem BHD. Aufgrund der Auswahl der Versuchsbäume liegt der BHD in einem Bereich zwischen 35 cm und 70 cm. Die Trendlinie zeigt, dass der Einfluss vom BHD auf die Hubkraft bei den berechneten Werten deutlich über den gemessenen liegt. Der berechnete Wert der Hubkraft steigt pro weiteren 10 cm BHD um 28 kN. Eine Anpassung der Geraden durch den Ursprung bedeutet eine Steigung von 20 kN pro weiteren 10 cm BHD. Die gemessene Hubkraft steigt um 16 kN pro weitere 10 cm BHD.

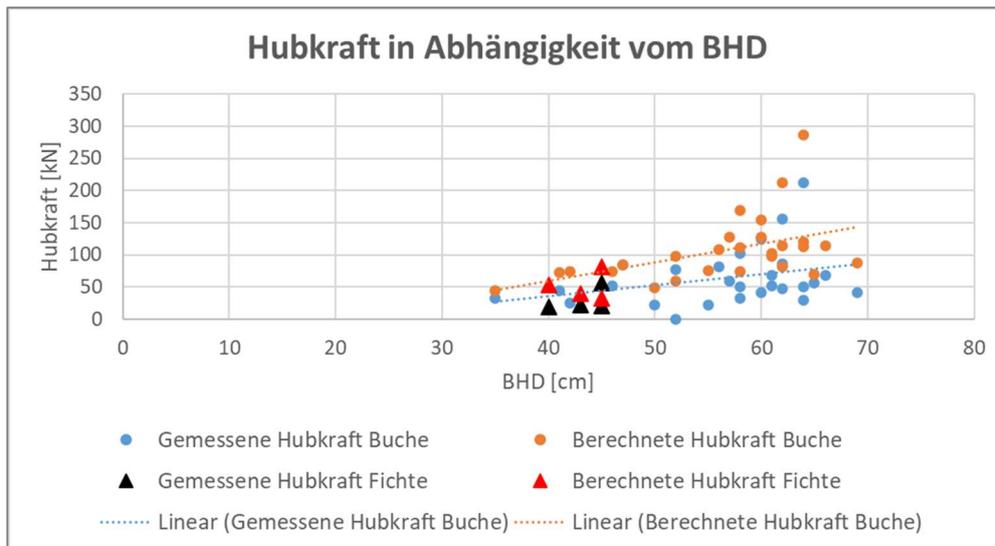


Abbildung 101: Hubkraft in Abhängigkeit vom BHD (Eigene Darstellung)

Das Baumgewicht, welches vom Volumen und dem Rohgewicht abhängig ist, hat ebenfalls Einfluss auf die benötigte Hubkraft. Abbildung 102 verdeutlicht dabei den Einfluss des Baumgewichts auf die Hubkraft. Sowohl die gemessene als auch die berechnete Hubkraft steigen mit zunehmendem Gewicht an. Die berechnete Hubkraft steigt um 13,5 kN pro weitere 1000 kg Baumgewicht. Bei der gemessenen Hubkraft beträgt die Steigung 7 kN. Die berechneten Werte steigen bei steigendem Gewicht in einem höheren Maße als die gemessenen. Dies lässt sich durch den höheren rechnerischen Einfluss des Gewichts bei einem höheren Baumgewicht erklären.

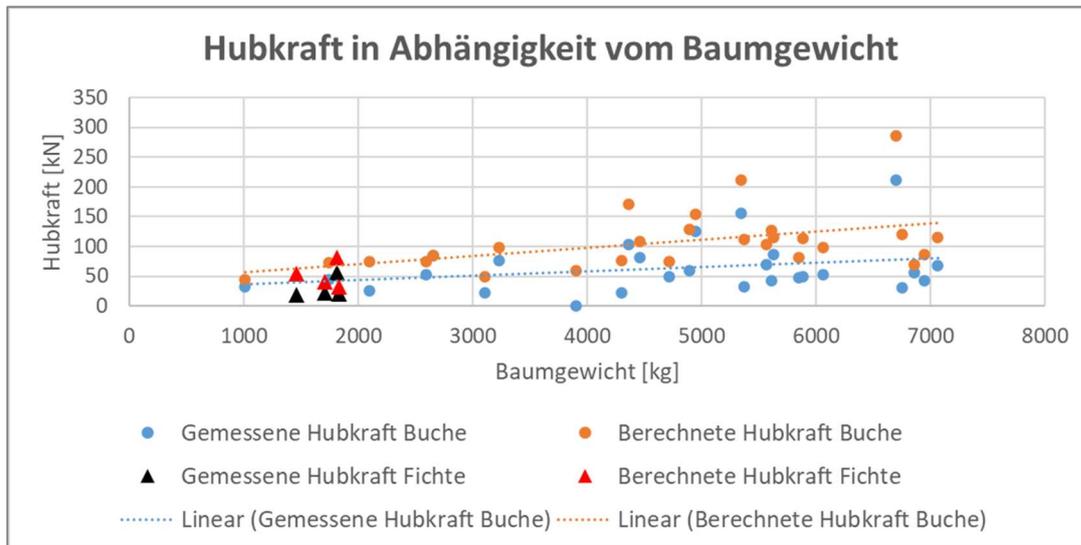


Abbildung 102: Hubkraft in Abhängigkeit vom Baumgewicht (Eigene Darstellung)

Tabelle 9 verdeutlicht die Einflussgröße einzelner Faktoren auf die Hubkraft. Dabei wurden die berechneten den gemessenen Werten gegenübergestellt und das Verhältnis der Geraden durch eine Erhöhung der Hubkraft um ein kN ermittelt. Es wird deutlich, dass die Verhältnisse der einzelnen Faktoren nicht gleichmäßig sind. Die Differenzen zwischen den berechneten und den gemessenen Werten geben die Genauigkeit der Berechnung im Vergleich zur Messung an.

Die Hubkraftmessung hat ergeben, dass sich bei einer um 0,13 cm breiteren Bruchleiste die benötigte Hubkraft um 1 kN erhöht. Die Berechnung zeigt, dass eine Verbreiterung der Bruchleiste um 0,07 cm bereits eine Hubkraftsteigerung um 1 kN auslöst.

Eine Steigerung des Rückhangs im Schwerpunkt um 0,92 cm bewirkt bei den Messungen eine Hubkraftsteigerung um 1 kN, diese Hubkraftsteigerung ist in der Berechnung bei einer Rückhangverlagerung um weitere 0,8 cm bereits erreicht.

Bei einer Vergrößerung des BHDs um 0,62 cm wird bei den Messwerten eine Hubkraftsteigerung um 1 kN benötigt. Bei den berechneten Werten wird dieser Wert von 1 kN Hubkraft bereits bei einer BHD Vergrößerung um 0,36 cm erreicht.

Die Messwerte sagen aus, dass eine Erhöhung des Baumgewichts um 142 kg eine Steigerung der Hubkraft um 1 kN zur Folge hat. Bei den berechneten Werten wird eine Hubkraftsteigerung um 1 kN nach einer Erhöhung des Baumgewichts um 74 kg erreicht.

Tabelle 9: Einflussfaktoren pro kN Hubkraft (Eigene Darstellung)

	Messung	Berechnung
<i>Bruchleistenverbreiterung [cm]</i>	0,13	0,07
<i>Erhöhung des Rückhangs im Schwerpunkt [cm]</i>	0,92	0,8
<i>Vergrößerung des BHD [cm]</i>	0,62	0,36
<i>Erhöhung des Baumgewicht [kg]</i>	142	74

Die Abhängigkeit der Hubkraft erfolgt aufgrund des Zusammenspiels der beschriebenen Faktoren. Tabelle 10 zeigt die Inhalte der vorherigen Grafiken in Form einer Gesamtdarstellung. Daraus wird deutlich, dass die Faktoren einen unterschiedlich hohen Einfluss auf die Hubkraft besitzen. Die Tabelle verdeutlicht, dass jeder Faktor einen unabhängigen Einfluss auf die Hubkraft hat. Die Hubkraft nimmt bei steigenden Faktoren zu, jedoch lassen sich diese untereinander nicht in eine Abhängigkeit setzen, da die Einflussgrößen unterschiedlich hoch sind.

Die Höhe der Differenz zwischen den gemessenen und den berechneten Werten ist individuell und abhängig von weiteren Faktoren, welche für die Hubkraft verantwortlich sind. Bei den Fichten sorgt die schmale Krone und der geradschaftige Wuchs für einen geringeren Rückhang. Die Dichte der Fichte ist im Vergleich zur Buche geringer, dadurch ist das Eigengewicht der Fichte kleiner, dies führt zu einer geringeren benötigten Hubkraft.

Tabelle 10: Hubkraft-Messwerte aus der Ganzbaum-Versuchsreihe (Eigene Darstellung)

	Baum	G.HK [kN]	B.HK [kN]	Rh [m]	BHD [cm]	BL-breite [cm]	Volumen [Fm]	Gewicht [kg]
Fichte	1	56	81	0.9	45	6	2,7	1.820
	2	21	33	0.3	45	3	2,8	1.830
	3	22	40	0.3	43	3	2,6	1.710
	4	19	54	0.4	40	9	2,2	1.460
Buche	5	52	75	0.7	46	3	2,7	2.590
	6	77	98	0.5	52	6	3,3	3.230
	7	50	75	0.5	58	6	4,8	4.720
	8	86	115	0.7	62	4	5,7	5.630
	9	81	109	0.7	56	2	4,6	4.460
	10	42	127	0.9	60	5	5,7	5.610
	11	60	128	0.7	57	5	5,1	4.890
	12	69	103	0.3	61	5	5,6	5.560
	13	23	49	0.3	50	5	3,2	3.110
	14	125	154	0.9	60	7	5	4.950
	15	56	70	0.3	65	7	6,9	6.860
	16	50	113	0.6	64	7	5,9	5.880
	17	32	44	1	35	4	1,1	1.010
	18	48	81	0.5	62	5	5,9	5.850
	19	42	87	0.4	69	5	6,8	6.950
	20	30	120	0.7	64	6	6,8	6.760
	21	84	84	0.7	47	4	2,8	2.650
	22	212	286	1	64	8	6,8	6.690
	23	52	98	0.3	61	8	6,2	6.070
	24	33	111	0.5	58	7	5,5	5.370
	25	23	76	0.4	55	6	4,4	4.300
	26	0	60	0.3	52	6	4	3.900
	27	25	75	0.5	42	8	2,2	2.090
	28	103	170	1	58	7	4,4	4.370
	29	44	73	0.8	41	6	1,8	1.740
	30	68	115	0.5	66	6	7,1	7.060
	31	156	212	1.2	62	8	5,3	5.350

4 Erstellung der Modelle und eines Kalkulators

4.1 Erstellung und Auswertung von Modellen

4.1.1 Modellerstellung aus den gemessenen und berechneten Hubkräften

Zur Herleitung der Hubkräfte ohne eine vorherige Lasermessung, wurde, auf der Basis der Hubkraftberechnung, ein Kalkulationsmodell entwickelt. Im Unterschied zu dem Berechnungsmodell, bei welchem die Messdaten aufgrund der Lasermessungen vorhanden waren, beruht das Kalkulationsmodell auf Grundlagen von Eingangswerten und Annahmen. Diese wurden dabei in eine Kalkulation der Hubkraft überführt.

