



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Mechanische Ersatzmodelle

für Seilschaftsstürze am Gletscher

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinz Bodo Schmiedmayer

(E325 Institut für Mechanik und Mechatronik, Bereich: Technische Dynamik und Fahrzeugdynamik)

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Edelmann

(E325 Institut für Mechanik und Mechatronik, Bereich: Technische Dynamik und Fahrzeugdynamik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Martin Cerny

0728238 (E 066 482)

Neulerchenfelder Straße 10/1/27

1160 Wien

Wien, im September 2020

Martin Cerny



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im September 2020

Martin Cerny

Danksagung

Einen herzlichen Dank an Prof. Schmiedmayer und Ass. Prof. Edelmann für die Möglichkeit meine Diplomarbeit in einem Gebiet zu schreiben, das mir sehr am Herzen liegt. Dieser Umstand hat so manche Mühsal im Rahmen dieser Arbeit erträglicher gemacht.

Weiters möchte ich mich bei Prof. Ecker und Ing. Neumann für die Hilfe zu jeder Tages- und Nachtzeit bei der Durchführung der Seilversuche bedanken. Speziell die Messtechnik wurde dadurch wesentlich handhabbarer.

Ein besonderer Dank geht auch an Andre Kluge von Mammut für seinen Input zu den Seilversuchen und an die Fa. Mammut im Allgemeinen für das kostenlose zur Verfügung stellen eines Probeseils. Weiters an Martin Schlemmer von Edelrid, dafür dass er sich die Zeit genommen hat mir den Aufbau von Bergseilen im Detail zu erklären.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Mutter und meiner Freundin dafür, dass Sie mich mein ganzes Studium über und speziell während meiner Diplomarbeit, immer unterstützt haben und für mich da waren. Ohne sie wäre das alles nicht möglich gewesen.

Zu guter Letzt auch einen herzlichen Dank an meine beiden Chefs die mir immer den nötigen Freiraum für mein Studium gegeben und mich unterstützt haben.

Für Sir George Mallory, Walter Bonatti, David Lama und all die großartigen Bergsteiger, deren Leistungen mich inspiriert haben immer weiter zu machen, auch wenn es für Andere nicht immer verständlich war.

„Because it's there“

- George Mallory

Kurzfassung

Diese Arbeit gibt zuerst einen Überblick über die Unfallstatistik für Alpinunfälle in vergletschertem Gebiet. Anschließend werden die nötigen Grundbegriffe des Bergsteigens in vergletscherten Gebieten erläutert. Danach folgt ein Überblick über den Stand der Wissenschaft in den Bereichen: Schnee, Firn und Eis; Gletscher; Bergseile; an haltenden Seilschaftsmitglieder in unterschiedlichen Szenarien wirkende Kräfte sowie eine Einschätzung der menschlichen Reaktionsfähigkeit in dieser Situation.

Anschließend wird, um ein genaueres Ergebnis durch das mechanische Ersatzmodell zu erzielen, das dynamische Verhalten ausgewählter Bergseile durch Versuche mit einer Fallmasse untersucht.

Den Abschluss bildet die Erstellung eines mechanischen Ersatzmodells für den Seilschaftssturz auf einem Gletscher und die Simulation mehrerer Sturzscenarien mittels Matlab.

Abstract

This thesis first gives an overview of the accident statistics for accidents happening in alpine regions on glaciers. Next an explanation of the different terms of mountaineering in glaciated regions is given, followed by an overview of the state of science concerning: Snow, firn, ice; glaciers; mountaineering ropes; forces acting on holding rope team members in different scenarios, as well as an estimation of the response time under these circumstances.

To determine the dynamic behavior of certain mountaineering ropes experiments are conducted. This helps to achieve better results with the mechanical model.

Finally, a mechanical model for rope team accidents on glaciers is given. This is thereafter used to perform a simulation of certain scenarios of rope team accidents using Matlab.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
2 Grundlagen	4
2.1 Historischer Überblick.....	4
2.2 Alpine Unfallstatistiken	5
2.3 Lehrmeinung	11
2.4 Methoden der Kameradensicherung	16
3 Stand der Wissenschaft	17
3.1 Schnee, Firn und Eis	17
3.1.1 Begriffsdefinition	17
3.1.2 Molekulare Struktur.....	19
3.1.3 Mechanisch-physikalische Eigenschaften von Schnee und Eis	20
3.1.4 Bergsteigerische Praxis	23
3.2 Der Gletscher	24
3.3 Seile	27
3.3.1 Seilmaterialien	27
3.3.2 Norm für dynamische Bergseile	30
3.3.3 Norm für statische Bergseile	37
3.3.4 Aufbau von Seilen.....	38
3.3.5 Auswirkung der Seileigenschaften auf das Halten von Spaltenstürzen	40
3.4 Mechanik.....	41
3.4.1 Stürze auf Gletscherhängen	41
3.4.2 Stürze beim Gehen am kurzen Seil	45
3.4.3 Spaltenstürze.....	47
3.5 Menschliche Faktoren (Reaktionsgeschwindigkeit).....	48
4 Entwicklung des mechanischen Ersatzmodells	52
4.1 Einflussparameter im Sturzfall.....	54
4.2 Mechanische Eigenschaften des Seils	60

4.2.1	Versuchsaufbau	62
4.2.2	Versuchsablauf	69
4.2.3	Daten der Seilproben	74
4.2.4	Statische Ergebnisse	75
4.2.5	Dynamische Ergebnisse	82
4.2.6	Zusammenfassung der Materialparameter	98
4.3	Fallgeschwindigkeit	102
4.4	Mechanisches Ersatzmodell.....	105
4.4.1	Phase der Beschleunigung	105
4.4.2	Phase der Spannung des Seils.....	106
4.4.3	Phase des Fangstoßes	110
4.4.4	Phase der Beschleunigung des haltenden Seilschaftsmitglieds	113
4.4.5	Phase der Bremsung	115
5	Simulation	117
5.1	Sturz auf einem Hang, ohne aktive Bremsung, ohne Spaltensturz	119
5.2	Sturz auf einem Hang, mit aktiver Bremsung, ohne Spaltensturz	124
5.3	Sturz auf einem Hang, mit Spaltensturz	128
6	Diskussion.....	131
7	Literaturverzeichnis	134
8	Abbildungsverzeichnis	138
9	Tabellenverzeichnis	141

1 Einleitung

Die steigende Zahl an Menschen im Gebirge (Österreichischer Alpenverein, 2019) und äußere Faktoren wie die globale Erwärmung führen dazu, dass Aspekte wie die richtige Ausrüstung und eine gute Ausbildung immer wichtiger für Bergsteiger werden. Gleichzeitig erscheinen Berichte über Personen, die sich überschätzten (ORF, 2019), oder mit falscher Ausrüstung im Hochgebirge unterwegs sind (Heute, 2019).

Alpine Vereine wie der Österreichische Alpenverein bieten deshalb umfangreiche Ausbildungsprogramme für Interessierte, evaluieren laufend ihre Ausbildungsstandards und veröffentlichen abschließend Empfehlungen in Form von Lehrmeinungen in Fachzeitschriften. Da sich trotz allem immer wieder Abstürze, auch größerer Seilschaften, ereignen (Schubert, 2016, S. 215ff), soll die gegenständliche Arbeit zu diesem Prozess beitragen, indem es die momentane Lehrmeinung zum Gehen einer Seilschaft auf einem Gletscher untersucht. Dabei sollen mithilfe eines mechanischen Ersatzmodells die Auswirkungen von Stürzen für unterschiedliche Seilschaftszusammensetzungen unter variablen Umweltbedingungen untersucht werden.

Die Arbeit bezieht sich dabei auf die im Alpenraum anzutreffenden Verhältnisse.

Es wurde sehr darauf Bedacht genommen geschlechtsneutrale Formulierungen zu verwenden. Sollte dennoch einmal eine geschlechtsspezifische Formulierung verwendet werden, so gilt diese sinngemäß für beide Geschlechter.

2 Grundlagen

Nach einem kurzen historischen Überblick über die hochalpine Besteigungsgeschichte folgt die Aufarbeitung der alpinen Unfallstatistik für Österreich. Anschließend wird ein Überblick über die momentane Lehrmeinung zum angeseilten Gehen von Gletscherseilschaften gegeben. Dadurch soll der Rahmen für die Ausarbeitung des Stands der Wissenschaft im nächsten Kapitel geschaffen werden.

2.1 Historischer Überblick

Die Berge faszinieren die Menschen seit jeher. Die unerreichbar scheinende Ferne der großen Berge und ihre Gewalt in Form von Steinschlag und Lawinen brachte Menschen dazu Ihnen göttliche oder dämonische Eigenschaften zuzuschreiben, wie dem griechischen Olymp als Sitz der Götter. (Grupp, 2008, S. 15)

Ab der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts entwickelte sich mit der Besteigung der berühmtesten Alpengipfel langsam das moderne Bergsteigen. Etwa mit der des Mont Blanc (1786), des Großglockners (1800) (Grupp, 2008, S. 43), oder des Matterhorns (1865) (Ibid., S. 64). In weiterer Folge setzte eine Entwicklung ein weg von einer Nische, hin zu einem Sport für ein immer breiter werdendes Publikum (Ibid., S. 41). Begleitet wurden Besteigungen immer von spektakulären Unglücken, wie jenes im Zuge der Erstbesteigung des Matterhorns, oder dem der versuchten Everestbesteigung 1924 durch Mallory und Irvine (Ibid., S. 82).

Zwischen den beiden Weltkriegen wurde mit dem Expeditionsbergsteigen eine neue Dimension im Höhenbergsteigen erreicht. Gipfelsiege wurden dabei häufig stark politisch genutzt und entsprechend inszeniert. (Grupp, 2008, S. 81ff)

Ab den 1970er Jahren stand beim Höhenbergsteigen nichtmehr ausschließlich der Gipfel im Mittelpunkt, sondern es wurde wichtiger diesen über eine schwierigere Route, im Alpinstil, das bedeutet ohne Höhenträger und ohne Lagerkette, ohne zusätzlichen Sauerstoff, oder auch im Winter zu erreichen (Grupp, 2008, S. 85f).

Die jüngste Vergangenheit ist geprägt von einer immer stärkeren Entwicklung des Bergtourismus auf der einen und einer immer stärkeren Professionalisierung des Bergsports auf der anderen Seite. Begleitet wird diese Entwicklung von steigendem Medieninteresse, nicht nur, aber besonders an tragischen Unfällen. Diese sind nicht nur, aber immer wieder auch auf unzureichende Ausbildung oder Ausrüstung zurückzuführen. (Grupp, 2008, S. 358ff)

2.2 Alpine Unfallstatistiken

Spektakuläre Unfälle gibt es im Bergsport immer wieder. In die Medien und damit in die allgemeine Wahrnehmungen schaffen es für gewöhnlich aber nur besonders schlimme Unfälle, wie jener im August 2017 als eine ganze Seilschaft während des Aufstiegs über das Wildgerloskees auf den Gabler verunglückte (APA, 2017). Andere Beispiele sind Unglücke, die bekannte Bergsteiger betreffen. Etwa der Tod von Ueli Steck am 30. April 2017 am Nuptse (Geiger, 2017). Um einen besseren Überblick über die tatsächlichen Fallzahlen abseits der medialen Aufmerksamkeit zu geben wird hier die österreichische Unfallstatistik mit Blick auf Hochtourenunfälle und deren Ursachen aufgearbeitet.