Abbildung 103 verdeutlicht die Eingangswerte und daraus abgeleitet in Abbildung 104 die Basisdaten zur Hubkraftberechnung. Die Grundannahmen wurden aus dem Kapitel: „Annahmen und Basisdaten für die Hubkraftermittlung“ übernommen. Die Eingangswerte, auf dessen Grundlage die Berechnung durchgeführt wird, sind der BHD, die Baumhöhe, der Rückhang an der Kronenspitze sowie der Kronendurchmesser. Die benötigten Maße des Fällschnittes wurden unter Annahme der Anwendung der Regelfälltechnik ermittelt. Die Stammlänge konnte aus der Differenz zwischen der Höhe des Baumes und dem Kronendurchmesser ermittelt werden. Aufgrund der Annahme der Abholzigkeit in Höhe von 1 cm/m konnte der Stammdurchmesser am Übergang zwischen Krone und Stamm in guter Annäherung ermittelt werden. Begründet durch die Annahme, der Stamm ist ein geradliniger Kegelstumpf, kann das Volumen des Stammes errechnet werden. Notwendige Faktoren sind hierbei die Baumhöhe, der obere Stammdurchmesser sowie der Durchmesser am Fällschnitt, dieser lässt sich über die Abholzigkeit und den BHD ermitteln. Bei einer Annahme von einem 30 cm hohen Stumpf liegt der Durchmesser am Fällschnitt 1 cm über dem BHD. Das Volumen der Krone lässt sich durch eine Differenz zwischen dem Stammvolumen und dem Gesamtbaumvolumen ermitteln. Das Gesamtbaumvolumen kann nach forstlichem Maß durch eine Formel aus der Waldmesslehre bestimmt werden. Hierbei muss jedoch das Reisholz, in Höhe von 15 %¹⁷, auf das ermittelte Volumen hinzugefügt werden.

Das Rohgewicht des Holzes wird mit 680 kg für die Buche angenommen. Der Wassergehalt, welcher vom Gesundheitszustand des Baumes abhängt, liegt bei 35 % bis 45 %. Diese Werte stammen aus der Differenz zwischen dem Gewicht von grünem Holz und dem Rohgewicht (Mette et al., 1989, S. 41).

¹⁷ Entspricht aus der Versuchsreihe durch die FAWF (beschrieben in Kapitel: „Annahmen und Basisdaten für die Hubkraftermittlung“)

Der Rückhang des Baumes im Schwerpunkt ist abhängig von der Schwerpunkthöhe. Diese wurde auf der Grundlage des Stammvolumens errechnet. Dazu wurde die Annahme getroffen, dass sich der Schwerpunkt des Baumes zwischen dem Messpunkt an der Kronenspitze und dem Mittelpunkt am Stammfuß befindet. Eine Winkelberechnung zwischen einer Geraden und der theoretischen Mittellinie des Baumes erzeugt die Neigung des Baumes. Durch diese in Kombination mit der Schwerpunkthöhe, kann der Rückhang im Schwerpunkt ermittelt werden. Diese ermittelten Werte ermöglichen die Berechnung der benötigten Hubkraft zur Fällung des Baumes.

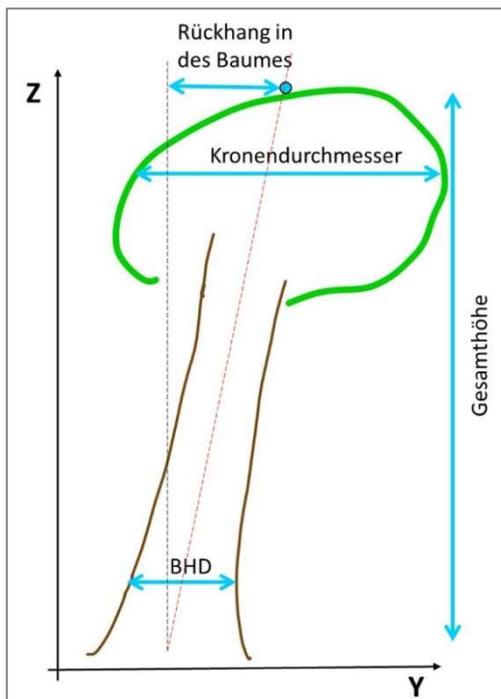


Abbildung 103: Skizze für die Hubkraftkalkulation (Eigene Darstellung)

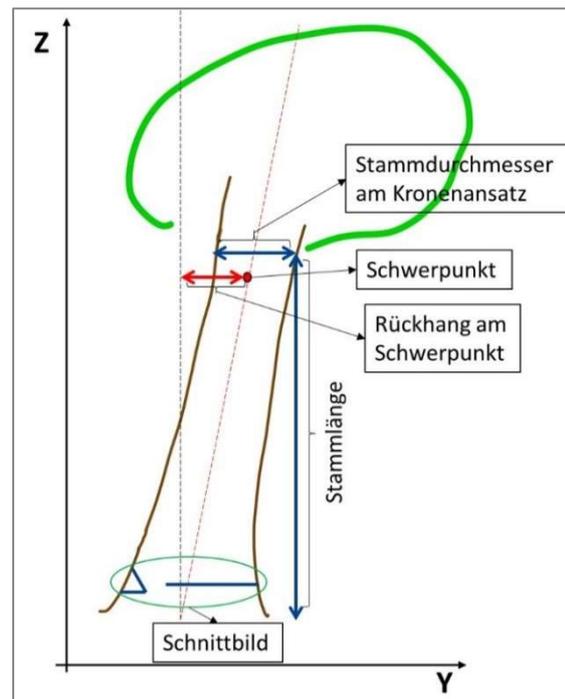


Abbildung 104: Skizze der benötigten Basisdaten (Eigene Darstellung)

Die Tabelle 11 dient dem direkten Vergleich der Modelle untereinander und mit dem realen Baum. Hierbei werden die tatsächlich gemessenen Hubkräfte mit den ermittelten Hubkräften abgeglichen. Die Werte sind individuell erhoben und von den beschriebenen Einflussfaktoren abhängig.

Tabelle 11: Vergleich der Hubkraftmodelle (Eigene Darstellung)

Modell	Realitätsabbild	Berechnungsmodell	Kalkulationsmodell
Grafik			
Hubkraft [kN]	81	109	135

4.1.2 Auswertung der Modelle

Die Abweichungen zwischen dem Realitätsmodell und dem Berechnungsmodell liegen bei rund 20 %. Begründet werden kann diese Abweichung durch das Baumgewicht und den Kronendurchmesser. In der Berechnung besteht die Annahme, dass das Gewicht des Baumes homogen sowohl in der Krone als auch in dem Stamm verteilt ist. Der Schwerpunkt des Baumes im Realitätsmodell liegt in einem dreidimensionalen Raum, das Berechnungsmodell berücksichtigt allerdings, aufgrund der entstehenden zusätzlichen Spannungen in der Bruchleiste, nur die Höhe und den Rückhang. Der Kronendurchmesser in dem Berechnungsmodell begründet sich ebenfalls auf einer Annahme. Dabei sorgt die Kugelform für einen erhöhten Schwerpunkt, dies verändert den Kraftaufwand zum Kipppunkt. Der Durchmesser der Kugel beeinflusst ebenfalls die Stammlänge. Eine veränderte Stammlänge hat einen veränderten Schwerpunkt.

Die Differenz zwischen dem Berechnungsmodell und dem Kalkulationsmodell lässt daraus ableiten, dass die Eingabe der Werte auf Schätzungen, sowie Annahmen beruht und nicht den exakten Stammverlauf berücksichtigt.

Die Laservermessung des Baumes sorgt im Berechnungsmodell für eine Darstellung der Durchmesser in entsprechenden Höhenstufen und ebenfalls für die Bestimmung der Lage des Stammabschnittes im dreidimensionalen Raum. Das Kalkulationsmodell bedient sich den Schätzungen des BHDs, der Baumhöhe, dem Kronendurchmesser sowie dem Rückhang. Die Abholzigkeit verändert die Stammform und den Stammdurchmesser, dieser Wert wurde durch eine Annahme von 1,0 cm/m festgesetzt.

Aufgrund der unbekanntem Stammdurchmesser in den Höhenstufen sorgt die Abholzigkeit in Kombination mit dem Kronendurchmesser für eine Durchmesserdarstellung am Kronenansatz. Dadurch verlagert sich der Schwerpunkt und die Hubkraft steigt im Vergleich zum Berechnungsmodell an. Der Fällschnitt des Kalkulationsmodells beruht auf der Annahme, dass die Schnittführung nach den Grundsätzen der Regelfälltechnik durchgeführt wird. Das Berechnungsmodell errechnet die Hubkraft auf der Grundlage der tatsächlichen Schnittmaße. Dabei kann bei einer stärkeren Bruchleiste eine höhere Hubkraft notwendig sein. Infolge der stärkeren Bruchleiste verändern sich die Hebel-längen in dem Fällschnitt unter Voraussetzung einer gleichbleibenden Fallkerbtiefe. Die entstehende Herleitung des Rückhangs im Schwerpunkt, wird aufgrund der Annahme, dass der Stammverlauf im Bereich des Brusthöhendurchmessers bis zur Kronenspitze geradlinig verläuft, verdeutlicht. Der Kalkulator berechnet auf Grundlage der Eingabewerte eine Hubkraft.

Die Abbildung 105 stellt einen Vergleich zwischen den gemessenen, berechneten und kalkulierten Hubkräften dar. Hierbei wurden die Ergebnisse des Kalkulators anhand von der Ganzbaum-Versuchsreihe der Buchen überprüft. Dabei wurde deutlich, dass die durch das Kalkulationsmodell ermittelte Hubkraft in guter Annäherung an die berechnete Hubkraft reicht.

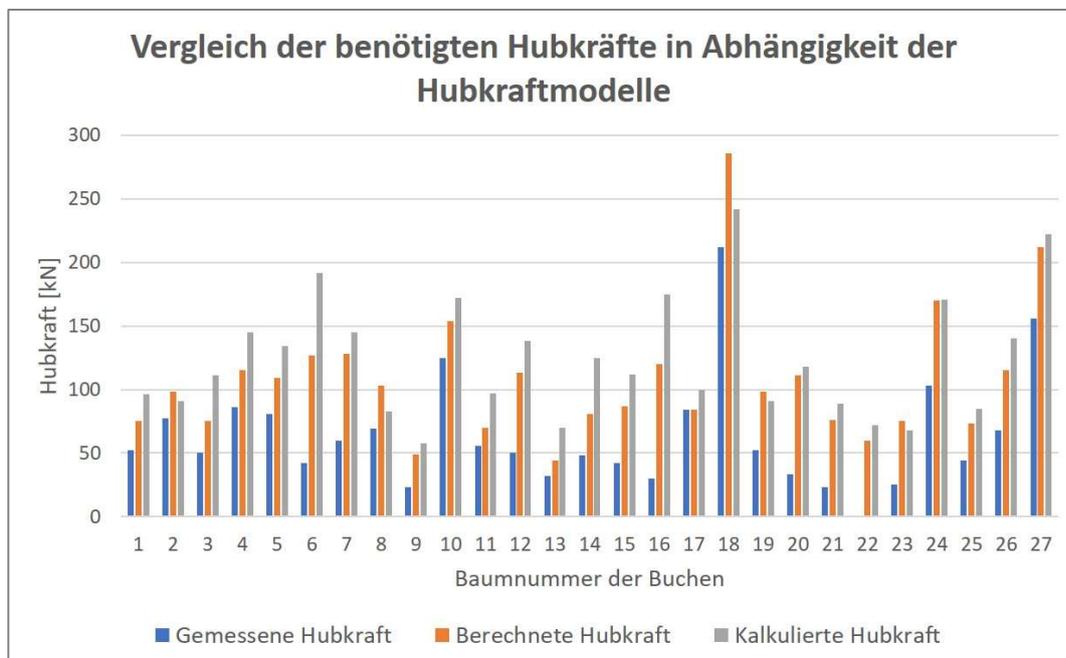


Abbildung 105: Vergleich der gemessenen, berechneten und kalkulierten Hubkraft der Buchen (Eigene Darstellung)