Das Österreichische Kuratorium für Alpine Sicherheit liefert für Österreich gemeinsam mit der Alpinpolizei des Bundesministeriums für Inneres (BM.I) eine sehr detaillierte Auflistung von registrierten Unfällen. Aufgeschlüsselt sind diese nach Bergsportdisziplin und unterteilt in Unterkategorien, wie Unfallart, Alter, Geschlecht, usw. Die Rohdaten wurden vom Kuratorium für Alpine Sicherheit dankenswerter Weise für diese Arbeit zur Verfügung gestellt und mit Matlab R2018b ausgewertet. Diese Rohdaten enthielten alle registrierten Unfälle vom 01.11.2015 bis zum 31.10.2017 in den Disziplinen Kombinierte Tour/Hochtour, Hochtouren und (Schi-)Tour, auf die die Kriterien „Absturz, Spaltensturz, Sturz/Stolpern/Ausgleiten“ als Unfallursache zutreffen. Die Liste der Hochtourenunfällen wurde am 29.05.2019, die der Skitourenunfälle am 05.06.2019 abgefragt. Da die Statistiken auf den Unfallerhebungen der Österreichischen Alpinpolizei beruhen, ist zu beachten, dass in diesen Statistiken primär Unfälle aufscheinen, die das Eingreifen von Einsatzkräften erforderten. Da die Daten erst seit 2006 in einer gemeinsamen Datenbank des Österreichischen Kuratoriums für Alpine Sicherheit und dem BM. I / Alpinpolizei digital erfasst werden und die Datenlage für 2005 dürftig ist, werden zur Vermeidung von Ungenauigkeiten durch unterschiedlicher Erfassungsmethoden, in dieser Auswertung nur Daten ab 2006 herangezogen. (Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit, 2016)

Die Auswertung der Rohdaten ist in Abbildung 1 dargestellt. Sie ergab für diesen Zeitraum 2232 Verunfallte (= Summe aller Toten, verletzten und unverletzten Personen) bei 1784 Unfällen. Da die Aussagekraft aufgrund der großen Unterschiede der Unfallursache – die Bandbreite leicht vom Pistenunfall bis zum Unfall im alpinen Gelände bei Hochtouren – sehr gering ist, wird nachfolgend nur kurz die grafische Darstellung der Jahresübersicht mit linear approximierter Trendlinie (grüne Gerade) angegeben. Dabei zeigt sich ein leichter Anstieg der mittleren Unfallhäufigkeit mit einem Determinationskoeffizienten von $R^2 = 0.64$

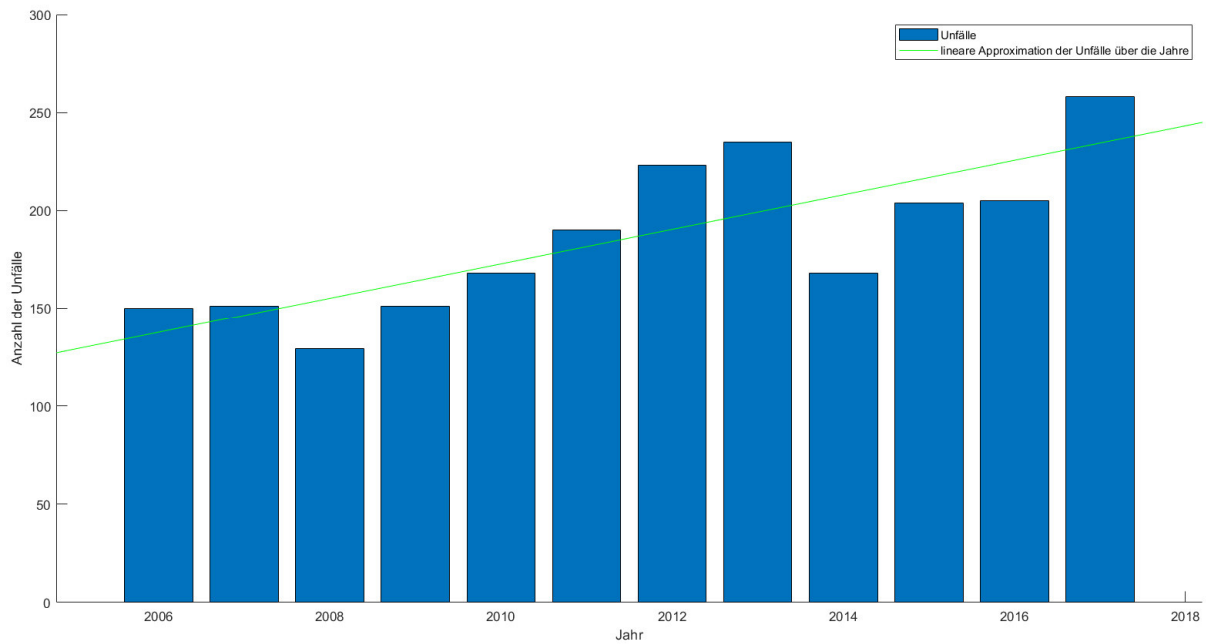


Abbildung 1: Unfallstatistik entsprechend den Rohdaten des Kuratoriums für Alpine Sicherheit für Kombinierte Tour/Hochtour, Hochtouren, (Schi-)Tour, auf die die Kriterien „Absturz, Spaltensturz, Sturz/Stolpern/Ausgleiten“ als Unfallursache zutrafen (Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit / BM.I Alpinpolizei)

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf Hochtouren liegt, ist die Statistik der auf Hochtouren erfassten Unfälle für den Betrachtungszeitraum in Abbildung 2 dargestellt.

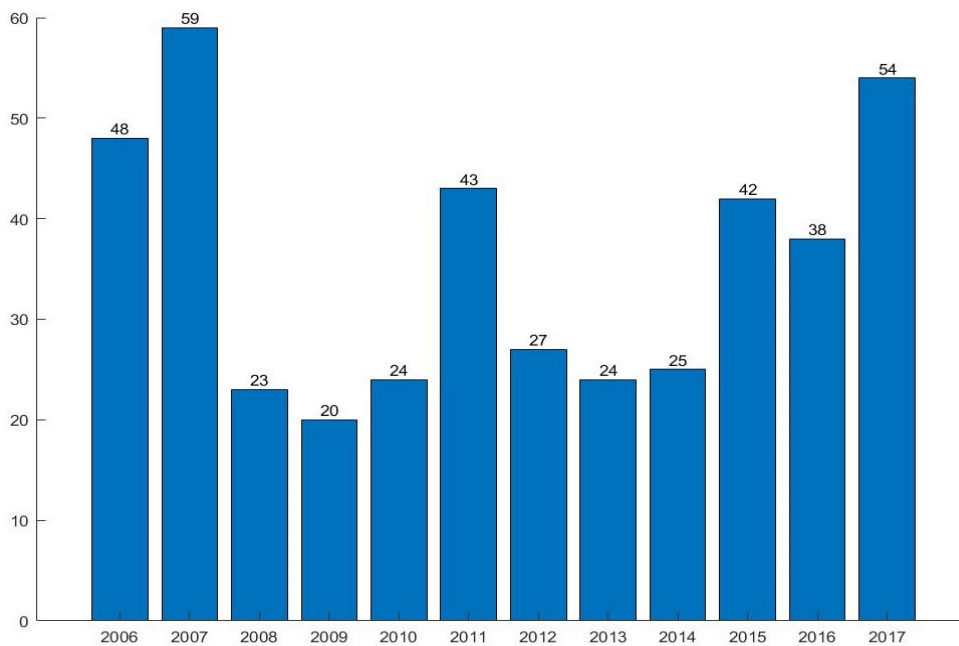


Abbildung 2: Erfasste Unfälle auf Hochtouren 2006-2017 (Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit / BM.I Alpinpolizei)

Interessant ist, dass von den im Betrachtungszeitraum registrierten 427 Verunfallten, zum Zeitpunkt des Unfalls lediglich 241 Verunfallte auf Gletschergelände unterwegs waren. Häufig geschehen Verletzungen im Zu- und Abstieg, oder beim Klettern auf Graten.

Die weiteren Statistiken in diesem Kapitel, die aus den Daten des Österreichischen Kuratoriums für Alpine Sicherheit und dem BM. I / Alpinpolizei abgeleitet wurden, beziehen sich immer auf den gesamten Betrachtungszeitraum.

Bei der Unfallursache ist aus Abbildung 3 ersichtlich, dass mehr Unfälle durch „Sturz, Stolpern, Ausgleiten“ passierten als in allen übrigen Kategorien zusammen. Bemerkenswert ist die vergleichsweise hohe Zahl an Spaltenstürzen. In der Praxis ist sogar mit einer noch etwas höheren Zahl zu rechnen, da es für eine gut ausgebildete Seilschaft nicht immer nötig ist Fall eines Spaltensturzes den Notruf zu verständigen. Die Statistik gibt aber einen guten Richtwert für die österreichischen Alpen. Wurde ein Unfall von der Alpinpolizei mehreren Kategorien zugeordnet, etwa wenn ein Ausgleiten zu einem Absturz führte, so wird der Unfall für diese Auswertung der ursächlichen Kategorie, im Beispielfall also „Sturz, Stolpern, Ausgleiten“, zugeordnet.

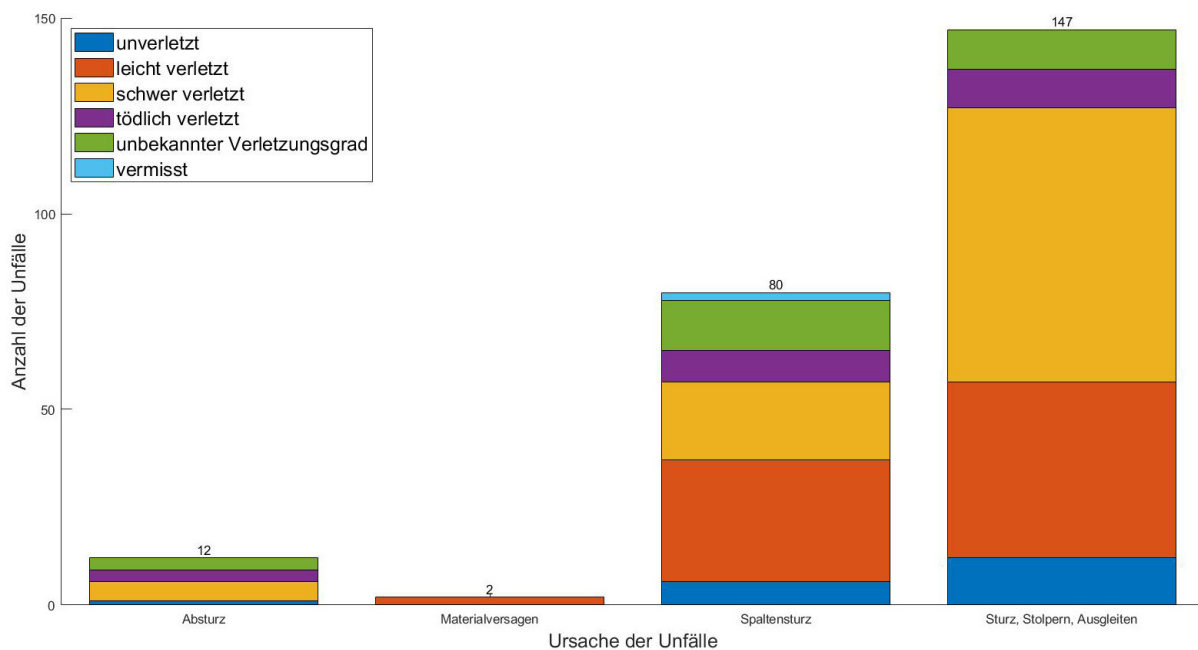


Abbildung 3: Erfasste Hochtourenunfälle auf Gletschern nach Unfallursache (Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit / BM.I Alpinpolizei)

Da in dieser Arbeit speziell das Risiko von Mitreissunfällen behandelt wird, erfolgt die nächste Selektion danach, ob die Personen angeseilt waren. Die betreffende Auswertung ist in Abbildung 4 dargestellt.

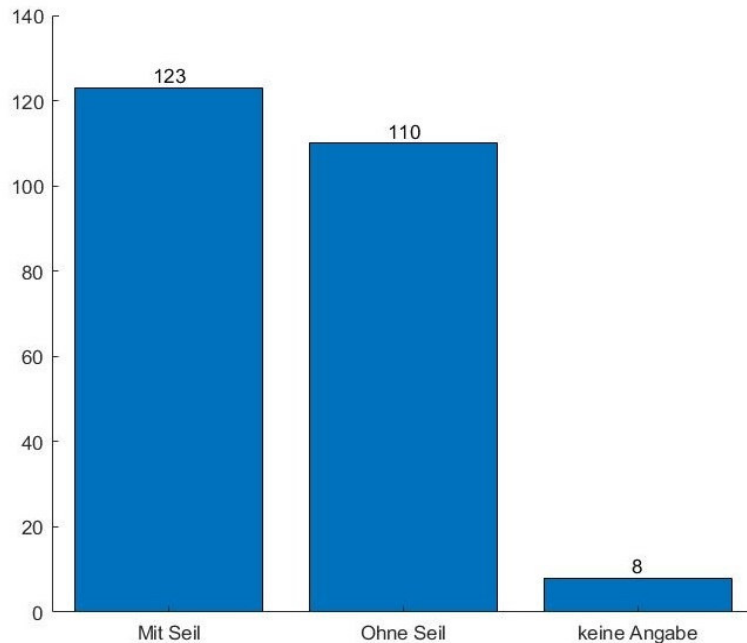


Abbildung 4: Seilnutzung auf Gletschern bei Hochtouren
(Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit / BM.I Alpinpolizei)

Da nicht nur Hochtouren, sondern auch Skitouren in vergletschertes Gebiet führen können, wird hier, auch wenn in dieser Arbeit primär auf klassische Hochtouren eingegangen wird, auch ein kurzer Überblick über die betreffende Skitouren-Unfallstatistik gegeben.

Für die Disziplin (Schi-)Tour war im Betrachtungszeitraum bei 1805 Verunfallten nur von 6 Verunfallten bekannt, dass sie unangeseilt waren und von keinem einzigen Verunfallten, dass er angeseilt war. Zu den übrigen 1799 Verunfallten gab es keine Angaben. Nur eine dieser sechs Personen war nach der Definition der Alpinpolizei auf einem Gletscher unterwegs, wobei drei Personen über 3000m, also in einer tendenziell vergletscherten Höhe, unterwegs waren und weitere zwei zwischen 2500m und 3000m, also in einer Höhe, in der es in den Ostalpen noch Vergletscherungen gibt. Diese Unterschiede sind dadurch erklärbar, dass sich Personen beispielsweise auch bei Gipfel Auf- und Abstiegen verletzen, die nicht zwangsläufig auf einem Gletscher erfolgen müssen.

Bei einer Filterung der Unfälle nach (Schi-)Touren auf Gletschern ergeben sich 62 Verunfallte, die sich entsprechend Abbildung 5 aufteilen.

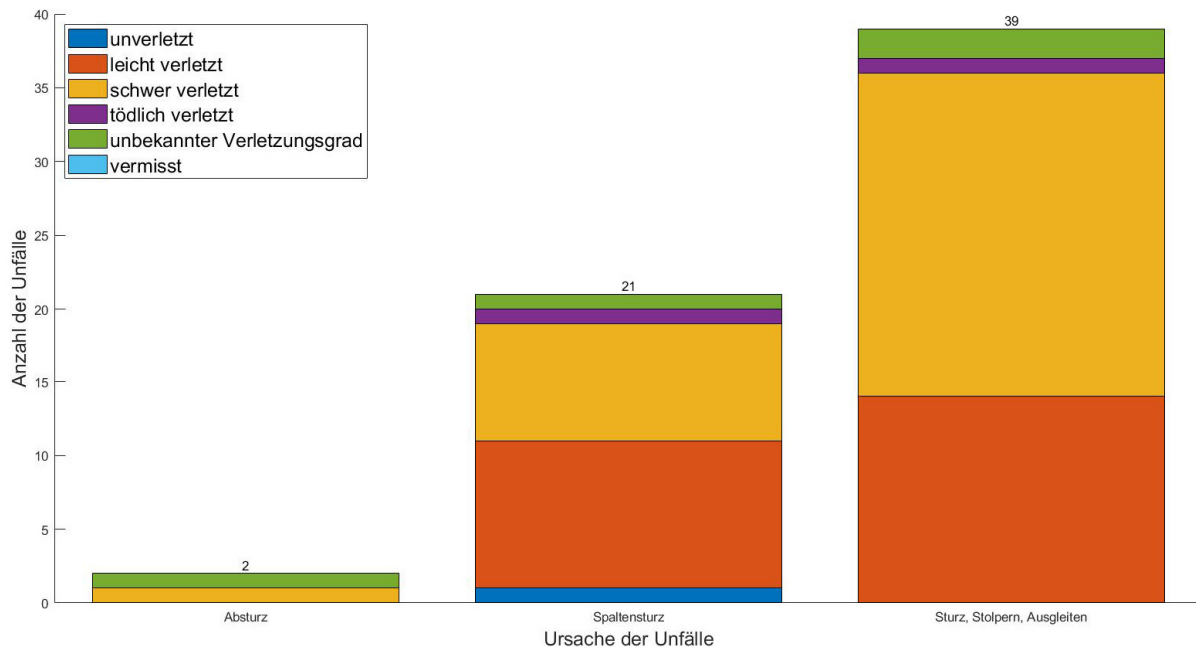


Abbildung 5: Unfallursachen bei Skitouren auf Gletschern
(Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit / BM.I Alpinpolizei)

Als weiterer Schritt wird eine Analyse der Höhe durchgeführt, in der sich die Unfälle jeweils ereigneten. Die Auswertung ist Abbildung 6 zu entnehmen.

Unfällen mit einer Höhenangabe von „0“ ereigneten sich in unterschiedlichem Gelände. Mangels anderer Angaben wird davon ausgegangen, dass sich die genaue Unfallhöhe nichtmehr ermitteln ließ. Aufgrund dieser Unbestimmtheit werden diese Unfälle nicht weiter berücksichtigt.

Diese Statistik ist insofern interessant, da, wie bereits beschrieben, bei Touren über 3000m in Österreich Gletscherberührung wahrscheinlich und zwischen 2500m und 3000m durchaus möglich ist.

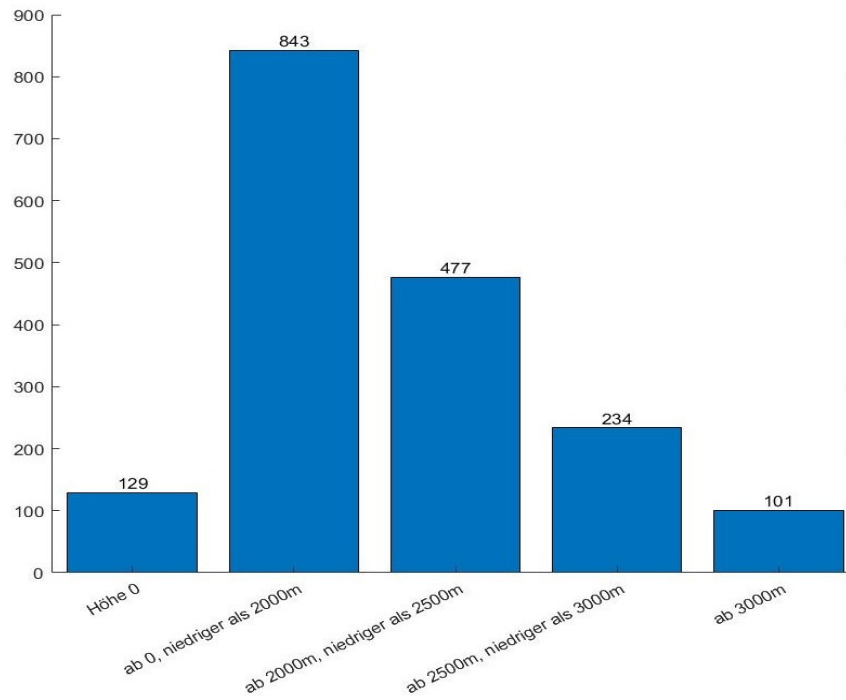


Abbildung 6: Höhenverteilung der Unfälle auf Skitouren
(Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit / BM.I Alpinpolizei)

Auch für die Schweiz ist die mit Abstand häufigste Todesursache Sturz/Absturz (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 20).

Für den Zeitraum 1986-2015 liegt für die Schweiz weiters eine in jeweils 10 Jahre gestaffelte Statistik für Unfälle mit Todesfolge auf Hochtouren durch Stürze aus großer Höhe vor. Die Werte wurden gemittelt um eine bessere Vergleichbarkeit der Zeiträume ohne zu starke Gewichtung der jährlichen Schwankungen zu erreichen. Im Zeitraum 1986-1995 gab es etwa 22, 1996-2005 etwa 24 und 2006-2015 etwa 19 Todesfälle. Besonders auffällig ist dabei, dass sich die Anzahl der Mitreißunfälle von 15 (1986-1995), auf 13 (1996-2005) und schließlich auf 9 (2006-2015) reduziert haben, während die Anzahl der Todesfälle bei Alleingängen stieg. (Winkler, Hasler, & Mosimann, 2017)

2.3 Lehrmeinung

Da, wie in Kapitel 2.2 dargelegt, Abstürze auf Hochtouren im Mittel das höchste Risiko darstellen ist die richtige Seilnutzung ein wichtiger Teil der Unfallprävention. Der Österreichische Alpenverein hält dazu in seinem Lehrbuch „Sicher am Berg“ fest:

Gerade im Übergangsbereich zwischen flachem und steilem bzw. leichtem und schwerem Gelände ereignen sich viele Unfälle aufgrund unklarer Sicherungsanforderungen oder Bequemlichkeit. Deshalb gehen wir im Absturzgelände nie am Gletscherseil, sondern sichern von Fixpunkt zu Fixpunkt oder gehen – gesichert an Zwischensicherungen – am laufenden Seil.

(Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 21)

Unter „Fixpunkt“ wird in diesem Zusammenhang ein fester Punkt verstanden, der den möglichen Sturz eines Seilschaftsmitglieds halten kann, ohne zu versagen. In Frage kommen dafür unter anderem: Bohr- und Normalhaken, Felsblöcke und -köpfe, mobile Sicherungsgeräte und T-Anker. (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 181ff)

Es wird bei Fritz, Larcher, & Mössmer (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016) nicht unmittelbar darauf eingegangen wird was unter „Absturzgelände“ zu verstehen ist. Später wird jedoch folgende Definition angegeben, was unter „Kombinierten Touren und Eiswände“ zu verstehen ist:

Weite Teile einer solchen Tour erstrecken sich nicht auf Gehgelände, sondern auf absturzgefährdetes Klettergelände über 45 Grad Neigung [...]

Es wird daher im Folgenden für diese Arbeit eine Steigung von 45 Grad als Grenze für absturzgefährdetes Gelände angenommen.

Bei Hochtouren kommt folgende persönliche Sicherheitsausrüstung (PSA) zum Einsatz:

- Steigeisen mit Antistollenplatte (mindestens 8 Zacken, klassisch 10-12);
- Pickel (ohne Handschlaufe, bevorzugt mit Stahlhau und Schaufel);
- Hüftgurt (ungepolstert; bei schwerem Rucksack, übergewichtigen Personen oder Kindern in Kombination mit einem Brustgurt);
- Seil (Einfachseil als Universalseil, Halbseil nur wenn keine Gefahr großer Kantenbelastungen oder freien Falls besteht);
- Karabiner (zum Einbinden werden entweder ein 3-Wege Karabiner, oder zwei gegengleich eingehängte Karabiner verwendet, wobei dann zumindest einer ein Schraubkarabiner sein muss);
- Reepschnüre und Bandschlingen (werden bei Bedarf zum Standplatzbau und für Rettungstechniken eingesetzt);
- Eisschrauben (werden bei Bedarf zum Standplatzbau eingesetzt);
- Seilklemmen (werden bei Bedarf zum Aufstieg am Fixseil oder für Rettungstechniken eingesetzt);
- Helm (als Schutz vor Steinschlag);

(Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 37ff)

Zum Anseilen auf Gletschern hält der Österreichische Alpenverein fest:

Die Lehrmeinung des Alpenvereins für Hochtouren im Sommer lautet:

Firn- oder schneebedeckte Gletscherflächen werden angeseilt und in Gletscherseilschaften begangen. Ausnahmen können apere Gletscher bilden.

(Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 177)

Da das Risiko im Falle eines Spaltensturzes von Seilschaftsmitgliedern mitgerissen zu werden mit der Größe der Seilschaft abnimmt empfiehlt der Österreichische Alpenverein die abhängig von der Seilschaftsgröße in Abbildung 7 gezeigten Anseiltechniken (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 177). Zu erkennen sind in Abbildung 7 die für Zweier- und Dreierseilschaften dringend empfohlenen Bremsknoten. Diese sollen sich im Fall eines Spaltensturzes in den Spaltenrad „einfressen“ und damit das Halten eines Spaltensturzes erleichtern (Schubert, 2016, S. 220f).