4.2 Entwicklung eines Hubkraftkalkulators

4.2.1 Grundlagen und Funktionsweise des Kalkulators

Zur praxisnahen Nutzung des Kalkulationsmodells wurde die Berechnung in eine Webapplikation eingebunden. Dadurch besteht die Möglichkeit, auf der Grundlage praxisnah zu ermittelnder Eingabedaten die benötigte Hubkraft in Annäherung an die Realität zu erhalten. Abbildung 106 zeigt die Bedienoberfläche dieser Anwendung. Die Haupteingabefelder des Hubkraftkalkulators sind der BHD, die Baumhöhe, der Rückhang an der Kronenspitze und der geschätzte Kronendurchmesser. Die Abholzigkeit, welche standardmäßig auf 1 cm/m gestellt ist, lässt sich in 0,1 cm Schritten anpassen. Die Einschubtiefe der Fällhilfe beschreibt die Entfernung zwischen dem Baumrand und der eingesetzten Fällhilfe. Je größer der Wert, desto näher sitzt die Fällhilfe an dem Drehpunkt (der Bruchleiste) durch den verkürzten Hebel wird eine höhere Kraft benötigt. Zur genaueren Anpassung der Werte kann innerhalb eines Drop-Down-Menüs der Zustand der Buche ausgewählt werden. Dadurch ist es möglich, die benötigte Hubkraft während der Fällung sowohl im Sommer als auch im Winter in Abhängigkeit des Gesundheitszustandes des Baumes zu ermitteln. Hierbei kann zwischen drei Optionen gewählt werden. Diese sind:

- Buche im Sommer mit Laub
- Buche im Sommer ohne Laub
- Buche im Winter

Jede Option beinhaltet die Faktoren Wassergehalt und Rohgewicht. Grundsätzlich ist das Rohgewicht (= Rohdichte) des Holzes im trockenen Zustand identisch. Dieses liegt bei 680 kg pro m³ Holzmasse. Die Buche besitzt im Sommer Laub, dieses wiegt nach der Untersuchung der FAWF (Block et al., 2016) je nach Kronengröße, Baumzustand und Standortseinheit zwischen 0,1 bis 55 kg im trockenen Zustand. Eine Umrechnung des absoluten Laubgewichts auf die Dimension des Baumes ergibt einen Wert von ca. 15 kg Laub pro m³ Holzmasse. Unter der Annahme, dass das Trockengewicht des Laubs mit demselben Wassergehalt wie das Holz verrechnet werden kann, wurde das Rohgewicht der Buche im Sommer pauschal um 15 kg, auf 695 kg erhöht.

Der Wassergehalt des Baumes im Sommer liegt bei 40 %. Dieser Wert konnte durch eine Verrechnung von Feuchtegewicht und Rohgewicht ermittelt werden. Das Gewicht des grünen Holzes liegt dabei bei ca. 1080 kg, Trockenes Buchenholz weist ein Gewicht von ca. 780 kg auf (Mette et al., 1989, 41). Das Fehlen von Buchenlaub im

Sommer deutet auf Trockenschäden hin. In diesem Zustand wurde die Annahme getroffen, dass sich das Rohgewicht um die Blattmasse reduziert, der Wassergehalt jedoch bei 40 % bleibt. Dies ist damit begründet, dass eine genaue Einschätzung des Wassergehalts von dem exakten Gesundheitszustand des Baumes abhängt. Die 40 % sind somit in guter Näherung und beugen eine Unterschätzung des Gewichts vor. Der Baumzustand im Winter wurde bei gleichem Rohgewicht von 680 kg und einem Wassergehalt von 35 % angenommen. Die Differenz des Wassergehaltes entsteht durch den geringeren Wassergehalt der Bäume im Winter.

Durch die Eingabe der benötigten Werte in den Hubkraftkalkulator, wird die Berechnung der Hubkraft nach dem Betätigen des „Berechnen“-Buttons durchgeführt. Hierbei erscheint im rechten Feld der Anwendung die theoretische Hubkraft, welche zum Fällen dieses Baumes benötigt wird.

Hubkraft-Kalkulator für technische Fällhilfen an Buchen

BHD [cm]
60

Baumhöhe [m]
30

Rückhang an der Kronenspitze [m]
0,7

Kronendurchmesser [m]
10

Einschubtiefe der Fällhilfe [cm]
6

Abholzigkeit [cm/m]
1

Zustand der Buche:
im Sommer mit Laub

Berechnen

118 kN theoretisch benötigte Hubkraft (entspricht: 12.1 to).

Abbildung 106: Kalkulator Screenshot (Eigene Darstellung)

Die Grundlagen des Hubkraftkalkulators konnten ebenfalls in Form einer Hilfstabelle, (Abbildung 107) dargestellt werden. Diese wurde auf der Grundlage eines Baumes mit einer Baumhöhe von 30 m, einem Kronendurchmesser von 10 m und einer Abholzigkeit von 1 cm/m erstellt. Bei einem Baum mit einer größeren Krone im Vergleich zu einer kleineren Krone, wird der Rückhang aufgrund der veränderten Schwerpunktlage

größer und die benötigte Hubkraft steigt an. Der Kronendurchmesser von 10 m wurde aufgrund von Erkenntnissen aus der Untersuchung der FAWF gewählt.

Hilfstabelle zur Ermittlung der benötigten Hubkraft bei der Fällung von Bäumen																					
		Buche im Sommer mit Laub						Buche im Sommer ohne Laub						Buche im Winter							
Gerade- stehend	Rückhänger [m]			Einschubtiefe [cm]						Einschubtiefe [cm]						Einschubtiefe [cm]					
	0,5	1	1,5	0		5		10		0		5		10		0		5		10	
BHD [cm]				kN	to	kN	to	kN	to	kN	to	kN	to	kN	to	kN	to	kN	to		
30				14	1,4	19	1,9	29	3,0	14	1,4	19	1,9	29	3,0	14	1,4	18	1,8	28	2,9
35				19	1,9	24	2,4	34	3,5	19	1,9	24	2,4	33	3,4	18	1,8	23	2,3	32	3,3
40				24	2,4	30	3,1	40	4,1	24	2,4	30	3,1	39	4,0	23	2,3	29	3,0	38	3,9
45				30	3,1	37	3,8	46	4,7	30	3,1	36	3,7	46	4,7	29	3,0	35	3,6	45	4,6
50				37	3,8	44	4,5	54	5,5	37	3,8	43	4,4	53	5,4	36	3,7	42	4,3	52	5,3
55	34			44	4,5	52	5,3	62	6,3	44	4,5	51	5,2	62	6,3	43	4,4	50	5,1	60	6,1
60	40			53	5,4	60	6,1	71	7,2	52	5,3	60	6,1	71	7,2	51	5,2	58	5,9	69	7,0
65	46			61	6,2	70	7,1	81	8,3	61	6,2	69	7,0	81	8,3	59	6,0	68	6,9	78	8,0
70	51	35		71	7,2	80	8,2	92	9,4	71	7,2	80	8,2	91	9,3	69	7,0	77	7,8	89	9,1
75	57	41		82	8,4	91	9,3	104	10,6	81	8,3	91	9,3	103	10,5	79	8,1	88	9,0	100	10,2
80	62	46	32	93	9,5	103	10,5	116	11,8	92	9,4	102	10,4	115	11,7	90	9,2	100	10,2	112	11,4
85	67	51	38	105	10,7	116	11,8	129	13,1	104	10,6	115	11,7	128	13,0	101	10,3	112	11,4	125	12,7
90	72	57	44	118	12,0	130	13,3	144	14,7	117	11,9	129	13,1	142	14,5	114	11,6	125	12,7	139	14,2
95	78	62	49	132	13,5	144	14,7	159	16,2	131	13,4	143	14,6	157	16,0	127	12,9	139	14,2	153	15,6
100	83	68	55	147	15,0	160	16,3	175	17,8	146	14,9	158	16,1	173	17,6	142	14,5	154	15,7	169	17,2
105	88	73	60	163	16,6	176	17,9	192	19,6	162	16,5	175	17,8	191	19,5	157	16,0	170	17,3	185	18,9
110	93	79	66	180	18,3	194	19,8	210	21,4	178	18,1	192	19,6	209	21,3	173	17,6	187	19,1	203	20,7
115	98	84	71	198	20,2	212	21,6	230	23,4	196	20,0	211	21,5	228	23,2	191	19,5	205	20,9	222	22,6
120	103	89	76	217	22,1	232	23,6	250	25,5	215	21,9	230	23,4	248	25,3	209	21,3	224	22,8	241	24,6
125	108	94	81	237	24,2	253	25,8	272	27,7	235	24,0	251	25,6	270	27,5	229	23,3	244	24,9	262	26,7
130	113	99	87	258	26,3	275	28,0	295	30,1	256	26,1	273	27,8	292	29,8	249	25,4	265	27,0	284	29,0
135	119	104	92	281	28,6	299	30,5	310	31,6	279	28,4	296	30,2	316	32,2	271	27,6	288	29,4	307	31,3
140	123	109	97	305	31,1	323	32,9	344	35,1	305	31,1	321	32,7	341	34,8	294	30,0	312	31,8	332	33,8
145	129	114	102	330	33,6	349	35,6	371	37,8	327	33,3	347	35,4	368	37,5	318	32,4	337	34,4	358	36,5
150	134	119	107	357	36,4	377	38,4	400	40,8	354	36,1	374	38,1	396	40,4	344	35,1	363	37,0	385	39,2

Erstellt unter den Annahmen einer Baumhöhe von 30 m, einem Kronendurchmesser von 10 m, einer Abholzigkeit von 1 cm/m und unter der Verwendung der Sicherheitsfälltechnik.
Einschubtiefe 0 cm entspricht der Anwendung der Tabelle unter Verwendung technischer Fällkeile.

Abbildung 107: Hubkraft-Hilfstabelle für technische Fällhilfen (Eigene Darstellung)

4.2.2 Auswirkungen auf die kalkulierte Hubkraft bei fehlerhaften Eingaben

Die Faktoren BHD, Rückhang im Kronenbereich, Baumhöhe und Kronendurchmesser müssen bewertet werden. Der BHD wird direkt gemessen, die Messung oder Einschätzung der weiteren Faktoren erweist sich als schwieriger. Hierbei kann es möglicherweise zu Fehleinschätzungen des Anwenders kommen, welche sich auf die Hubkraftberechnungen auswirken.

Die Folgen einer Abweichung des BHDs und des Rückhangs werden in der Hilfstabelle ersichtlich. Dabei kann eine Unterschätzung des BHDs um 10 cm die Hubkraft um bis zu 10 kN verringern. Die Fehleinschätzung des Rückhangs um 0,5 m hat eine Hubkraftdifferenz von bis zu 20 kN zur Folge.

Die Abbildung 108 zeigt die Auswirkungen der Veränderungen der Einflussfaktoren auf die Hubkraft an. Dabei wird deutlich, dass bei steigenden Faktoren die Hubkraft

exponentiell ansteigt. Eine Fehleinschätzung aller Eingabewerte um jeweils +5 % bedeutet einen Hubkraftmehrbedarf von 14 %.

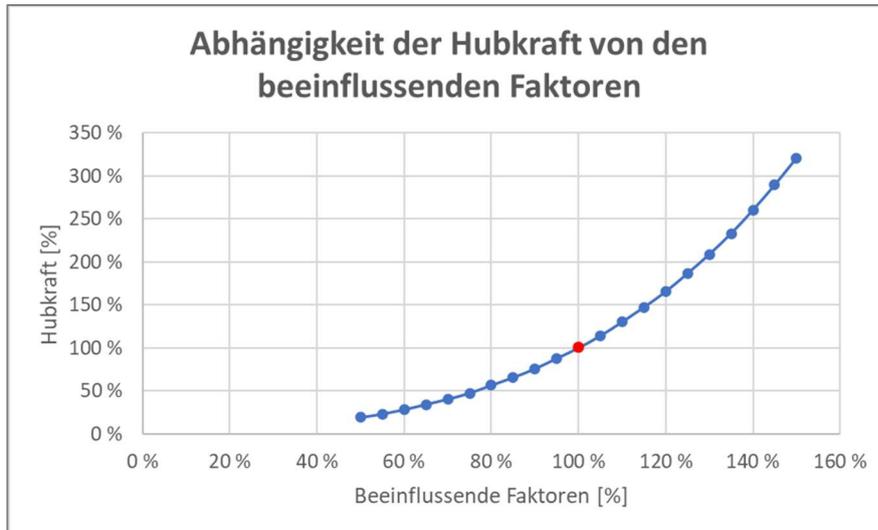


Abbildung 108: Folgenabschätzung bei Fehleingaben (Eigene Darstellung)

5 Fazit und Prüfung der Hypothesen

Das Ziel dieser Arbeit war es, die benötigten Hubkräfte bei der Baumfällung unter Verwendung von technischen Fällhilfen zu ermitteln. Die Hubkräfte sind abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren im Baum. Darunter zählen z.B. das Baumgewicht, die Geometrie des Fällschnittes, die Schwerpunktlage sowie der BHD.

Zur Ermittlung der Abhängigkeiten der Hubkraft von den Einflussfaktoren wurden mehrere praktische Versuchsreihen durchgeführt. Diese fanden unabhängig voneinander statt.

Die erste Versuchsreihe, welche an einem Modell durchgeführt wurde, thematisiert die Hubkraft, welche zur Schwerpunktverlagerung in Bezug zur Bruchleiste benötigt wird. Durch das Modell konnte die Hubkraft ohne Einfluss einer Bruchleiste ermittelt werden. Der Drehpunkt an dem Modell wurde durch ein Scharnier verkörpert. Bei einem realen Baum dient die Bruchleiste als Drehpunkt während dem Fällvorgang.

Zur Bestimmung der benötigten Kraft, welche zum Brechen der Bruchleiste aufgewandt werden muss, wurde die zweite Versuchsreihe durchgeführt. Diese fand an Hochstümpfen statt. Für die benötigte Kraft ist die maximale Biegespannung des Holzes, welche von dem Wassergehalt abhängig ist, ein relevanter Faktor.

Die dritte Versuchsreihe, welche an Ganzbäumen stattfand, beinhaltet eine Kombination der ersten beiden Versuchsreihen. Hierzu wurde die Kraft, welche zur Verlagerung des Schwerpunktes sowie die Kraft für das Brechen der Bruchleiste benötigt wird, zusammenfassend dargestellt.

Zu Beginn jeder Versuchsreihe wurde mittels eines Lasers die Stammform näherungsweise vermessen und somit der Schwerpunkt des Baumes ermittelt. Diese Methode eignete sich aufgrund der Aufnahme von Werten im dreidimensionalen Raum als Grundlage für eine Erstellung eines digitalen Zwillings des Baumes.

Bestandteil jeder dieser Versuchsreihen war es, die jeweils benötigte Kraft anhand von Basisdaten zu berechnen. Zur Überprüfung dieser Werte wurde eine Messung durchgeführt. Ein Abgleich der gemessenen mit den berechneten Werten ergab ein Zwischenfazit für jede Versuchsreihe.

Das Zwischenfazit der ersten Versuchsreihe besagt, dass der Einfluss des Rückhangs und der Hebellänge unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Die Hebellänge bei einem realen Baum ist von dem BHD und der Strecke zwischen dem Kraftangriffspunkt und

dem Drehpunkt (= Mittelpunkt der Bruchleiste) abhängig. Der Rückhang beschreibt die Differenz zwischen dem Schwerpunkt und der Senkrechten zum Stammmittelpunkt.

Die zweite Versuchsreihe, welche die benötigte Hubkraft zum Brechen der Bruchleiste ermittelte, ergab, dass auch dort die Einflüsse auf die Hubkraft unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Unter der Bedingung, dass die Fallkerbtiefe eine gleichbleibende Größe darstellt, wird der höchste Einfluss durch die Kraftstrecke, welche die Strecke zwischen dem Kraftangriffspunkt und dem Drehpunkt definiert, aufgebracht. Eine nicht zu vernachlässigende Einflussgröße, welche als Quadrat in die Berechnung eingeht, wird durch die Bruchleistenbreite beschrieben.

Das Zwischenfazit der dritten Versuchsreihe ergab, dass der höchste Einfluss auf die Hubkraft durch die Kraftstrecke gegeben ist. Dies ist dadurch begründbar, dass diese Strecke sowohl für die Hubkraftermittlung als auch für die Kraft zum Brechen der Bruchleiste relevant ist. Bei einer gleichbleibenden Fallkerbtiefe und einer kleiner werdenden Bruchleistenbreite vergrößert sich die Kraftstrecke. Dies ist unter anderen der Grund, weshalb eine geringere Hubkraft benötigt wird.

Anschließend an diese Versuchsreihen und deren Zwischenfazite konnte ein Modell zur Hubkraftermittlung erstellt werden. Dieses eignet sich dazu, die benötigten Hubkräfte, aufgrund von einfach zu bestimmenden Eingabedaten zu ermitteln. Diese sind der BHD, die Baumhöhe, der Kronendurchmesser und der Rückhang an der Kronenspitze. Aufgrund von idealisierten Annahmen zur Baumgestaltung, welche in den Berechnungsgrundlagen des Kalkulators hinterlegt wurden, liegen die daraus kalkulierten Hubkräfte sowohl über denen des realen Baumes als auch über denen seines digitalen Zwillings. Des Weiteren wurde in der Hubkraftkalkulation der Rückhang in der Kronenspitze im Verhältnis zum Stammmittelpunkt, unter der Annahme eines gradlinigen Stammverlaufs berücksichtigt. Dies sorgte für die Ermittlung des Rückhangs im Schwerpunkt. In dem Hubkraftkalkulator werden sowohl die Kraft für das Versagen der Bruchleiste als auch die Hubkraft zur Verschiebung des Baumschwerpunktes in Bezug zu der Bruchleiste verarbeitet.

Die Anwendung des Hubkraftkalkulators erbrachte die Erkenntnis, dass eine Veränderung des Wassergehalts und des Rohgewichts in Abhängigkeit des Baumzustandes eine kaum wahrnehmbare Einflussgröße auf die Hubkraft darstellt. Eine Erhöhung des Kronendurchmessers bewirkt eine Steigerung der benötigten Hubkraft, welche für die Baumfällung aufgebracht werden muss.

Weiterhin kann eine Veränderung der Einschubtiefe ebenfalls zu einer Hubkraftveränderung führen. Der Rückhang ist im Zuge der Schwerpunktverlagerung ein gewichtiger Faktor für die Größe der benötigten Hubkraft.

Auf Grundlage der Hypothesen, welche zu Beginn der Arbeit aufgestellt wurden, lassen sich zusätzlich für die berechneten und gemessenen Werte folgende Aussagen bestätigen:

- Die benötigte Hubkraft nimmt mit steigendem Rückhang zu.
- Die benötigte Hubkraft nimmt mit der Bruchleistenstärke proportional zu.
- Die höchste Kraft entsteht kurz bevor der Baum sich bewegt.
- Die Hubkraft geht gegen Null, sobald der Schwerpunkt den Kippunkt überschreitet.

6 Diskussion

6.1 Beurteilung der Versuchsdurchführung

Aufgrund der vibrationsarmen Fällung eignen sich die technischen Fällhilfen auch zur Entnahme von Schadholzbuchen. Aus diesem Grund der praktischen Relevanz wurde die Baumart für die Versuchsdurchführung gewählt. Diese fand an Buchen im unbelaubten Zustand statt. Die Buchen besitzen eine stark verzweigte Krone und einen inhomogenen Stammverlauf. Die Messung des Rückhangs erfolgte mittels Bautachymeter. Dadurch war es möglich, den Stammverlauf in guter Näherung an die Realität in einem dreidimensionalen Raum zu vermessen und digitalisiert darzustellen. Alternative Methoden hierzu waren im Rahmen dieser Arbeit nicht realisierbar.

Anhand von Annahmen konnte die Stammform als Kegelstumpf mit einem kreisrunden Stammquerschnitt beschrieben werden. Die Kronenform wurde aufgrund einer Annahme als Kugel beschrieben. Dies ermöglichte eine geometrische Bestimmung der Schwerpunktlage der unterschiedlichen Körper.

Die Lasermessung wurde an unterschiedlichen Messpunkten im Stammverlauf durchgeführt. Aufgrund der Querschnittsform des Stammes wirkt sich eine Verschiebung des Messpunktes in der X-Achse zur Dickenbestimmung auf die Darstellung aus. Aus diesem Grund wurde ein Messwert anhand einer Berechnung in den Stammmittelpunkt korrigiert. Da diese Korrektur die Annahme des kreisrunden Querschnitts berücksichtigt, liegt hierbei eine Berechnung unter einer realitätsnahen Annahme vor.

Der Baum ist ein Naturprodukt, welches den Witterungen ausgesetzt ist. Aufgrund der Baumhöhe und der Kronenmasse führt die Windeinwirkung zu Bewegungen des Baumes. Diese stellen gleichermaßen einen Einfluss auf die Lasermessung dar.

Die Aufnahme der Kronenwerte erfolgte durch eine fotooptische Methode. Hierbei wurde ein Bild der Krone grafisch bearbeitet und der geometrische Mittelpunkt bestimmt. Dieser entspricht bei einem homogenen Körper dem Massenmittelpunkt. Aufgrund der Aufnahme und den unterschiedlichen Entfernungen zur Krone sowie den Objektiveneinstellungen der Kamera entstehen Verzerrungen innerhalb der Bilddatei. Dadurch war es nicht möglich, die Maße aus dem Bild direkt zu übernehmen. Aus diesem Grund wurde der Kronendurchmesser im Vorfeld mittels des Bautachymeters vermessen. Dies ermöglichte eine Vermessung innerhalb der grafischen Darstellung unter der Verwendung eines Korrekturfaktors, welcher aus dem tatsächlichen

Durchmesser und der Bilddarstellung entsteht. Eine Vermessung der Krone mit dem Bautachymeter war aufgrund der Verzweigung der Buchenäste nicht möglich.

Das Gewicht des Baumes ist von dem Wuchsstandort, der Wasserversorgung, der Hanglage und weiteren Baumeigenschaften abhängig. Ein Schätzmodell der FAWF half dabei das Rohgewicht und das Baumvolumen zu bestimmen. Dies ermöglichte es, einen Durchschnittswert des Rohgewichts in Annäherung an die Realität zu ermitteln. Der durchschnittliche Wassergehalt konnte über eine Messung bestimmt werden. Die individuell erhobenen Baumgewichte und der Wassergehalt sind statistisch gesehen jedoch nur für die Versuchsreihe der Ganzbäume aussagekräftig.

Die Hubkraft, welche für die Baumfällung aufgebracht werden muss, besteht aus mehreren Teilbereichen. Darunter die Kraft, welche für das Brechen der Bruchleiste aufgewandt werden muss, sowie die Kraft, welche für die Verlagerung des Baumes benötigt wird. Die Kraft zum Brechen der Bruchleiste ist abhängig von der Biegespannung, dem Kraftangriffspunkt und der Bruchleistengeometrie. Die praktischen Versuche wurden an Hochstümpfen durchgeführt. Dadurch war es möglich, das Volumen und den Schwerpunkt aufgrund der fehlenden Krone genauer zu ermitteln. Die Bruchleiste dient als Drehlager und ist die einzige noch verbliebene Verbindung zwischen Stamm und dem Baumstumpf. Unterschiedliche Spannungsverhältnisse wirken auf die Bruchleiste ein. Neben den Kraftstrecken und der Bruchleistenabmessungen wird die benötigte Kraft auch von der Biegespannung mitbestimmt. Diese variiert bei verändertem Wassergehalt. Auch die Faserrichtung und der Gesundheitszustand des Baumes führen zu einem Verändern der Biegespannung. Aus diesem Grund wurde für diesen Wert eine realitätsnahe Annahme getroffen.