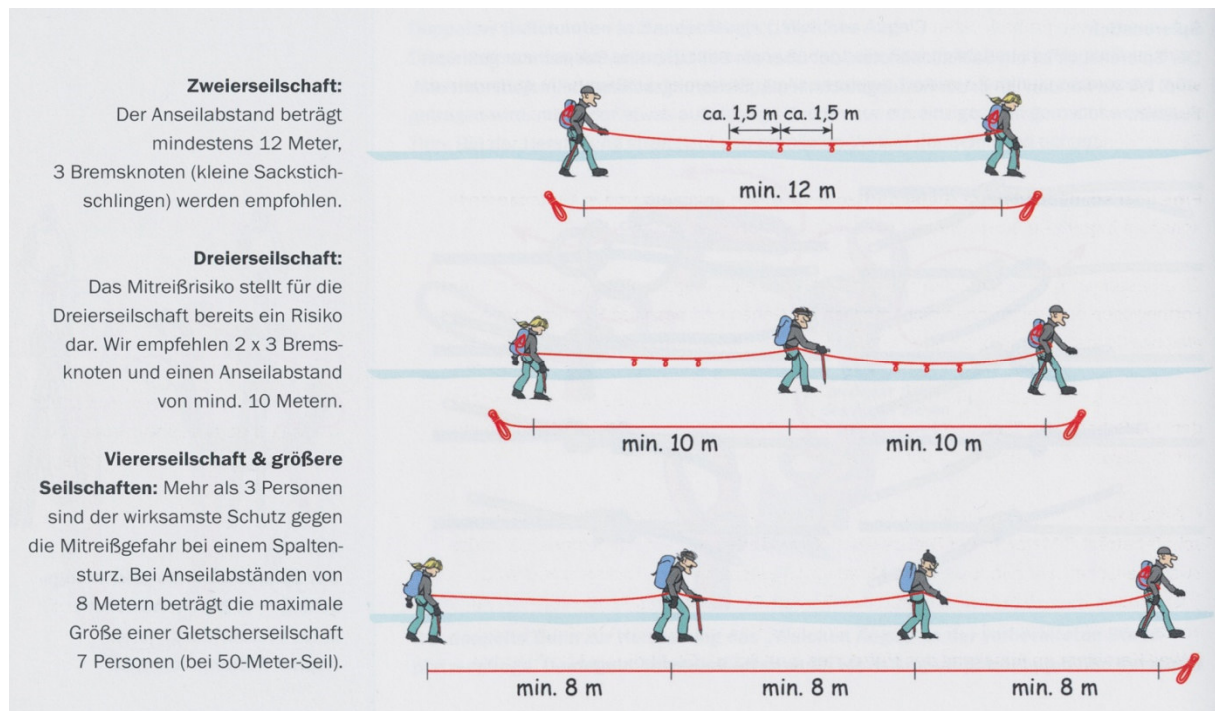


Abbildung 7: Lehrmeinung zum korrekten Anseilen einer Gletscherseilschaft in Abhängigkeit von deren Größe (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 176)

Beim Gehen in einer Seilschaft sind einerseits die Grenzen in Bezug auf die Geländesteigung (siehe oben) und andererseits die sogenannte „Seildisziplin“ zu beachten. Darunter wird das Gehen in einer Seilschaft mit möglichst straffem Seil verstanden. Dadurch lässt sich im Idealfall ein vollständiges Einbrechen in Gletscherspalten verhindern. Bei Nichteinhalten dieses Prinzips erhöht sich im Fall eines Spaltensturzes der freie Sturzweg was zu einer höheren Fangstoßkraft führt. (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 177f)

Neben den beiden erwähnten Sicherungsmethoden – der Standplatzsicherung von einem Fixpunkt und der Sicherung durch gemeinschaftliches Gehen in einer Seilschaft – gibt es noch das „Gehen am kurzen Seil“. Es handelt sich um eine Technik, vor allem für Bergführer (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 215).

Diese Sicherungsmethode wird normalerweise in kleinen, idealerweise in Zweierseilschaften angewandt, wobei der Nachsteiger nicht um vieles schwerer als der Vorsteiger sein sollte. Zwischen den Personen ist nur 1-1,5m Seil, das ständig straff gehalten wird. Im Fall des Stolperns oder Ausrutschens des Nachsteigers ist der Vorsteiger dadurch bei schneller Reaktion in der Lage den beginnenden Sturz des Nachsteigers zu stoppen bevor dieser Geschwindigkeit aufnehmen kann. Der Vorsteiger muss hier der bessere Bergsteiger sein, da das Risiko vom Nachsteiger

zum Vorsteiger verlagert wird. Ein Absturz des Vorsteigers führt automatisch zum Absturz beider Seilschaftsmitglieder. (Hasler & Winkler, 2016)

Ein weiterer wichtiger Punkt auf Hochtouren ist das Bremsen. Dabei lassen sich drei Fälle unterscheiden

1. Bremsen ohne Pickel

Das Bremsen ohne Pickel funktioniert nur bei Schnee, der nicht zu hart ist. Dabei wird der Körper in Bauchlage gebracht und anschließend eine Liegestützstellung eingenommen. Anschließend werden beide Arme und Beine in den Schnee gedrückt. Diese Stellung wird bis zum Stillstand gehalten. Abbildung 8 zeigt dieses Prinzip. (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 146)

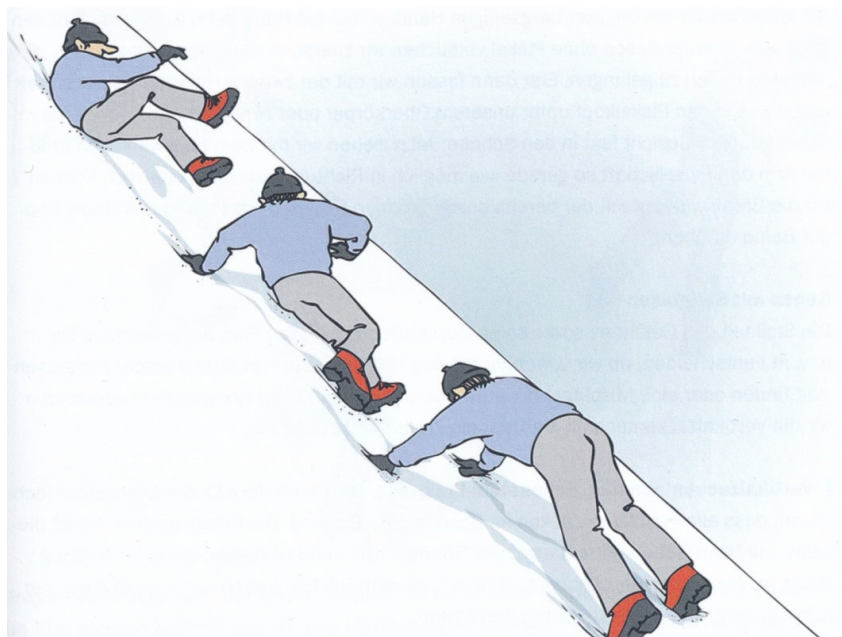


Abbildung 8: Bremsen eines Sturzes ohne Pickel und Steigeisen
(Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 147)

2. Bremsen mit Pickel, aber ohne Steigeisen

Beim Bremsen mit Pickel steigt zwar das Risiko sich selbst zu verletzen, es ist jedoch die einzige Möglichkeit auf hartem Firn zu bremsen. Der Pickelkopf wird dabei mit einer Hand umschlossen, während die zweite Hand den Pickelschaft festhält. Anschließend wird der Pickel unter den Oberkörper gebracht und damit die Spitze des Pickels in den Firn gedrückt. Da die Haue des Pickels nach oben zeigt ist es wichtig den Pickel vom eigenen Kopf fern

zu halten. Die übrige Bremsposition entspricht der, die auch beim Bremsen ohne Pickel eingenommen wird. (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 148)
Die Endposition der Bremsung ist in Abbildung 9 zu sehen.



Abbildung 9: Endposition beim Bremsen mit Pickel, aber ohne Steigeisen
(Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 149)

3. Bremsen mit Pickel und Steigeisen

Das Bremsen mit Pickel und Steigeisen erfolgt analog zum Bremsen mit Pickel und ohne Steigeisen, mit dem Unterschied, dass die Beine während der Bremsung abgewinkelt werden. Das ist wichtig, um zu verhindern, dass die Zacken der Steigeisen sich in den Firn graben, was zum Überschlagen führen könnte. (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 148f)

Der Bremsvorgang ist in Abbildung 10 dargestellt.

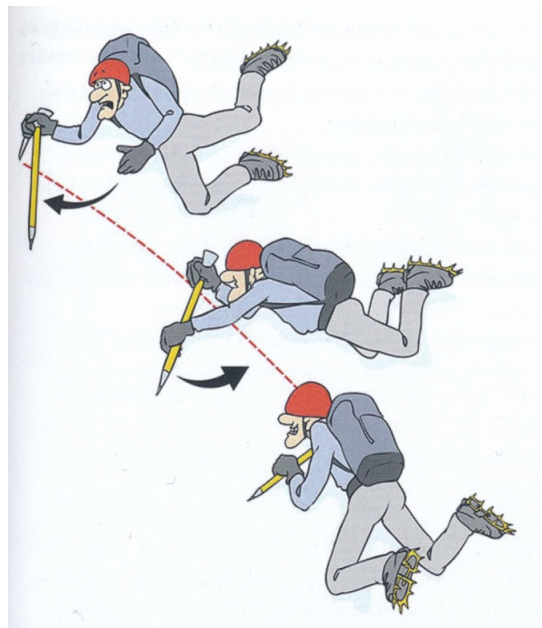


Abbildung 10: Bremsen mit Pickel und Steigeisen
(Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 149)

2.4 Methoden der Kameradensicherung

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben existieren zwei Überarten der Kameradensicherung

1. Laufende Sicherung
2. Sicherung von einem Standplatz

Ad 1) Die laufende Sicherung kann mit oder ohne Fixpunkte durchgeführt werden. Die erste Variante ist der typische Fall einer Gletscherseilschaft. Die zweite Variante wird etwa beim Klettern in einfachem Gelände unter Zeitdruck gewählt. Dabei wird das Seil abwechselnd in Fixpunkte ein- und ausgehängt, wobei das Seil immer in zumindest einem Fixpunkt eingehängt ist. Dadurch ist ein schnelles Aufsteigen möglich, im Sturzfall können aber weite Sturzdistanzen auftreten. (Larcher & Zak, 2017, S. 100f)

Ad 2) Bei der Sicherung vom Standplatz wird in alpinem Gelände vor allem die Sicherung mittels HMS und die Sicherung mittels Plate eingesetzt. „HMS“ steht dabei für Halbmastwurf-Sicherung. Dabei handelt es sich um einen Sicherungsknoten, der gute Bremseigenschaften besitzt und der einfach durch Einlegen in einen geeigneten Karabiner hergestellt werden kann. Der Vorteil liegt in einer universalen Verwendbarkeit, ohne zusätzliches Gerät mitführen zu müssen. Der Nachteil liegt in einer Krangelbildung des Seils. Außerdem eignet sich die HMS nur sehr eingeschränkt zum Abseilen. Die Plate andererseits ist ein einfaches und leichtes Sicherungsgerät, das sich sehr schnell handhaben lässt und auch gut zum Abseilen eignet, der Nachteil liegt in einer in manchen Situationen geringeren Bremswirkung gegenüber der HMS und dem Zusatzgewicht, das mitgeführt werden muss. (Larcher & Zak, 2017, S. 10) & (Ibid., S.92ff)

3 Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel wird zuerst eine Definition für Schnee, Firn und Eis gegeben, sowie ein Überblick über deren Umwandlungsvorgänge und mechanische Eigenschaften. Darauf aufbauend wird ein kurzer Einblick in die Bewegung von Gletschern und die Entstehung von Gletscherspalten gegeben. Nachfolgend werden die für Bergseile wichtigen Normen und Materialparameter erklärt. Am Ende des Kapitels werden dann für Stürze von Seilschaftsmitgliedern wichtige mechanische Parameter und die Reaktionszeit besprochen.

3.1 Schnee, Firn und Eis

3.1.1 Begriffsdefinition

Wichtig für das Verständnis der Transformationsvorgänge von Schnee, Firn und Eis ist eine möglichst exakte Abgrenzung der Begriffe. Für die physikalischen Grundlagen der gegebenen Definitionen wird auf den folgenden Abschnitt verwiesen.

Schnee bezeichnet abgesetzten, eisförmigen atmosphärischen Niederschlag, der innerhalb einer Saison gefallen ist (Meussen, 1998, S. 3). Der Begriff der Saison ist in diesem Fall ein individuell definierbarer Zeitraum. In Österreich wird beispielsweise von den Alpenvereinen für die Messung des Gletschermasseverlustes ein Intervall von Anfang Oktober bis Ende September des Folgejahres verwendet (Lieb & Kellerer-Pirklbauer, 2018), während das Österreichische Kuratorium für Alpine Sicherheit einen Zeitraum von 1. November bis zum 31. Oktober des Folgejahres annimmt (siehe Kapitel 2.2)

Firn bezeichnet alten, abgelagerten Schnee, der sich unter dem durch das Eigengewicht entstehenden hydrostatischen Druck, bei einer homologen Temperatur von etwa $t_h = 0.92$ verdichtet (Meussen, 1998, S. 17f). Die homologe Temperatur wird dabei definiert durch

$$t_h = \frac{T_U}{T_S} \quad (1)$$

(Rösler, Harders, & Bäker, 2006, S. 495). Dabei ist T_U die Umgebungstemperatur und T_S die Schmelztemperatur in Grad-Kelvin. Es sublimieren Wassermoleküle in die von der Schneedecke eingeschlossene Luft und lagern sich an andere Eiskristalle an, bis eine mechanisch stabile Packung erreicht ist. Dieser Prozess endet bei einer Dichte von etwa 550 kg/m^3 . Anschließend folgt eine Dichtezunahme durch Optimierung der Kontaktflächen zwischen den Partikeln. Dieser Prozess endet bei einer Dichte von etwa 730 kg/m^3 . Bei der darauffolgenden Dichtezunahme spielt das Verformungsverhalten der Eispartikel eine immer größere Rolle. (Meussen, 1998, S. 18f)

Eis bezeichnet einen polykristallinen Festkörper, der durch weitere Verdichtung des Firns entstanden ist (Meussen, 1998, S. 4). Grundsätzlich existiert auch monokristallines Eis, in der Natur herrscht jedoch polykristallines Eis vor. Natürliches Eis enthält Luftporen. Diese Poren sind über 830 kg/m^3 zusammenhängend, weshalb dort der Übergang von Firn zu polykristallinem Eis liegt. Bei 0°C besitzt reines Wassereis aufgrund seiner Kristallstruktur eine Dichte von 916.73 kg/m^3 . Eis, das aus Schnee entstanden ist, besitzt aufgrund der Poren eine geringere Dichte. (Fellin, 2013, S. 3ff) Bei Untersuchungen von Meussen (Meussen, 1998) betrug die durchschnittliche Dichte von polykristallinem Eis etwa 900 kg/m^3 (Ibid., S. 19). Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff „Eis“ als synonym für Wassereis verwendet.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Dichten von Eis, Firn und unterschiedlichen Schneearten.