Während der Arbeit wurden die benötigten Daten sowohl rechnerisch als auch aufgrund von Messungen hergeleitet. Daraus konnte ein Abgleich erstellt werden, welcher die Genauigkeit der Berechnung unter der Berücksichtigung der idealisierten Baumdarstellung in Abhängigkeit zu den Messungen ermittelte.

Die Erstellung einer Hilfstabelle und eines Kalkulators am Ende der Arbeit vereinen praktische Einschätzungen des Baumes mit rechnerischen Grundlagen. Dadurch konnte eine für den Anwender nutzbare Hilfestellung gegeben werden, welche Hubkräfte unter welchen Bedingungen notwendig sind.

Ein Vergleich dieser Werte mit den berechneten sowie gemessenen Hubkräften führte zu Abweichungen, welche sich durch die Annahmen begründen lässt. Eine Veränderung einzelner Faktoren hat einen individuellen Einfluss auf den Hubkraftbedarf. Der Kalkulator berechnet die Hubkräfte unter den gesetzten Annahmen, darunter zählt die Geometrie des Baumes, die Bruchleistenausformung und das Gewicht. Des Weiteren wird bei der Anwendung des Kalkulators der Rückhang an der Baumspitze als Eingabewert verwendet. Als Berechnungswert wird allerdings der Rückhang im Schwerpunkt benötigt. Zur Ermittlung dieses Wertes wird der Rückhang in der Krone über das Verhältnis von Baumhöhe und Schwerpunkthöhe auf den Rückhang im Schwerpunkt reduziert.

Aufgrund der unterschiedlichen technischen Fällhilfen, welche dem Anwender zur Verfügung stehen, ist eine Einschätzung der benötigten Hubkraft in Schritten von ca. 50 KN durchaus realitätsnah und ausreichend, da die Fällhilfen von den Herstellern nur in bestimmten Hubkraftstufen gefertigt werden.

6.2 Messfehler und deren mögliche Auswirkungen

Das Bautachymeter misst mit einer Genauigkeit von 3 mm und mit einer Skalierung von 1 mm. Die Witterungen beeinflussen die Messgenauigkeiten. Aufgrund der manuellen Messungen des Baumstammrandes und der Schwingungen der Bäume aufgrund des Windes ist bei den Randmessungen mit einer gewissen Fehlertendenz zu rechnen.

Die Vermessung an der Stammoberfläche führt in Abhängigkeit der tatsächlichen Querschnittsform des Baumes zu Differenzen und Messabweichungen. Diese wirken sich auf den Durchmesser und den Rückhang des Baumes aus. Aus diesem Grund findet die Lasermessung, daraus ableitend die Rückhangberechnung, lediglich anhand einer guten Näherung statt. Bei einer fotooptischen Methode sind Verzerrungen in der Bilddatei vorhanden. Aufgrund der Verrechnungen mehrerer Zwischenfazite summiert sich ein Fehlerwert auf und erhöht somit den Wert der errechneten Hubkraft.

Die Kraftmessdose zeichnet die Kräfte bis zu 500 kN auf. Dabei liegt die Fehlertoleranz bei maximal 0,3 %.

Die Messfehler der statistischen Auswertung liegen bei dem Standardwert von 5 %. Das beschriebene R^2 gibt als Bestimmtheitsmaß an, ob die Streuung durch das gewählte Modell abgebildet werden kann. Eine Gerade kann allerdings nicht immer auf

allen Punkten liegen. Die Messwerte wurden nicht zur Berechnung herangezogen, daher wird die Standardabweichung in den Grafiken nicht erwähnt.

6.3 Risikobewertung

Die Nutzung der technischen Fällhilfen erleichtert die Waldarbeit und reduziert bei fachgerechter Anwendung die Unfallzahlen. Eine Fehleinschätzung des Baumrückhangs und weiterer Faktoren, welche die Hubhöhe und die Hubkraft beeinflussen, kann dazu führen, dass der Baum durch die verwendete Fällhilfe nicht zu Fall gebracht wird. Zur Verhinderung und Absicherung vor einer Fehleinschätzung wurde eine Risikoanalyse erstellt.

Die unzureichende Hubkraft kann im ungünstigsten Fall dazu führen, dass der Baum nicht zu Fall gebracht wird. Möglichkeiten für das weitere Vorgehen sind das Abziehen des Baumes vom Stock mittels Seilwinde oder das Nachsetzen weiterer Keile.

Die positive Differenz zwischen der gemessenen Hubkraft und der, mittels Kalkulator bestimmten Hubkraft, entsteht aufgrund der idealisierten Baumdarstellung. Dadurch lässt sich eine Sicherheit erkennen, welche dafür sorgt, dass die kalkulierten Hubkräfte ausreichend sind, um einen individuellen Baum zu Fall zu bringen.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Die „Hilfstabelle für technische Fällhilfen“ stellt eine praktikable praxisnahe Möglichkeit dar, die notwendigen Hubkräfte bei der Baumfällung im Vorfeld durch den Anwender zu bestimmen.

Ziel des Kalkulators ist es, die benötigte Hubkraft der Entnahmebäume, anhand einfach zu erfassenden Werten zu ermitteln. Die benötigten Hubkräfte für die Baumfällung werden von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Eine durchgeführte Lasermessung half zur Ermittlung der Schwerpunktlage der Versuchsbäume. Anhand von Berechnungen konnte ein Berechnungsmodell erstellt werden, welche den realen Baum als digitalen Zwilling abbildet.

Der Ausblick über Teilbereiche, welche in einer Folgearbeit aufgegriffen werden können, sind die Individualität der Kronen- und Stammform. Dabei könnten weitere Modelle der Baumkrone und des Stammverlaufs erstellt werden. Es besteht die Möglichkeit, die Hubkraftberechnung auf andere Baumarten auszuweiten und die Baumgewichte individueller zu ermitteln. Eingangsgrößen wie Windlast, Kronenformen, Statik des Baumes und Unterschiede der Baumarten könnten dabei genauer betrachtet werden. Abbildung 109 verdeutlicht eine mögliche Kronenform. Aufgrund der technischen Neuerungen im Bereich der fotooptischen Vermessung wäre es denkbar, dieses Verfahren in dem Kronenbereich anzuwenden und das Volumen genauer zu bestimmen. Die Abholzigkeit könnte sich über die Ausbauchungsreihe von Schober, in Abbildung 110, genauer ermitteln lassen. Aufgrund der damit einhergehenden notwendigen umfangreichen automatisierten Berechnung wurde in dieser Arbeit nicht auf die Tabelle eingegangen, sondern eine forstübliche Annahme getroffen.



Abbildung 109: Mögliche Kronenform für eine Berechnung (Eigene Darstellung)

Höhenstufe [m]	Verhältniszahlen der Stammdurchmesser zum Brusthöhendurchmesser = 100 % bei ... m Höhe über dem Boden																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
10	103	97	91	85	78																							
12	103	97	91	86	81	74	67																					
14	103	98	92	88	83	77	71	65	39																			
16	102	97	92	88	84	79	73	70	65	59	52																	
18	102	97	92	89	83	81	78	74	70	65	61	54	48															
20	102	98	93	90	87	84	81	77	74	70	66	61	57	50	44													
22	102	98	93	91	88	86	83	80	77	74	70	66	62	58	53	47	40											
24	102	98	93	91	88	86	83	81	79	76	73	69	66	62	58	53	48	43	37									
26	102	98	94	92	89	87	84	82	80	77	75	72	69	65	62	58	55	50	45	40	34							
28	102	98	94	92	89	87	85	83	81	79	77	74	72	69	66	63	59	56	52	47	43	37	32					
30	101	98	94	92	89	88	86	84	82	80	78	76	74	72	69	66	63	59	56	53	49	44	40	36	31			
32	101	98	94	92	89	88	86	85	83	81	79	77	75	73	71	68	66	63	60	57	53	50	46	42	38	36	30	

Abbildung 110: Ausbauchungsreihe für Buche (Schober et al., 1952)

Quellenverzeichnis

Printmedien

- Balke, H. (2006). *Einführung in die Technische Mechanik: Statik* (2. Auflage). Springer.
- Benner, B. (2007). *Mathematische Ermittlung der Höhe der Seilanbindestelle bei der Rückhängerfällung* [Diplomarbeit]. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg.
- Beruf Forstwirt (7., aktualisierte Auflage). (2019). Ulmer.
- Eber, J. (2017). Elektrisch Keilen. *Forst&Technik* (11), 24–27.
- Erler, J. (2000). *Forsttechnik: Verfahrensbewertung. UTB für Wissenschaft Forstwissenschaft: Bd. 2179*. Ulmer.
- Fischer, S. (2017). *Auswirkungen unterschiedlicher Bruchleistenstärken und Bruchstufenhöhen auf den Kraftaufwand bei der Baumfällung* [Bachelorarbeit]. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg.
- Fischer, U., Kilgus, R., Näher, F., Röhrer, W., Schädlich, P. & Tyroller, H. (1990). *Rechenbuch Metall: Lehr- und Übungsbuch* (25. Aufl.). *Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe*. Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer.
- Gerding, V. & Reiter, C. (2010). Entfernung geht vor Richtung: Eine Untersuchung zur sichereren Anlage von Rückweichen im Laubstarkholz. *Forsttechnische Information* (7+8), 18–21.
- Klugmann, K. (2020). Gefahrenpotential steigt an: Arbeitssicherheit in Schadh Holzbeständen. *ProWALD*, 8–11.
- KWF e.V. (2019). *Waldarbeiter Unfallstatistik*.
- KWF e.V. (2021). *Der Motorsägenführer: Basiswissen für Bediener/Verantwortliche*. unveröffentlicht (vsl. Veröffentlichung 2021) (2. Aufl.). Resch.
- Lippert, K. (2020a). Schwingungsverhalten von Ästen bei der Anwendung unterschiedlicher Fällhilfen. *Forsttechnische Information* (6) (unveröffentlicht (vsl. Veröffentlichung: Dez. 2020)).
- Lippert, K. (2020b). unveröffentlicht.
- Mette, H.-J., Kommert, R. & Bloßfeld, O. (1989). *Holzkundliche Grundlagen der Forstnutzung* (2. Aufl.). *Forstwirtschaft*. Dt. Landwirtschaftsverl.
- Prodan, M. (1965). *Holzmesslehre*. Sauerländer.
- Reetz, M. (2014). Mechanisch - praktisch - gut. *Forstmaschinen Profi* (08), 24–27.

- Ruppert, D. & Lippert, K. (26. Februar 2019a). *Fällhilfen Workshop: ferngesteuerte Fällhilfen*. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt.
- Schaeffler Technologies GmbH & Co.KG. *Technisches Taschenbuch*.
- Schubert, D. (2018). *Quantifizierung der Arbeitsbelastung bei der Holzernte mit dem mechanischen Fällkeil "Nordforest" und herkömmlichen Aluminium-Keilen - eine vergleichende Spiroergometriestudie* [Bachelorarbeit]. Georg-August-Universität, Göttingen.
- Wessolly, L. & Erb, M. (2014). *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle* [Neu-
ausg.]. Patzer.