Schneeart	Dichte in kg/m^3
Pulverschnee	30 - 60
schwach windgepresster Schnee	60 - 100
stark windgepresster Schnee	100 - 300
Neuschnee im Mittel	100
rundkörniger Schnee im Mittel	350
Nassschnee	300 - 600
abgelagerter Lawinenschnee	500 - 800
Firnschnee	600 - 830
Eis	830 - 917

Tabelle 1: Dichten von Schnee, Firn und Eis (Fellin, 2013, S. 3 und S. 57)

3.1.2 Molekulare Struktur

Jedes Wassermolekül besitzt drei Bindungen in der basalen Ebene und eine Bindung zu einer parallelen Ebene (Fellin, 2013, S. 3), siehe Abbildung 11.

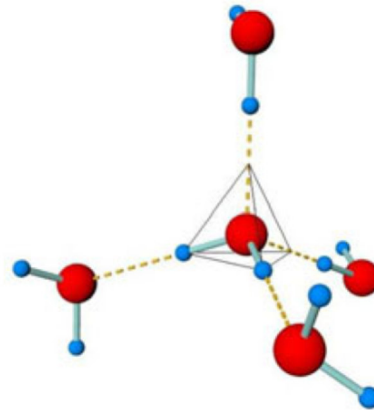


Abbildung 11: Tetraederförmig verbundene Wassermoleküle (Fellin, 2013, S. 1)

Unter atmosphärischen Bedingungen bilden sich daraus Eiskristalle, die ein hexagonales Gitter besitzen (Fellin, 2013, S. 3). Abbildung 12 zeigt den Aufbau eines Eiskristalls, wobei nur die Sauerstoffatome und die sie verbindenden Wasserstoffbrücken dargestellt sind.

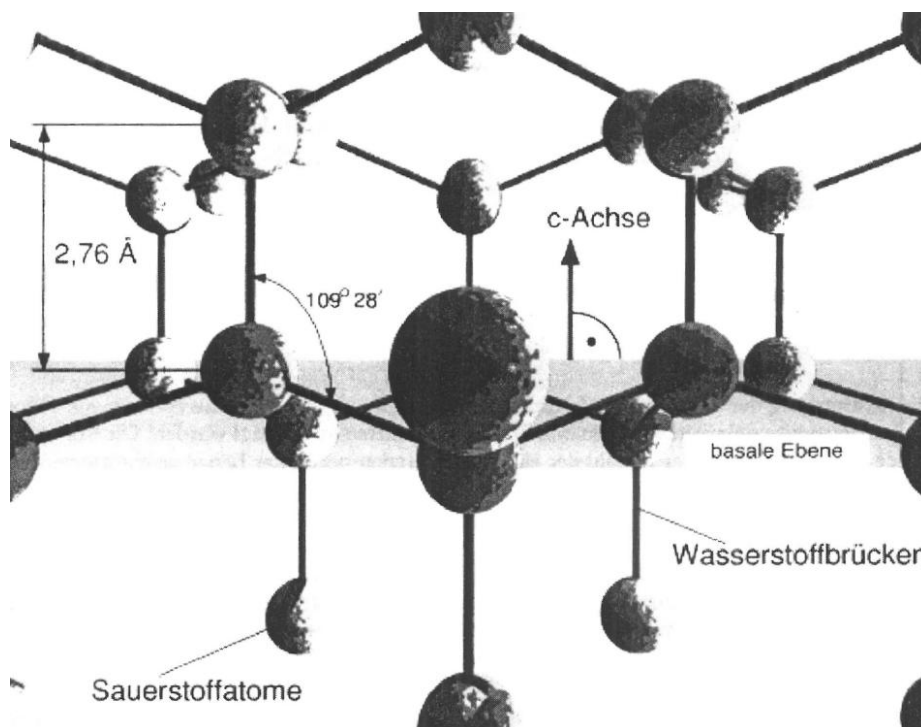


Abbildung 12: Aufbau eines Eiskristalls auf molekularer Ebene (Meussen, 1998, S. 24)

Die Sauerstoffatome konzentrieren sich dabei, wie in Abbildung 12 zu sehen ist, in den basalen Ebenen (Meussen, 1998, S. 23). Durch diesen Aufbau besitzt ein Eiskristall anisotropes Verformungsverhalten. Er verformt sich entlang der Ebenen wesentlich leichter als normal dazu. In den von Meussen (Meussen, 1998) untersuchten Proben richteten sich die basalen Ebenen der einzelnen Kristalle im Polykristall aber nicht zueinander aus, weshalb der Polykristall über isotopes Verhalten verfügt (Ibid., S. 25). Analog sind auch bei Gletschereis die Ebenen unregelmäßig angeordnet. (Fellin, 2013, S. 6)

3.1.3 Mechanisch-physikalische Eigenschaften von Schnee und Eis

Werkstofftechnisch betrachtet handelt es sich bei Schnee um einen mehrphasigen Stoff, der ein ähnliches Verhalten aufweist wie Metalle und Keramiken bei hohen Temperaturen (Meussen, 1998, S. 3). Wassereis weist ein ausgeprägtes Kriechverhalten auf, wobei die Verzerrungen und Verzerrungsraten dem Nuttingschen Potenzgesetz folgen, das auch die Kriechverformung von Metallen beschreibt (Ibid., S. 53). Schnee besitzt ein ähnliches Kriechverhalten wie Eis. Lockerer Schnee kriecht dabei wesentlich schneller als dichter Schnee (Fellin, 2013, S. 67f).

Wichtig für die Entstehung von Schneedecken ist das Setzungsverhalten. Zur Evaluierung dieses Setzungsverhaltens führte Meussen (Meussen, 1998) Versuche mit Proben von 115 Tage altem und 83 Tage altem Naturschnee, sowie Kunstsnee durch. Die Proben wurden in einer Form auf eine Dichte von $420 - 860 \text{ kg/m}^3$ gepresst, anschließend wurde die Form entfernt und die Proben wurden bei -10°C gelagert. Um den Schwerkrafteinfluss zu minimieren wurden die Proben horizontal gelagert und einmal pro Woche gedreht. Das Ergebnis war, dass nach etwa 700 Stunden die Probendichte nur noch leicht zunahm, der Setzvorgang also abgeschlossen war. (Ibid., S. 20)

Schnee ist jedoch einer ständigen Metamorphose unterworfen, auch wenn die Schneetemperatur unter dem lokalen Gefrierpunkt liegt. Diese Metamorphoseprozesse können auf vier verschiedene Arten auftreten. (Fellin, 2013, S. 48)

1. Abbauend

Einerseits herrscht an den Spitzen der Eiskristalle ein höherer Sättigungsdampfdruck als in den Kerben. Das dadurch entstehende Dampfdruckgefälle führt zu einem Transport von Wasserdampf von den Spitzen zu den Kerben. Das führt zu einer Verrundung der Kerben und in weiterer Folge zu kleineren, runderen Eiskristallen. Ebenso strebt der Eiskristall eine Minimierung der Oberflächenenergie an, weshalb sich Wassermoleküle von den Spitzen in die Kerben umlagern. In weiterer Folge versintern die einzelnen Eiskörner miteinander. Dieser Prozess läuft bei höheren Temperaturen schneller ab als bei niedrigeren und wäre erst bei perfekter Kugelform beendet. (Fellin, 2013, S. 48ff)

2. Aufbauend

Durch die aufströmende Erdwärme besitzt der Boden unter der Schneeschicht häufig eine Temperatur von etwa 0°C . Ist die Temperatur außerhalb der Schneeschicht niedriger, so entsteht ein Temperaturgradient, der ein Dampfdruckgefälle von den bodennahen Schichten hin zur Oberfläche zur Folge hat. Der aufsteigende Wasserdampf resublimiert an oberflächennahen Körnern, wodurch mit der Zeit in oberflächennahen Schichten immer größere, nach unten offene Kristalle entstehen. Währenddessen gehen in bodennahen Schichten Kontaktflächen zwischen den Körnern verloren. Dieser Prozess wirkt der Versinterung der Körner entgegen und führt zur Bildung von sogenanntem Bodenreif oder Schwimmschnee. Da der Temperaturgradient der entscheidende Faktor ist, findet dieser Prozess umso schneller statt, je kälter die Umgebungstemperatur und je dünner die Schneeschicht ist. (Fellin, 2013, S. 51f)

3. Schmelzend

Durch Sonneneinstrahlung, Wind, Luft, Regen, oder Erdwärme kann eine Wärmezufuhr in die Schneeschicht stattfinden. Steigt die Temperatur dadurch über 0°C an, so schmelzen die Eiskristalle und die Körner werden runder und größer. Geringe Schmelzwassermengen können kapillare Verbindungen zwischen den Körnern schaffen und dadurch die Festigkeit der Schneeschicht steigern. Bei zu hohen Schmelzwassermengen verschwinden diese Verbindungen und hangparallel fließendes Wasser erzeugt zusätzlichen Strömungsdruck in der Schneedecke. (Fellin, 2013, S. 52f)

4. Mechanisch

Darunter lassen sich alle mechanischen Veränderungen subsummieren, die auf die Schneedecke einwirken. Ein natürliches Beispiel sind Windverfrachtungen. (Fellin, 2013, S. 53)

Für mechanische Metamorphosen definiert Meussen über die Dichte des Eiskristalls drei mögliche Verformungsmechanismen für Firn und Schnee. (Meussen, 1998)

1. Reorganisation der Kristalle durch Veränderung ihrer Position im Schneesverband für Schneedichten $\rho < 550 \text{ kg/m}^3$.
 2. Gleiten entlang der Korngrenzflächen für Schneedichten $\rho < 730 \text{ kg/m}^3$.
 3. Basales Gleiten durch Verformung der Eiskristalle für Schneedichten $\rho > 730 \text{ kg/m}^3$.
- (Meussen, 1998, S. 25)

Sowohl Eis als auch Schnee besitzen für schnelle Belastungen, die nicht zum Bruch führen, viskoelastisches Verhalten, das dem Kelvin-Modell genügt. Dabei wird sowohl für Schnee als auch für Eis eine Abhängigkeit der Materialparameter – wie des E-Moduls – von der Dichte angenommen. Bei Beanspruchungsdauern, die über wenigen Sekunden liegen tritt bei niedrigen Spannungen linear viskoses Verhalten auf, wobei dieses wieder stark dichteabhängig ist. Für höhere Belastungen verhalten sich Schnee und Eis gemäß dem Burger-Modell, siehe Abbildung 13. Dabei sind E_1 sowie E_2 Feder- und $\eta_{A,1}$ sowie $\eta_{A,2}$ Dämpfungselemente. (Fellin, 2013, S. 25 und 74f)

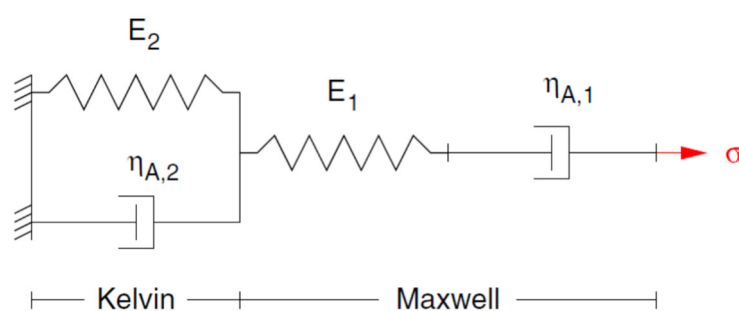


Abbildung 13: Burger-Modell (Fellin, 2013, S. 76)

Tabelle 2 zeigt Einflussfaktoren auf die Festigkeit von Schnee und Eis und erklärt, inwieweit diese einen Einfluss auf das Materialverhalten nehmen.

	Schnee	Eis
Temperatur	Festigkeit nimmt mit steigenden Temperaturen ab	Festigkeit nimmt mit steigenden Temperaturen leicht ab
Dichte	Festigkeit steigt mit der Dichte	Die Dichte hat kaum Einfluss auf die Festigkeit
Belastungsgeschwindigkeit	Sowohl höhere Verzerrungsraten als auch höhere Belastungsraten vermindern die messbare Festigkeit in Zug- und Scherversuchen	Die Bruchspannung ist von der Verzerrungsrate unabhängig

Tabelle 2: Einflussfaktoren auf die Festigkeit von Schnee und Eis (Fellin, 2013, S. 33ff) und (Fellin, 2013, S. 86f)

3.1.4 Bergsteigerische Praxis

Um in der Praxis Haltekräfte eines Fixpunktes für unterschiedliche Schnee- und Firnbeschaffenheiten schätzen zu können existiert der Handtest, der sich auf die Schneehärte bezieht. Tabelle 3 gibt eine wörtliche Entsprechung für die Eindringwiderstände des Untergrundes gegen bestimmte Gegenstände und die jeweiligen mit einer Schweizer Rammsonde ermittelten Kraftwerte.

Härte	Handtest	Schweizer Rammsonde in N
sehr weich	Faust	0-50
weich	4 Finger	50-175
mittel	1 Finger	175-390
hart	Bleistift	390-715
sehr hart	Messer	715-1200
Eis	-	>1200

Tabelle 3: Einteilung der Schneehärte mittels Handtest (Sulser, 2012)

In diesem Zusammenhang wird aus praktischen Gründen die Nutzung eines Pickels anstatt eines Bleistiftes vorgeschlagen. Die Schneehärte weist dabei eine starke Korrelation von $\rho = 0.96$ zu den von einem Fixpunkt haltbaren Kräften auf. (Sulser, 2012)

3.2 Der Gletscher

Nachdem in Kapitel 3.1 Definitionen für Schnee, Firn und Eis sowie deren Metamorphose gegeben wurde, wird nun ein kurzer Überblick über Gletscher gegeben werden.

Gletscher sind große, hauptsächlich aus Schnee, Firn und Eis bestehende Massen, welche einer aktiven Bewegung unterliegen. Auch Schmelzwasser, Gesteinsfragmente und Luft, beispielsweise in den Porenräumen des Schnees, können Bestandteile eines Gletschers sein.

(Winkler S. , 2009, S. 9)

Gletscher lassen sich grob einteilen in:

- Warmbasale Gletscher
Das Eis befindet sich überwiegend in der Nähe des Druckschmelzpunktes.
- Kaltbasale Gletscher
Das Eis befindet sich überwiegend unterhalb des Druckschmelzpunktes.

Neben diesen Beiden Haupttypen existieren auch Mischungen, etwa beim Übergang von Permafrost auf wärmere Untergründe. (Winkler S. , 2009, S. 19f)

Die Gletschertypen unterscheiden sich durch unterschiedliche Ursachen ihrer Bewegung:

- Deformationsfließen
Beim Deformationsfließen treten sowohl Bewegungen zwischen den Eiskristallen als auch innerhalb der Eiskristalle auf. Deformationen innerhalb der Kristalle erfolgen durch Gleitprozesse parallel zu den basalen Ebenen (siehe Abbildung 12). Beide Prozesse laufen nach den in Kapitel 3.1 beschriebenen Kriechprozessen ab. Dieser Prozess findet sowohl bei warm- als auch an kaltbasalen Gletschern statt. (Winkler S. , 2009, S. 22f)

- **Basales Gleiten**
Beim basalen Gleiten befindet sich das Eis an der Gletscherbasis am Druckschmelzpunkt. Dadurch entsteht ein dünner Schmelzwasserfilm, auf dem der Gletscher gleiten kann. Dieser Prozess findet nur bei warmbasalen Gletschern statt. (Winkler S. , 2009, S. 23ff)
- **Gletscherbewegung durch Deformation subglazialer Sedimente**
Diese Bewegung entsteht durch Deformation von unter dem Gletscher liegenden, ungefrorenen Sedimenten. Daher findet auch dieser Prozess nur bei warmbasalen Gletschern statt. (Winkler S. , 2009, S. 25)

Die Geschwindigkeiten der Gletscherbewegung sind sehr unterschiedlich und können auch innerhalb eines Gletschers schwanken. Typischerweise liegt sie aber bei $50 - 400 \frac{m}{a}$. In weiterer Folge führt diese Bewegung in Kombination mit der Sprödigkeit des Eises auch zu Gletscherspalten. Diese entstehen durch Unebenheiten (Querspalten), Ausweitungen des Fließgeländes (Längsspalten) und starke Gefälle (Querspalten, Eistürme und Eisfälle) unterhalb des Gletschers. Auch wenn sich einzelne Spalten durch die Bewegung des Gletschers öffnen und wieder schließen, sind aufgrund der Geländebeschaffenheit die Spaltenzonen an sich ortsfest. Der Bergschrund ist eine stationäre Gletscherspalte am Übergang von warm- zu kaltbasalem Gletscher. Trotz ihrer optischen Ähnlichkeit gelten Randklüfte streng genommen nicht als Gletscherspalten, da sie nicht durch die Fließbewegung des Gletschers, sondern durch das Abschmelzen des Gletschers am relativ gesehen wärmeren Felsen entstehen. (Winkler S. , 2009, S. 25ff)

Zum besseren Verständnis des Aussehens der unterschiedlichen Arten von Gletscherspalten wird auf Abbildung 14 verwiesen. Diese Spalten stellen, neben der Steigung und der Höhe die größte objektive Gefahr auf Gletschern dar (siehe Kapitel 2.2). Eine besondere Gefahr sind dabei Spalten, die durch Schnee verdeckt werden, da Seilschaftsmitglieder ohne Vorwarnung in diese einbrechen können.

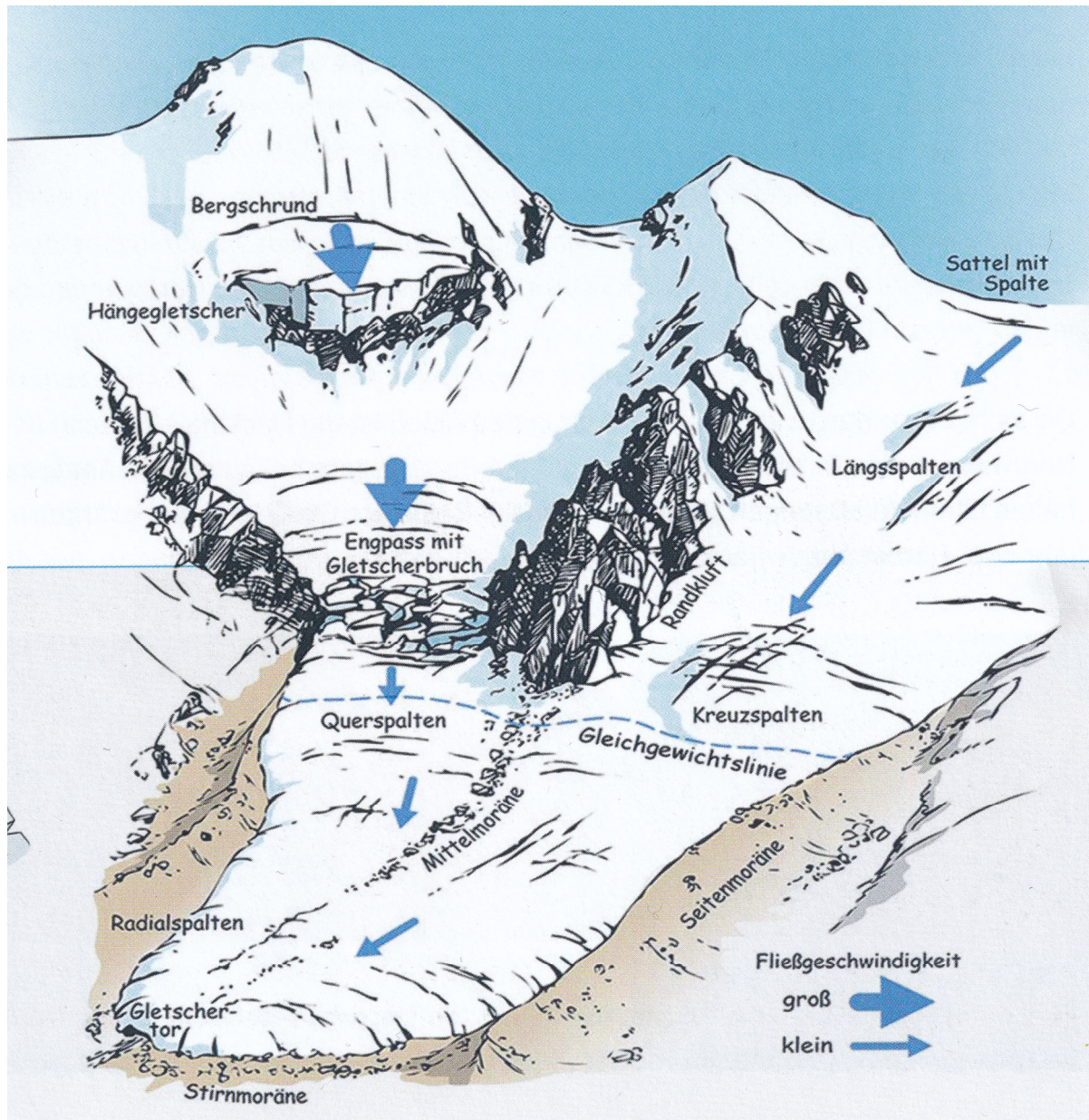


Abbildung 14: Arten von Gletscherspalten (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 18)

3.3 Seile

Es wird zwischen statischen und dynamischen Bergseilen unterschieden, wobei sich Dynamikseile wieder in Einfach-, Halb- und Zwillingsseile unterteilen. Die Unterschiede liegen im Verhalten der einzelnen Seile unter dynamischer Beanspruchung.

dynamisches Bergseil

Die DIN EN 892 definiert ein dynamisches Bergseil als

Seil, das als ein Glied der Sicherungskette in der Lage ist, den Sturz eines Bergsteigers oder Kletterers bei einer begrenzten maximalen Fangstoßkraft aufzufangen

(DIN EN 892, S. 5)

statisches Bergseil

Statische Bergseile finden primär als Reepschnüre (siehe Kapitel 3.3.3) Anwendung, weshalb auch die zur Zertifizierung statischer Seile genutzte DIN EN 564 den Titel „Bergsteigerausrüstung – Reepschnur“ trägt. Die DIN EN 564 definiert eine Reepschnur als

Schnur, die der Kraftaufnahme dient, jedoch nicht zur Energieaufnahme vorgesehen ist [...]. Eine Reepschnur muss in einer Kernmantelkonstruktion hergestellt sein und einen Nenndurchmesser von 4 mm bis 8 mm Durchmesser haben.

(DIN EN 564, S. 4)

3.3.1 Seilmaterialien

In Tabelle 4 sind einige, für Bergsportseile typische Materialien mit Handelsnamen und deren Eigenschaften aufgezählt. Diese Tabelle stellt keine vollständige Aufzählung dar, sondern soll einen Überblick über die gängigsten von den großen Herstellern von Bergsportequipment vertriebenen Materialien (Stand Oktober 2019) geben.

	PA	Aramid	UHMWPE
Handelsnamen	Nylon, Ultramid	Kevlar, Technora	Dyneema, Spectra
Mechanische Eigenschaften			
Zugfestigkeit in N/mm ²	700-1100	2800-3300	2700-3400
Bruchdehnung in %	12-30%	2,40-3,50%	3,50-3,80%
Dichte in g/cm ³	1,1-1,15	1,4	0,97
Thermische Eigenschaften			
Schmelzpunkt in °C	215	480-500 ¹⁾	140
kurzzeitige Hitze in °C	130	350	70
Bergsportrelevante Eigenschaften			
Knotenrestfestigkeit in %	50%	25-30%	25-50%
Schnittfestigkeit	gering	gut	sehr gut
Umwelt			
UV-Stabilität	mittel/gut	gering	sehr gut
Kriechen	gering	nein	ja
1) Aramide besitzen keinen Schmelzpunkt, sondern zersetzen sich			

Tabelle 4: Typische Materialien von Bergsportseilen mit Handelsnamen und Materialeigenschaften (Würtl & Plattner, 2017); (Ernst, 2017); (Deutscher Alpenverein, 2019)

Wie in Tabelle 4 zu sehen ist gibt es neben den mechanischen Eigenschaften noch eine Reihe anderer für den Bergsport wichtige Eigenschaften. Dazu gehören

- **Thermische Eigenschaften**
Thermische Eigenschaften spielen speziell in Hinblick auf das Abseilen und Ablassen eine Rolle, wo bei schnellem Seillauf hohe Temperaturen auftreten können (Popall, 2014).
- **Knotenfestigkeit**
Die Knotenfestigkeit gibt an wieviel Prozent der ursprünglichen Festigkeit eine Schlinge noch besitzt, nachdem sie geknotet wurde. Bei den Werten in der Tabelle handelt es sich lediglich um Richtwerte. Der tatsächliche Wert hängt dabei nicht nur vom Material, sondern auch von der Querschnittsform und den Knoten ab. Dynamische Seile leiden weniger unter Festigkeitsreduzierung als Statikseile und diese wieder weniger als Bandmaterial. So besitzt ein dynamisches Seil mit Achterknoten noch 77,5% Restfestigkeit, während ein Statikseil auf 64,8% Restfestigkeit und eine Bandschlinge auf 62,8% Restfestigkeit kommt. Bei einem Sackstich hingegen liegt die Restfestigkeit der einzelnen Materialien nur noch bei 67,1% (dynamisches Seil), 59,2% (statisches Seil) und 48,3% (Bandschlinge). Weiters tritt die Schwächung für dünnere Seile stärker auf. Diese Prozentangaben gelten für Polyamid. (Kuningham, 2016)

- **Schnittfestigkeit**
Die Schnittfestigkeit beschreibt wie leicht Schlingen- und Seilmaterial durch Pendelbewegungen über eine scharfe Kante durchtrennt wird. Sie ist für UHMWPE sechs bis sieben Mal höher als für PA. (Sammel, 2012)
- **UV-Stabilität**
Die UV-Stabilität des Materials ist speziell bei Hochtouren bedeutend, da es dort in einem Bereich mit hoher UV-Belastung genutzt wird. Diese Eigenschaft spielt bei der Alterung von Seilen eine Rolle. (Würtl & Plattner, 2017)

Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung der Materialien aus Tabelle 4 gegeben.