Weblinks

- aid - Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V. (Hg.). (2015). *Einsatz des mechanischen und hydraulischen Fällkeils*.
<https://docplayer.org/47232764-Einsatz-des-mechanischen-und-hydraulischen-fa-ellkeils.html>
- Andreas Stihl AG & Co.KG. (21. Juli 2020). *90 Jahre STIHL*. <https://geschichte.stihl.de/1960-1969.aspx>
- AtlasCopco. (2006). *Einführung in die Schraubtechnik*. https://www.tc-tuningen.de/cms/upload/wissenswertes/AtlasCopco_EinfuehrungindieSchraubtechnik.pdf
- Block, J., Dieler, J., Gauer, J., Greve, M., Moshhammer, R., Schuck, J., Schwappacher, V. & Wunn, U. (2016). *GEWÄHRLEISTUNG DER NACHHALTIGKEIT DER NÄHRSTOFFVERSORGUNG BEI DER HOLZ- UND BIOMASENUTZUNG IM RHEINLAND-PFÄLZISCHEN WALD: Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 79/16*. Differenzierte Beschreibung des DBU Projekts und der empfohlenen Maßnahmen im FAWF-Mitteilungsband 79. Trippstadt. Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF). <https://fawf.wald-rlp.de/index.php?eID=dump-File&t=f&f=26811&token=5b480ff8c662060088d1858042fb866611901c2b>
- BMEL. (2019). *Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2019*. Bundesministerium. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ergebnisse-waldzustandserhebung-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=7

- Böge, A. & Böge, G. (2011). *Technische Mechanik: Statik - Dynamik - Fluidmechanik - Festigkeitslehre ; mit 15 Tabellen, 22 Arbeitsplänen, 15 Lehrbeispielen und 47 Übungseinheiten* (29., überarbeitete und erweiterte Auflage). Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8107-6>
- Delbrügge, J. (2014). Hasta la vista, Baum. *Forstmaschinen Profi*, 22(4), 32–35.
<https://www.forstmaschinen-profi.de/forstmarkt/forstausrustung/321-hasta-la-vista-baum>
- deritec GmbH. *Baum-Check Arbeitsblatt zur einfachen und schnellen Baumkontrolle nach VTA: Schrägstehende Bäume*. http://www.deritec.de/html/paginas/paginas/pdf/BaumCheck_13.pdf
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (Hg.). (2019). *Positionspapier zur Sicherheitsfälltechnik*. https://www.uksachsen.de/fileadmin/user_upload/Download/Forstbetriebe/Fachbereich-Aktuell-Sicherheitsfaelltechnik.pdf
- Dietz, T., Plakner, A. & Braun, W. (2019). Totholz – das Ende der Arbeitssicherheit? *AFZ - Der Wald*, 65(1), 13–14. https://www.waldwissen.net/technik/holzernte/sicherheit/fva_totholz_arbeitssicherheit/index_DE
- Dubbel, H., Grote, K.-H. & Feldhusen, J. (2011). *Taschenbuch für den Maschinenbau* (23., neu bearb. und erw. Aufl.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-17306-6>
- Fottner, T. (2020). Der Meterstab – ein kleiner Helfer für die sichere Baumfällung. *AFZ - Der Wald* (8), 38–39. http://www.waldbauernschule.bayern.de/mam/cms02/waldbauernschule/dateien/afz_8_20_wbs_faellrichtung_mit_meterstab.pdf
- Grotz, B. (23. Februar 2018). *Drehmoment und Gleichgewicht — Grundwissen Physik*. <https://www.grund-wissen.de/physik/mechanik/drehmoment-und-gleichgewicht.html>
- Haim, G. (2002). von der Fällmaschine zur modernen Motorsäge. *Wald und Holz* (9), 51–54. https://www.waldwissen.net/lernen/forstgeschichte/wsl_faellmaschine_motorsaege/wsl_faellmaschine_motorsaege_originalartikel.pdf
- Hamberger, J. (2003). Wie Mechanisierung und Umweltvorsorge die Forstwirtschaft veränderten. *LWF-Aktuell* (39), 33–36. https://www.waldwissen.net/technik/holzernte/maschinen/lwf_entwicklung_erntemaschinen/index_DE

- Hammer, M. (2018). Hammer und Keil waren gestern. *Forstmaschinen Profi* (3), 30–33. https://bast-ing.de/wp-content/uploads/2019/03/Hammer-und-Keil-waren-gestern_FMP.pdf
- Hartfiel, J. (2003). Arbeitsschutzausrüstung gestern und heute: Eine Entwicklungsgeschichte. *Wald und Holz* (8), 64–67. https://www.waldwissen.net/lernen/forstgeschichte/wsl_arbeitsschutzausruestung/wsl_arbeitsschutzausruestung_originalartikel.pdf
- Kieser, W. & Bopp, W. (2009). Fällen mit der Seilwinde leicht gemacht. *Wald und Holz* (10), 28–31. https://www.waldwissen.net/technik/holzernte/arbeit/wsl_seilwinde/wsl_seilwinde_originalpdf.pdf
- Koller GmbH. (2015). *Betriebsanleitung: Mechanischer Fällkeil*. https://www.grube.de/media/pdf/fd/83/d8/Anl_20-075_j16.pdf
- KWF e.V. (20. September 2020). *Untersuchte & ausgezeichnete Technik und Ausrüstung*. https://www.kwf-online.de/index.php/wissenstransfer/forsttechnik/anerkannte-technik?cookie_538ff0089f57804cb677271f3ae03b1e=accepted
- Landesbetrieb ForstBW (2016). Unfälle bei der Waldarbeit. *Arbeitssicherheit - Auf den Punkt gebracht*, 20. https://www.forstbw.de/fileadmin/forstbw_infothek/forstbw_praxis/arbeitssicherheit_auf_den_punkt/Arbeitssicherheit_2016_Web.pdf
- lehrerfreund.de. (2010). *Hydraulische Presse*. https://www.lehrerfreund.de/media/tecXinha/Hydraulikaufgaben/Hydraulische_Presse_880.png
- Mayer, T. (2020). Mechanische Fällkeile: Leichter und sicherer arbeiten. *Eilbote* (1), 17. <https://www.eilbote-online.com/artikel/mechanische-faellkeile-leichter-und-sicherer-arbeiten-36476/>
- Michels, L. (2017). *Die Ermittlung von Unfallschwerpunkten in der Forstwirtschaft* [Dissertation]. Technische Universität Dresden, Dresden. <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A30337/attachment/ATT-0/>
- Miggitsch, G. (2014) [DE] Mechanischer Fällkeil (AT000000014340U1). <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=AT000000014340U1>
- Nordforest. *Hydraulische Fällhilfe Armstrong: Bedienungsanleitung*. https://www.grube.at/media/pdf/1f/cd/82/Anl_24-027-Hydraul-Faellhilfe.pdf
- NW-FVA. (17. Juni 2019). *Waldschutzinfo: Nr. 06/2019*. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. <https://www.nw->

- fva.de/fileadmin/user_upload/Abteilung/Waldschutz/Waldschutz-Infos_2019/Waldschutzinfo_06-2019_Komplexe_Schaeden_an_Buche.pdf
- Ruppert, D. (2000). Einsatz von hydraulischen Fällhilfen. *Forsttechnische Information* (6+7), 49–50. <http://www.kwf-online.org/fileadmin/dokumente/Informationszentrale/FTI/Archiv/2000/000607.pdf>
- Ruppert, D. (2013). Kraft bis zum Ende: Erfahrung mit der hydraulischen Fällhilfe "Terminator". *Forsttechnische Information*, 65(3+4), 12–14. http://www.kwf-online.org/fileadmin/dokumente/Informationszentrale/FTI/Archiv/2013/FTI_3-4_2013_final.pdf
- Ruppert, D. & Lippert, K. (2019b). Ferngesteuerte Fällhilfen: Ein Quantensprung der Arbeitssicherheit. *Forsttechnische Information*, 71(2), 10–14. https://www.kwf-online.de/images/KWF/Wissen/Veroeffentlichungen/FTI/Archiv/2019/_FTI_02_2019_final.pdf
- Sacher, R. (2006). Hydraulische Fällhilfe. eine Alternative zu schwerer Keilarbeit. *Wald und Holz* (9), 26–27. https://www.waldwissen.net/technik/holzernte/arbeit/wsl_hydraulische_faellhilfen/index_DE
- Schnaitter, M. (2019). *Physiologische Belastung und Zeitbedarf hinsichtlich dem Einsatz von klassischen und mechanischen Fällkeilen bei der Baumfällung* [Bachelorarbeit]. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg. <https://www.forstpraxis.de/wp-content/uploads/Schnaitter-Faellkeile.pdf>
- Schober, R., Grundner, F. & Schwappach, A. F. (1952). *Massentafeln zur Bestimmung des Holzgehaltes stehender Waldbäume und Waldbestände: nach den Arbeiten der deutschen und österreichischen forstlichen Versuchsanstalten* (10. Aufl.). Parey. <https://books.google.de/books?id=xp8eAAAAIAAJ>
- Simanov, V. & Bernacký, R. (2018). *Motorová pila a její historie* (Vydání první). Národní zemědělské muzeum, s.p.o. <https://www.nzm.cz/file/f27eedfd51ac027972d7bfe637e14b20/15736/motorova%20pila.pdf>
- Sitarz, C. (2016). *Der mechanische Fällkeil in der Holzernte: Basiswissen zum mechanischen Fällkeil Nordforest Titan 80*. <https://www.grube.de/blog/der-mechanische-faellkeil-in-der-holzernte/>
- Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau. (2017). *Aktuelles zu Sicherheit und Gesundheitsschutz (B10): Waldarbeit*. Kassel.

- <https://cdn.svlfg.de/fiona8-blobs/public/svlfgonpremiseproduction/a942dd953a4522c3/7eadf0bef35f/b10-broschuere-waldarbeit.pdf>
- (2015) [DE] Fernbedienbarer Spreizkeil zur Fällung von Bäumen (DE202015000321U1). <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=main&content=einsteiger&action=treffer&firstdoc=1>
- Thienel, K.-C. (2016). *Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens - Holz*. Institut für Werkstoffe des Bauwesens - Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften.
- https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwsg-Oe6YrqAhXDk4sKHSDyBFsQF-jAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fwww.unibw.de%2Fwerkstoffe%2Flehre%2Fbachelorstudium%2Fskripte-werkstoffe%2Fholz-2018.pdf%2Fdownload&usg=AOvVaw1NWMkWGleO1_GA9izSM1Rz
- Wagner, R., Hainlein, K. & Sander, S. (2. November 2010). *Kräftepaar und Drehmoment: 1. Semester BA Architektur*. Fachgebiet Bautechnologie, Tragkonstruktion. KIT. http://fgt.ieb.kit.edu/downloads/Statik_und_Festigkeitslehre_3_Vorlesung_WS_1011.pdf
- Will, D., Gebhardt, N., Ströhl, H. & Nollau, R. (2007). *Hydraulik: Grundlagen, Komponenten, Schaltungen* (3., neu bearbeitete und ergänzte Auflage). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34326-4>
- Wittel, H., Muhs, D., Jannasch, D. & Voßiek, J. (2011). *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung* (20., überarbeitete und erweiterte Auflage). Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8279-0>
- Wolff, D. (2004). *Modifikation sicherheitskritischer Verhaltensweisen von Waldarbeitsgruppen durch Fortbildung: Gruppendynamische Prozesse und Vorgesetztenverhalten als Determinanten der Verhaltensbeeinflussung* [Dissertation]. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau. <https://freidok.uni-freiburg.de/fedora/objects/freidok:1365/datastreams/FILE1/content>

mündliche Mitteilung

- Fischer, Knut (Grube KG.): Gespräch über die Verkaufszahlen technischer Fällhilfen
- Gerding, Volker (FBZ Weilburg): Gespräch über Arbeitssicherheit und Holzernte