- **PA (Polyamid)**
Unter „Polyamid“ wird im Bergsport im Allgemeinen PA 66 verstanden, das auch unter dem Markennamen „Nylon“ bekannt ist (Sammel, 2012). Es wird sowohl für dynamische als auch statische Seile und Schlingen benutzt. Die Vorteile liegen in einer guten Knotbarkeit und geringeren Schwächung durch Knoten (siehe Knotenfestigkeit). Nachteile sind die im Vergleich zu UHMWPE und Aramid niedrige Zugfestigkeit, wodurch mehr Material benötigt wird, was in einem höheren Gewicht pro Meter resultiert. Ein Nachteil speziell bei Hochtouren ist der Umstand, dass PA Wasser aufnimmt was die Seile/Schlingen schwerer macht und die Zugfestigkeit um ca. 10% reduziert. (Deutscher Alpenverein, 2019)
- **Aramid**
Aramide werden ausschließlich für Statikseile genutzt. Diese Materialien zeichnen sich besonders durch die enorme Hitzebeständigkeit aus. (Deutscher Alpenverein, 2019) Aufgrund ihrer hohen Steifigkeit gepaart mit hoher Schnittfestigkeit werden Reepschnüre aus diesen Materialien primär für Spezialanwendungen genutzt (etwa das Fädeln von Zwischensicherungen an sogenannten Sanduhren) (Sammel, 2012).
- **UHMWPE (Ultra-high-molecular-weight-Polyethylene)**
Polyethylen wird, wie Aramid, ausschließlich für Statikseile genutzt. Schlingenmaterial aus UHMWPE ist im Bergsport vor allem unter dem Handelsnamen „Dyneema“ bekannt. Es ist schwer zu verarbeiten und aufgrund der extrem glatten Oberfläche immer strahlend weiß (Würtl & Plattner, 2017), sehr leicht und sehr reißfest (Deutscher Alpenverein, 2019).

3.3.2 Norm für dynamische Bergseile

Die folgenden Definitionen sind aus der DIN EN 892 – dynamische Bergseile entnommen und sollen einen Überblick über die unterschiedlichen Arten von Seilen geben, die im Bergsport Verwendung finden.

Einfachseil

dynamisches Bergseil, das bei einfacher Verwendung als ein Glied der Sicherungskette in der Lage ist, den Sturz des Vorsteigers aufzufangen

(DIN EN 892, S. 5)

Halbseil

dynamisches Bergseil, das bei paarweiser Verwendung als ein Glied der Sicherungskette in der Lage ist, den Sturz des Vorsteigers aufzufangen

(DIN EN 892, S. 5)

Zwillingsseil

dynamisches Bergseil, das bei paarweiser und paralleler Verwendung als ein Glied der Sicherungskette in der Lage ist, den Sturz des Vorsteigers aufzufangen

(DIN EN 892, S. 5)

In der bergsteigerischen Praxis bedeuten die obigen Definitionen folgendes:

Einfachseile sind universell einsetzbare Seile, die theoretisch für jeden Einsatzzweck, vom Sportklettern bis zu Hochtouren, geeignet sind. Die einzige Limitierung ist das zumeist höhere Gewicht von Einfachseilen gegenüber Halb- und Zwillingsseilen. (Edelrid, 2019, S. 22)

Halbseile dürfen nur im Doppelstrang genutzt, jedoch einzeln in Zwischensicherungen gelegt werden (siehe Abbildung 15). Durch diesen Umstand ergibt sich oft ein günstigerer Seilverlauf als wenn beide Seilstränge in eine Zwischensicherung eingelegt würden, was zu einer geringeren Seilreibung während

des Kletterns und einer geringeren Fangstoßkraft im Sturzfall führt (Edelrid, 2019, S. 23). Ein weiterer klassischer Anwendungsfall ist die Verwendung im Einzelstrang bei Hochtouren in nicht absturzgefährdetem Gelände (siehe Kapitel 2.3).

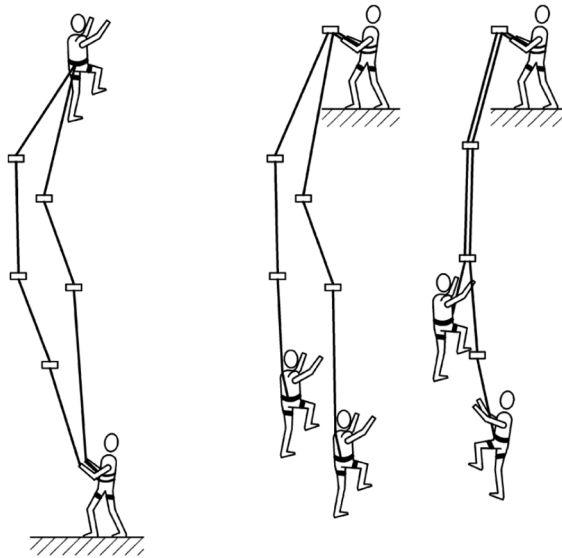


Abbildung 15: Benutzung eines Halbseils
(DIN EN 892, S. 6)

Zwillingsseile dürfen – wie Halbseile – nur im Doppelstrang genutzt werden, müssen im Gegensatz zu Halbseilen aber auch immer im Doppelstrang in Sicherungen eingelegt werden (siehe Abbildung 16). Der Vorteil liegt im geringeren Gewicht bei gleichzeitiger Redundanz. Ihr Haupteinsatzgebiet sind Alpinklettertouren in schwierigem Gelände. (Edelrid, 2019, S. 22)

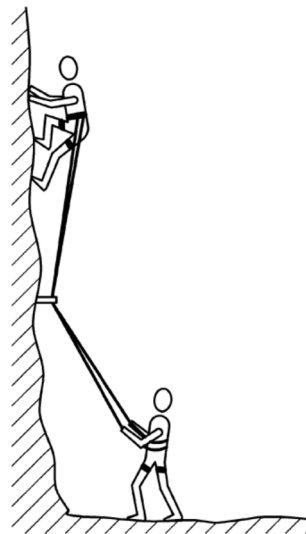


Abbildung 16: Benutzung eines Zwillingsseils
(DIN EN 892, S. 6)

Daneben existieren noch dynamische Bergseile, die nach zwei, oder sogar allen drei Kategorien zertifiziert sind (Edelrid, 2019, S. 36). Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben empfiehlt die Lehrmeinung des Alpenvereins inzwischen die Nutzung eines Einfachseils in Gletscherseilschaften. Ein wichtiger Grund dafür ist die reduzierte Gefahr eines Seilrisses bei Scharfkantenbelastung (Schubert, 2007). Dreifach zertifizierte Seile bieten daher speziell bei Hochtouren einen guten Kompromiss.

Die DIN EN 892 enthält sehr genaue Vorgaben zu Dynamikseilen und legt, neben einzuhaltenden mechanischen Grenzen, beispielsweise fest, dass dynamische Seile in Kernmantelkonstruktion auszuführen sind. Dabei darf die maximale Längsverschiebung des Mantels gegenüber dem Kern Seils 1% nicht überschreiten. (DIN EN 892, S. 7)

Zur dynamischen Prüfung nach DIN EN 892 werden Einfach- und Halbseile mit je 40m Länge und Zwillingsseile mit entweder 1x80m oder 2x40m verwendet. Alle Tests werden an unbenutzten Prüfmustern durchgeführt (DIN EN 892, S. 8). Die wichtigsten Kennwerte der Norm werden in Tabelle 5 zusammengefasst:

	Einfachseil	Halbseil	Zwillingsseil
Anzahl der Stränge	Einfachstrang	Einfachstrang	Doppelstrang
Maximale statische Dehnung	<10%	<12%	<10%
Maximale dynamische Dehnung	<40%	<40%	<40%
Maximaler Fangstoß	<12 kN	<8 kN	<12 kN
Sturzzahl	>5	>5	>12
Fallmasse	80 ($\pm 0,1$) kg	55 ($\pm 0,1$) kg	80 ($\pm 0,1$) kg

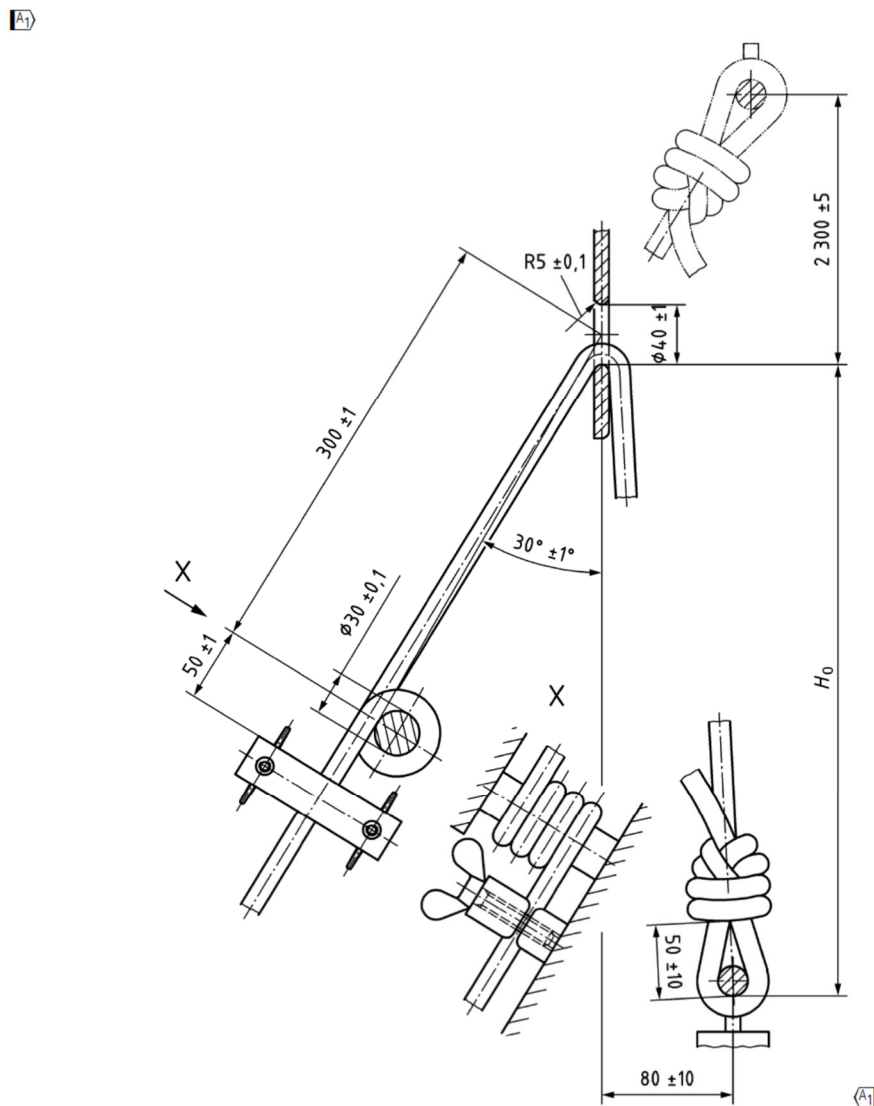
Tabelle 5: Zusammenfassung der Anforderungen der EN 892 (2016) an dynamische Bergseile (DIN EN 892, S. 8ff)

Wie aus Tabelle 5 ersichtlich, ähneln sich die Mindestanforderungen für Einfachseile im Einfachstrang und Zwillingsseilen im Doppelstrang. Der einzige Unterschied liegt in einer höheren Sturzzahl für Zwillingsseile.