Anhang

Anhang I: Umfragebogen

Hilfstabelle für technische Fällhilfen		
Umfrage zur Vorbereitung der Bachelorarbeit von Mark-Fabian Franz		
Nutzen Sie Fällhilfen	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Welche Art der Fällhilfen haben Sie im Einsatz	<input type="checkbox"/> mechanische Fällhilfen <input type="checkbox"/> hydraulische Fällhilfen	
Nach welchen Kriterien treffen Sie die Auswahl zum Kauf eines Fällkeiles * *Mehrfachnennung möglich	<input type="checkbox"/> zulässige Hubkraft <input type="checkbox"/> Keilwinkel <input type="checkbox"/> Sympathie Hersteller <input type="checkbox"/> Werbung	<input type="checkbox"/> KWF-geprüft <input type="checkbox"/> Preis <input type="checkbox"/> Recherche/ Testberichte <input type="checkbox"/> praktischer Einsatztest
Kennen Sie die Calmbacher Hilfstabelle	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Arbeiten Sie mit der Calmbacher Hilfstabelle	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Sehen Sie einen Nutzen in der Calmbacher Hilfstabelle	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Finden Sie eine Hilfstabelle für Fällhilfen in Näherung zur Calmbacher Hilfstabelle sinnvoll?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn „nein“, warum? _____	
Was müsste diese Tabelle beinhalten*	<input type="checkbox"/> benötigte Hubhöhe <input type="checkbox"/> benötigte Hubkraft <input type="checkbox"/> Keilwinkel <input type="checkbox"/> Baumhöhe <input type="checkbox"/> BHD <input type="checkbox"/> Baumart (Nadelholz/ Laubholz) <input type="checkbox"/> Rückhang (Neigung) <input type="checkbox"/> Ausarbeitung der Bruchleiste *Bitte mehrere Möglichkeiten ankreuzen	
Würden Sie mit mechanischen/ hydraulischen Fällkeilen stärkere Rückhänger fällen als mit dem klassischen Fällkeil?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn „ja“, warum? _____	
Welche Hubkräfte der Fällkeile sind Ihrer Meinung nach sinnvoll	<input type="checkbox"/> bis 6 Tonnen <input type="checkbox"/> bis 8 Tonnen <input type="checkbox"/> bis 10 Tonnen	<input type="checkbox"/> bis 15 Tonnen <input type="checkbox"/> bis 25 Tonnen <input type="checkbox"/> über 25 Tonnen

Hilfstabelle technische Fällhilfen

1

Abbildung 111: Umfragebogen Teil 1 (Eigene Darstellung)



Bis wieviel Meter Rückhang sollte ein Baum gekeilt werden	<input type="checkbox"/> bis 0,5 m <input type="checkbox"/> bis 1,0 m <input type="checkbox"/> bis 1,5 m	<input type="checkbox"/> bis 2,0 m <input type="checkbox"/> bis 3,0 m <input type="checkbox"/> bis 5,0 m
Spielt, Ihrer Meinung nach, die Baumhöhe beim Fällvorgang mit Keilen eine Rolle?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Begründung: _____	
Ab und bis zu welchem BHD nutzen Sie Fällhilfen (besonders Keile)	<input type="checkbox"/> ab 30 cm <input type="checkbox"/> ab 40 cm <input type="checkbox"/> ab 50 cm <input type="checkbox"/> ab 60 cm	<input type="checkbox"/> bis 60 cm <input type="checkbox"/> bis 70 cm <input type="checkbox"/> bis 80 cm <input type="checkbox"/> bis 90 m <input type="checkbox"/> bis 100 cm <input type="checkbox"/> bis 110 cm
Führen Sie Fällungen von Buchen in den Sommermonaten durch?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Begründung: _____	

Abbildung 112: Umfragebogen Teil 2 (Eigene Darstellung)

Anhang II: Datenlieferung FAWF

Tabelle 12: Datenlieferung FAWF (FAWF)

Baum-Nr.	Baumart	X	Y	BHD	Höhe [m]	Kronenansatz [m]	Kronendurchmesser [m]	Volumen [Fm]	Stammholz [kg]	Stammrinde [kg]	Kroneholz [kg]	KroneRinde [kg]	Schaftrreisig [kg]	Astderbholz [kg]	AstderbholzRinde [kg]	Äste [kg]	Zweige [kg]	Biomasse [kg]	Biomasse [kg]
1	Fichte	41.3	26	45	31.6	15.6	5.5	2.31	576	48.7	189.7	21.1	1.7			73.4	25.8	56.8	993
2	Fichte	40.8	32.9	45	31.8	15.8	5.5	2.32	584.1	49.4	188.8	21	1.7			73.1	25.7	56.5	1'000
3	Fichte	45.5	12.4	43	32.4	16.7	5.3	2.18	576.9	49.4	164	18.5	1.8			61.1	23.2	50.9	946
4	Fichte	2.2	18.3	39.5	32	17.3	4.9	1.84	515.8	44.9	124.2	14.4	1.9			43.8	19.3	42.4	807
5	Fichte	5.1	2.3	39.5	32.4	17.6	4.9	1.86	527.8	46	124.5	14.4	1.9			43.7	19.2	42.2	820
8	Buche	11	31.4	45.5	28	14.4	9.8	2.39	948.7	44.8	265.4	17.2	2.9	130.6	15.5	140.7	44.6	15.4	1'626
9	Buche	46.4	6.5	51.5	26.3	13.5	11.1	2.88	1133.6	51.3	327.4	20.3	2.5	218.9	25.4	190.7	62.5	20.1	2'053
10	Buche	24.1	46	57.5	31.2	16.3	11.2	4.29	1725.5	78.3	464	28.8	2.6	341.8	39.1	236	72	25.4	3'013
11	Buche	2.5	12	62	31.5	16.6	11.8	5.03	2048.2	91.4	540.1	33	2.5	464.5	52.6	279.1	85.3	29.8	3'627
12	Buche	25	45.5	56	31.2	16.3	11	4.06	1637.4	74.8	438.9	27.5	2.7	306.2	35.2	222.1	67.7	24.0	2'836
13	Buche	17.2	32.2	60	34.3	18.1	11.1	5.14	2100.9	95.9	541	33.9	2.7	404.9	46.1	254.4	74.6	27.8	3'582
14	Buche	12.8	46.8	56.5	34.2	17.9	10.6	4.54	1838.1	85.1	482.3	30.7	2.8	317.3	36.5	222.3	64.9	24.5	3'104
15	Buche	37.2	37.6	61	32.5	17.1	11.5	5.03	2044.2	92.1	537.5	33.1	2.6	434.7	49.3	267.5	80.5	28.8	3'570
16	Buche	18.3	17.6	50	27.2	14	10.7	2.81	1111.1	51	315.3	19.8	2.6	193.2	22.6	176.5	56.9	18.8	1'968
17	Buche	17.1	40.5	59.5	30.1	15.7	11.7	4.42	1775.1	79.3	484.8	29.6	2.5	394.5	44.8	257.9	80.1	27.3	3'176
18	Buche	49.4	0.9	64.5	36.1	19.2	11.5	6.26	2586.1	117	649.1	40.3	2.7	543.6	61.3	297	85.5	32.5	4'415
19	Buche	0	13.4	63.5	31.2	16.4	12.1	5.22	2118.9	93.7	565.7	34.2	2.4	514.1	57.9	296.6	91.1	31.4	3'806
21	Buche	45.5	7.6	34.5	18.1	8.9	9.5	0.86	328.7	15.4	109.5	7	2.6	42.6	5.2	81.9	31.2	8.5	633
22	Buche	49.4	38.7	62	33.1	17.4	11.6	5.29	2149.2	96.7	565.9	34.8	2.6	465.4	52.6	277.6	82.8	29.8	3'757
23	Buche	48.3	16.9	69	30.3	16.1	13	5.99	2460.6	106.1	644.8	37.9	2.2	720.2	80.2	358.6	112.5	37.5	4'561
24	Buche	11.6	13.2	64	36.2	19.2	11.4	6.18	2543.9	115.4	643.2	40	2.7	527.5	59.5	291.9	83.8	32.0	4'340
25	Buche	40.6	6.7	46.5	27.2	13.9	10.1	2.42	953.1	44.5	273.8	17.6	2.8	143.6	17	149.6	48	16.1	1'666
26	Buche	30.8	46.3	64	35.8	19	11.5	6.11	2516.9	113.9	636.3	39.5	2.7	527.2	59.5	292.8	84.5	32.0	4'305
28	Buche	43.9	31.5	61	36.1	19.1	11	5.61	2298.1	105.5	582.5	36.7	2.8	432.8	49.2	261.5	74.9	28.8	3'873
29	Buche	35	38.2	58	35.7	18.8	10.6	5.00	2041.9	94.7	523.2	33.3	2.9	352.2	40.4	233.3	67	25.9	3'415
30	Buche	4.3	29.8	55	31.4	16.3	10.8	3.94	1576.7	72.4	429.5	27	2.7	285.4	32.8	213.5	64.7	23.1	2'728
31	Buche	38.7	26.3	47.5	34.3	17.9	9.3	3.21	1301.5	63.1	337.4	22.6	3.2	154.5	18.3	148.6	43	16.9	2'109
32	Buche	17.8	40.4	51.5	33.1	17.3	10.1	3.65	1475.4	69.6	386.9	25.1	3	216	25.2	180.9	53.4	20.1	2'456
33	Buche	26	27.4	41.5	27.5	14	9.3	1.94	765.4	36.9	218.9	14.5	3.1	89.7	10.8	115.1	36.5	12.6	1'304
34	Buche	37.3	38	57.5	28.3	14.7	11.7	3.87	1546.8	68.9	431	26.3	2.4	343.2	39.2	241.4	77	25.4	2'802
35	Buche	13	13.5	41	22.6	11.4	9.9	1.55	602.1	28.1	183.1	11.7	2.7	85.9	10.3	116.1	40.3	12.3	1'093
36	Buche	20	38.3	65.5	35.9	19.1	11.6	6.41	2652.2	119.4	666.8	41.1	2.6	579.4	65.2	307.4	88.8	33.6	4'556
37	Buche	40.7	47.7	62	29.5	15.5	12.2	4.71	1905.2	84	513.2	30.9	2.4	465.6	52.6	283.7	89.4	29.8	3'457

Grün markierte Kopfzeile = Derbholz (über 7 cm)

Gelb markierte Kopfzeile = Reisholz (bis 7 cm)

Anhang III: Basisdaten der Aufnahmen der Ganzbaumversuchsreihe

Anhang 3 zeigt beispielhaft an den Bäumen 11 und 12 die Basisdaten der Ganzbaumversuchsreihe in Tabelle 13. Die Spalten X, Y und Z stellen die Messwerte der Lasermessung dar. Links und rechts sind die Messdaten für den Baumdurchmesser. Die blauen Zeilen zeigen einzelne Lasermesspunkte oberhalb des angenommenen Stammbereich. Die Zeilen, welche in dem Spalten links und rechts ein „x“ enthalten, enthalten Messfehler durch die Lasermessung.

Tabelle 13: Basisdaten der Ganzbaum-Versuchsreihe (Eigene Darstellung)

Baum-Nr.	Abschnitt	Z	X	Y	links	rechts	Durchmesser [m]	Hubhöhe [cm]	Ganzbaumvolumen [Fm]	BHD [m]	Baumart	Wassergehalt [%]	Rohgewicht atro [kg]	i [m]	e [m]
11	bis Fällschnitt	0.55	0	0			0.615	4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	bis Lasermessung	0.95						4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	1. Höhenstufe	0.034	0.044	0.001	0.45	-0.1		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	2. Höhenstufe	3.894	0.231	0.22	0.49	0.016		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	3. Höhenstufe	7.616	0.224	0.501	0.43	0.02		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	4. Höhenstufe	10.86	0.249	0.445	0.45	0.063		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	5. Höhenstufe	12.595	0.362	0.563	0.58	0.13		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	6. Höhenstufe	16.58	0.283	1.088	0.38	0.039		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	7. Höhenstufe	13.223	3.526	-6.747	x	x		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	8. Höhenstufe	21.781	-0.044	1.241	0.11	-0.14		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	9. Höhenstufe	27.267	-0.147	0.993	-0.06	-0.21		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	10. Höhenstufe	27.61	-0.226	0.962	-0.11	-0.23		4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
11	Krone	30		0.941			11.5	4	5.65	0.62	Buche	35.93	641.85	0.3925	0.265
12	bis Fällschnitt	0.48	0	0			0.635	4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	bis Lasermessung	0.72						4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	1. Höhenstufe	0.002	0.027	0.001	0.25	-0.28		4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	2. Höhenstufe	5.384	0.182	-0.083	0.38	-0.05		4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	3. Höhenstufe	8.443	0.234	0.06	0.4	0.01		4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	4. Höhenstufe	10.51	0.063	0.227	0.26	-0.14		4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	5. Höhenstufe	15.23	-0.055	0.481	0.13	-0.18		4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	6. Höhenstufe	19.994	0.08	0.9	0.17	-0.14		4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	7. Höhenstufe	20.535	0.033	0.891	0.14	-0.22		4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	8. Höhenstufe	25.141	0.117	1.239	0.12	-0.02		4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23
12	Krone	30		1.595			8	4	4.57	0.56	Buche	35.93	620.08	0.3175	0.23

i = Druckpunkt bis Bruchleiste

e = Druckpunkt bis Baummittelpunkt

Anhang IV: Basisdaten der Aufnahmen der Hochstumpf-Versuchsreihe

Tabelle 14: Basisdaten der Hochstumpf-Versuchsreihe (Eigene Darstellung)

Baum-Nr.	Abschnitt	Z	X	Y	links	rechts	Durchmesser [m]	Hubhöhe [cm]	Wassergehalt [%]	Rohgewicht atro [kg]	i [m]	e [m]	Fallkerbtiefe [m]	Bruchleistenlänge [m]	Bruchleistenbreite [m]	benötigte Hubkraft [kN]
1	bis Fällschnitt	0.6	0	0			0.7	10	20	622.9	0.29	0.23	0.19	0.69	0.1	150
1	Gesamthöhe	2.5						10	20	622.9	0.29	0.23	0.19	0.69	0.1	150
2	bis Fällschnitt	1	0	0			0.811	7	30	622.9	0.43	0.31	0.23	0.72	0.05	36
2	bis Lasermessung	1.2						7	30	622.9	0.43	0.31	0.23	0.72	0.05	36
2	1. Höhenstufe	0	0.031	-0.004	0.458	-0.34		7	30	622.9	0.43	0.31	0.23	0.72	0.05	36
2	2. Höhenstufe	4.551	0.086	0.144	0.36	-0.26		7	30	622.9	0.43	0.31	0.23	0.72	0.05	36
2	3. Höhenstufe	7.869	0.071	0.158	0.4	-0.15		7	30	622.9	0.43	0.31	0.23	0.72	0.05	36
2	4. Höhenstufe	11.558	0.127	0.304	0.35	0		7	30	622.9	0.43	0.31	0.23	0.72	0.05	36
2	Gesamthöhe	12						7	30	622.9	0.43	0.31	0.23	0.72	0.05	36
3	bis Fällschnitt	0.3	0	0			0.703	6.5	30	622.9	0.405	0.29	0.17	0.6	0.065	120
3	Gesamthöhe	1.5						6.5	30	622.9	0.405	0.29	0.17	0.6	0.065	120
4	bis Fällschnitt	1	0	0			0.57	3	37	622.9	0.28	0.34	0.2	0.61	0.05	17.49
4	bis Lasermessung	1.2						3	37	622.9	0.28	0.34	0.2	0.61	0.05	17.49
4	1. Höhenstufe	0	-0.046	0.005	0.26	-0.34		3	37	622.9	0.28	0.34	0.2	0.61	0.05	17.49
4	2. Höhenstufe	3.356	0.079	-0.21	0.27	-0.27		3	37	622.9	0.28	0.34	0.2	0.61	0.05	17.49
4	3. Höhenstufe	8.08	0.199	-0.125	0.35	-0.18		3	37	622.9	0.28	0.34	0.2	0.61	0.05	17.49
4	4. Höhenstufe	12.119	0.22	-0.653	0.33	-0.23		3	37	622.9	0.28	0.34	0.2	0.61	0.05	17.49
4	5. Höhenstufe	15.223	0.532	-0.735	0.62	0.3		3	37	622.9	0.28	0.34	0.2	0.61	0.05	17.49
4	Gesamthöhe	15.5						3	37	622.9	0.28	0.34	0.2	0.61	0.05	17.49
5	bis Fällschnitt	1	0	0			0.73	8.5	30	622.9	0.36	0.31	0.28	0.7	0.07	35.85
5	bis Lasermessung	1.2						8.5	30	622.9	0.36	0.31	0.28	0.7	0.07	35.85
5	1. Höhenstufe	-0.001	-0.007	0.001	0.25	-0.4		8.5	30	622.9	0.36	0.31	0.28	0.7	0.07	35.85
5	2. Höhenstufe	2.003	-0.05	-0.053	0.14	-0.42		8.5	30	622.9	0.36	0.31	0.28	0.7	0.07	35.85
5	3. Höhenstufe	4.722	-0.133	-0.037	0.09	-0.43		8.5	30	622.9	0.36	0.31	0.28	0.7	0.07	35.85
5	4. Höhenstufe	8.512	0.059	0.12	0.12	-0.37		8.5	30	622.9	0.36	0.31	0.28	0.7	0.07	35.85
5	Gesamthöhe	11						8.5	30	622.9	0.36	0.31	0.28	0.7	0.07	35.85
6	bis Fällschnitt	0.8	0	0			0.79	8	37	622.9	0.46	0.32	0.22	0.72	0.06	27.15
6	bis Lasermessung	1.1						8	37	622.9	0.46	0.32	0.22	0.72	0.06	27.15
6	1. Höhenstufe	-0.001	-0.025	0	0.23	-0.43		8	37	622.9	0.46	0.32	0.22	0.72	0.06	27.15
6	2. Höhenstufe	4.689	0.064	-0.047	0.33	-0.22		8	37	622.9	0.46	0.32	0.22	0.72	0.06	27.15
6	3. Höhenstufe	8.507	0.094	-0.031	0.25	-0.25		8	37	622.9	0.46	0.32	0.22	0.72	0.06	27.15
6	4. Höhenstufe	11.45	0.352	0.043	0.48	0.15		8	37	622.9	0.46	0.32	0.22	0.72	0.06	27.15
6	Gesamthöhe	13.5						8	37	622.9	0.46	0.32	0.22	0.72	0.06	27.15
7	bis Fällschnitt	0.63	0	0			0.55	10	40	622.9	0.27	0.215	0.16	0.56	0.06	23
7	Gesamthöhe	1.43						10	40	622.9	0.27	0.215	0.16	0.56	0.06	23
8	bis Fällschnitt	1	0	0			0.75	9	30	622.9	0.25	0.27	0.23	0.71	0.07	113
8	bis Lasermessung	1.3						9	30	622.9	0.25	0.27	0.23	0.71	0.07	113
8	1. Höhenstufe	0.022	0.065	0.148	0.38	-0.3		9	30	622.9	0.25	0.27	0.23	0.71	0.07	113
8	2. Höhenstufe	1.914	-0.037	0.042	0.28	-0.3		9	30	622.9	0.25	0.27	0.23	0.71	0.07	113
8	3. Höhenstufe	4.599	0.097	0.058	0.3	-0.3		9	30	622.9	0.25	0.27	0.23	0.71	0.07	113
8	4. Höhenstufe	6.87	-0.026	0.026	0.35	-0.35		9	30	622.9	0.25	0.27	0.23	0.71	0.07	113
8	Gesamthöhe	9						9	30	622.9	0.25	0.27	0.23	0.71	0.07	113

Rot = Stümpfe mit einer Höhe von 2 Metern

Anhang V: Basisdaten der Aufnahmen der Baumsimulation

Tabelle 15 stellt die Basisdaten der Baumsimulation dar. Die Neigung in Grad bezeichnet den Winkel des Balkens, welcher den Baum simuliert. Die Maße des Balkens sind für die Schwerpunktberechnung relevant.

Tabelle 15: Basisdaten der Baumsimulation (Eigene Darstellung)

Versuch-Nr.	Neigung [°]	Gesamthöhe [m]	Maße Balken [m]	Gewicht [kg]	Hebellänge [m]	Kraft gemessen [N]	Hubhöhe gemessen [m]
1	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	115.5	0.02
2	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	374	0.066
3	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	224.5	0.035
4	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	308.2	0.058
5	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	178.4	0.029
6	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	115.5	0.02
7	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	374	0.066
8	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	224.5	0.035
9	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	308.2	0.058
10	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.1	178.4	0.029
11	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	63.3	0.038
12	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	193.5	0.125
13	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	121.4	0.072
14	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	170	0.112
15	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	94.9	0.06
16	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	63.3	0.038
17	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	193.5	0.125
18	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	121.4	0.072
19	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	170	0.112
20	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.2	94.9	0.06
21	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	33.3	0.077
22	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	97.3	0.248
23	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	60.8	0.144
24	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	89	0.221
25	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	47.5	0.128
26	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	33.3	0.077
27	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	97.3	0.248
28	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	60.8	0.144
29	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	89	0.221
30	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.4	47.5	0.128
31	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	28.2	0.096
32	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	78.2	0.312
33	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	48.5	0.182
34	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	72.7	0.274
35	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	39	0.146
36	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	28.2	0.096
37	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	78.2	0.312
38	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	48.5	0.182
39	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	72.7	0.274
40	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.5	39	0.146
41	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	22.7	0.115
42	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	69.8	0.372
43	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	39.6	0.215
44	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	61.1	0.327
45	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	31.8	0.175
46	5.45	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	22.7	0.115
47	31.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	69.8	0.372
48	15.4	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	39.6	0.215
49	27	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	61.1	0.327
50	11.5	1.66	0.1 x 0.1	9.945	0.6	31.8	0.175

Anhang VI: Protokoll der Baumstumpf-Vermessung der Vollbäume

Die Abbildung 113 zeigt das Protokoll für die Aufnahme der Messdaten am Baumstumpf.

Baum Nr:		
IST-Werte	Werte [cm]	Bezeichnung
Durchmesser in Fällrichtung		a
Druckpunkt bis Fallkerbrand		b
Druckpunktastand		d
Stockmittelpunkt in Fällrichtung		c
Bruchleistenlänge		f
Fläche Baumstumpf gesamt [cm ²]		
Bruchleistenstärke min		k _{min}
Bruchleistenstärke max		k _{max}
Bruchleistenstärke Mittel		k
Bruchleistenfläche IST		k _A
Bruchstufe min		n _{min}
Bruchstufe max		n _{max}
Bruchstufe Mittel		n
Fallkerbtiefe		m
Bruchleiste zu Fällhilfenrand außen		j
Bruchleiste zu Fällhilfenrand innen		h
Mittelpunkt Fällhilfe bis Bruchleiste		d-(c+F)
Entfernung Druckpunkt zu Mittelpunkt Baumstumpf		i
Hubhöhe Start		HH ₁
Hubhöhe nach Fällung		HH ₂
benötigte Hubhöhe		HH ₂ -HH ₁
benötigte Maximalkraft [kN]		kN _{max}
benötigte Kraft [bar]		bar _{max}
SOLL-Werte		
Bruchleistenstärke		a*0.10
Bruchstufenhöhe		a*0.10
Fallkerbtiefe min		a*0.20
Fallkerbtiefe max		a*0.33
Differenz SOLL zu IST		
Bruchleistenstärke		
Bruchstufenhöhe		
Fallkerbtiefe max		
Fallkerbtiefe min		
Bruchleistenfläche		

Abbildung 113: Protokoll der Baumstumpf-Messung (Eigene Darstellung)