Die Bestimmung der dynamischen Eigenschaften, genauer der maximalen dynamischen Dehnung, des maximalen Fangstoßes und der Sturzzahl, erfolgt im Zuge der Fallprüfung nach Abschnitt 5.6 der EN 892. Der vorgeschriebene Versuchsaufbau ist aus Abbildung 17 und Abbildung 18 zu erkennen. Die Vorrichtung besteht dabei, beschrieben am Beispiel der Einzelstrangprüfung, (von links) aus einer Einspannung für das Seil, einem Poller, um den das Seil geschlungen wird, einer Seilumlenkplatte, einer Fallmasse und einer Führungsschiene (nicht dargestellt). (DIN EN 892, S. 14f)

Der Poller besteht aus einem Stahlbolzen mit einem Durchmesser von $30\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ und einer durchschnittlichen Rauigkeit von $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$. Er wird, aufgrund der in der Norm beschriebenen Anforderungen an die Prüfanlage, im Rahmen dieser Arbeit als starr angenommen. Die Seile werden für die Testung drei Mal um den Stahlbolzen gewickelt. (DIN EN 892, S. 14)

Die Seilumlenkplatte wird im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls als starr angesehen. Sie besitzt eine Stärke von $10\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$. Die Abrundung, über die das Seil läuft, besitzt eine durchschnittliche Rauigkeit von $R_a \leq 0.2\mu\text{m}$ und an ihrer Front, an der das Seil bei gefallener Fallmasse anliegt, eine durchschnittliche Rauigkeit von $R_a \leq 0.4\mu\text{m}$. (DIN EN 892, S. 14f)



Legende

X Draufsicht auf die Befestigung

Abbildung 17: Anordnung für die Einzelstrangprüfung bei Einfach- und Halbseilen (DIN EN 892, S. 17)

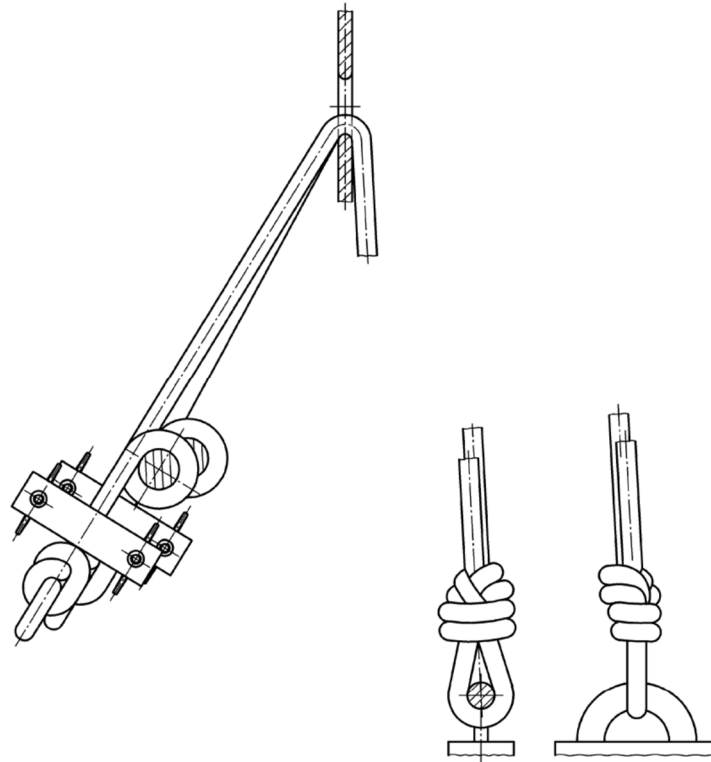


Abbildung 18: Anordnung für die Doppelstrangprüfung bei Zwillingsseilen
(DIN EN 892, S. 18)

Da im Rahmen dieser Arbeit Feder- und Dämpfungskonstanten für Seile bestimmt werden, wird hier kurz auf die statische und dynamische Normprüfung von dynamischen Bergseilen eingegangen.

- Statische Prüfung

Im Zuge der statischen Prüfung wird die statische Dehnung bestimmt. Die Norm definiert das Verfahren folgendermaßen

Die Prüfung wird wie folgt durchgeführt:

- *Einfachseile im Einzelstrang;*
- *Halbseile im Einzelstrang;*
- *Zwillingsseile im Doppelstrang.*

Die Prüfmuster werden so eingespannt, dass die freie Einspannlänge (1500^{+100}_0) mm beträgt.

Das Prüfmuster wird innerhalb von (10_0^{+10}) s stoßfrei mit einer Masse von $(80 \pm 0,1)$ kg belastet und diese Belastung für (180 ± 15) s aufrechterhalten.

Das Prüfmuster wird entlastet und $(10 \pm 0,5)$ min unbelastet ruhen gelassen.

Das Prüfmuster wird innerhalb von (10_0^{+5}) s stoßfrei mit einer Masse von $(5 \pm 0,1)$ kg belastet.

Nach der Belastung des Prüfmusters über 60 s wird innerhalb der nächsten 10 s eine Bezugslänge von (1000 ± 1) mm markiert.

Die Belastung wird innerhalb von (10_0^{+5}) s stoßfrei auf $(80 \pm 0,1)$ kg erhöht und diese Belastung für (60 ± 5) s aufrechterhalten.

An dem belasteten Prüfmuster wird innerhalb der nächsten 5 s der neue Abstand l_1 zwischen den beiden Markierungen gemessen.

[...]

Die Dehnung wird in Prozent der unbelasteten Länge angegeben: d. h. $(l_1 - 1\ 000)/10$. Das Ergebnis wird für jedes Prüfmuster auf 0,1 % angegeben.

(DIN EN 892, S. 13)

- **Dynamische Prüfung**

Im Zuge der dynamischen Prüfung werden die dynamische Dehnung und der Fangstoß bestimmt. Die Norm definiert das Verfahren folgendermaßen

Beide Seilstränge des Prüfmusters werden bei der Doppelstrangprüfung durch die Bohrung in der Seil-umlenkplatte geführt, jeder Strang wird dreimal um den Poller gewickelt und mit der oder den Klemmen (siehe Bild 9 und Bild 11) [hier Abbildung 17 und Abbildung 18 – Anm.] gesichert.

Es wird sichergestellt, dass sich die Fallmasse an einer Position $(3\ 000 \pm 200)$ mm unter der Bohrung befindet.

Das Prüfmuster wird mit der Fallmasse als statische Last über eine Dauer von (60_0^{+15}) s belastet.

Die Fallmasse wird auf eine Höhe angehoben, in der sich der Seilbefestigungspunkt $(2\ 300 \pm 10)$ mm unter der untersten Kante der Bohrung befindet (siehe Bild 9) [hier Abbildung 17 – Anm.].

Die Klemme(n) wird (werden) geöffnet, der Strang bzw. die Stränge werden bei 3-facher Wicklung um den Poller belassen. Das Prüfmuster wird mit einer Masse von 10 kg unter den Klemmen für eine Dauer (60_0^{+15})s belastet. Es wird sichergestellt, dass es keine Berührung zwischen den Klemmen und der 10-kg-Masse gibt und dass es zu keinem Durchhang im Seil zwischen dem Poller und der Umlenkplatte kommt.

Anschließend wird das Seil in der bzw. den Klemmen befestigt. Bei einer Prüfung im Doppelstrang wird sichergestellt, dass die Spannung in beiden Seilsträngen ähnlich ist.

Das Prüfmuster wird mit der Fallmasse als statische Last über eine Dauer (60_0^{+15})s belastet. Der Abstand von der untersten Kante der Bohrung bis zum Befestigungspunkt wird mit einer Messunsicherheit von ± 5 mm gemessen. Dieser Abstand ist H_0 .

Das Seil wird an der Klemme markiert (bei Prüfung im Doppelstrang werden beide Stränge markiert).

Vor jedem Fall wird die Fallmasse auf eine Höhe angehoben, in der sich der Mittelpunkt der Seilbefestigungseinrichtung ($2\ 300 \pm 5$) mm über der untersten Kante der Bohrung befindet (siehe Bild 9) [hier Abbildung 17 – Anm.].

Die Fallmasse wird ausgelöst.

Beim ersten Fall wird aufgezeichnet:

- die maximale Kraft in dem Seil bzw. in den Seilen, welche(s) an der Fallmasse angebracht ist(sind);
- die maximale Längenänderung des Seils während des Falls. Dieser Abstand ist H_{max} .

Bei jedem Fall wird überprüft, ob die Fallmasse keinen stoßabsorbierenden Puffer berührt hat (außer wenn das Seil gerissen ist).

(DIN EN 892, S. 23)

Das Prozedere wird wiederholt, bis es zum Riss des Seils kommt. Die Anzahl der Versuche bis zum Riss des Seils wird als Sturzzahl definiert. (DIN EN 892, S. 24)

3.3.3 Norm für statische Bergseile

Die DIN EN 564 – Reepschnüre ist, im Vergleich zur DIN EN 892 – dynamische Bergseile, kurz. Die Norm fordert für alle Reepschnüre eine einzuhaltende Mindestbruchkraft F_{Bmin} , die sich gemäß Gleichung (2) berechnen lässt.

$$F_{Bmin} = d_{nom}^2 \times f \quad (2)$$

mit: F_{Bmin}Mindestbruchkraft
 d_{nom}Nenndurchmesser der Reepschnur in mm
 $f = 200 \text{ N/mm}^2$...Konstante
 (DIN EN 892, S. 5)

Die Bestimmung der Bruchkraft erfolgt unter konstanter, einspannlängenabhängiger Belastungsgeschwindigkeit in einer Zugprüfmaschine. Der einzige weitere Test besteht in der Ermittlung der längenbezogenen Masse (DIN EN 892, S. 6).

Klassischerweise handelte es sich bei statischen Bergseilen um Reepschnüre. Seit einigen Jahren gibt es jedoch den Trend auf Hochtouren statt dynamischer Seile, hyperstatische Seile einzusetzen, wenn keine Kletterpassagen zu überwinden sind (Popall, 2014). Da keine eigene Norm existiert (Stand: Februar 2020) erfolgt häufig eine Zertifizierung gemäß DIN EN 564. Ein Beispiel aus dieser Gruppe ist die „RAD LINE 6mm“ der Fa. Petzl, die diese sogar vermarktet als

Ultraleichte, kompakte, hyperstatische Reepschnur für Skibergsteiger zur Spaltenbergung, zum Abseilen und zum Anseilen auf einem Gletscher [...]

(Petzl Distribution SAS, 2019)

Es gibt viele Vor- und Nachteile, die für und gegen die Verwendung solcher Seile auf Hochtouren sprechen. Da bereits in Kapitel 3.3.1 auf die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Materialien eingegangen wurde, wird hier nur ein kurzer Überblick über die wichtigsten Punkte in Hinblick auf die Verwendung auf Hochtouren ohne Kletterpassagen gegeben.

- **Gewicht**
Die „RAD LINE 6mm“ der Fa. Petzl, um bei obigem Beispiel zu bleiben, besitzt eine Masse von 22 g/m. Bei einem Seil mit 50m entspricht das 1100g (Petzl Distribution SAS, 2019). Im Gegensatz dazu besitzt das „Iceline 8.1mm Golden Dry“ der Fa. Beal eine Masse von 39 g/m (Beal, 2019), was 1950g bei einem Seil mit 50m entspricht. Die potenzielle Gewichtseinsparung liegt bei etwa 850g.
- **Höhere Schnittfestigkeit**
Hochfesten Statikseile wie die „RAD LINE 6mm“ der Fa. Petzl bestehen typischerweise aus Dyneema® (UHMWPE) oder vergleichbaren Materialien, was zu einer höheren Schnittfestigkeit (siehe Kapitel 3.3.1) führt (Petzl Distribution SAS, 2019).
- **Wasseraufnahme**
Wie bereits in Kapitel 3.3.1 beschrieben nimmt PA Wasser auf, was zu einem höheren Gewicht, einem schlechteren Handling und einer Reduzierung der Festigkeit führt. Hersteller bekämpfen dieses Problem bei dynamischen Bergseilen, indem sie die Seile bzw. deren Fasern imprägnieren. (Edelrid, 2019, S. 10)
- **Keine Seildehnung**
Hierbei handelt es sich um Vor- und Nachteil gleichermaßen. Vorteilhaft ist der de facto Wegfall der Seildehnung bei Bergungen (Petzl Distribution SAS, 2019). Nachteilig ist, dass dadurch im Sturzfall erheblich höhere Fangstoßkräfte auftreten. Deshalb sind solche Seile für das klassische Klettern, abgesehen von der Verwendung beim Standplatzbau, ungeeignet. (Popall, 2014)

3.3.4 Aufbau von Seilen

Da sowohl die DIN EN 892 – dynamische Bergseile, als auch die DIN EN 564 – Reepschnur, Seile in Kernmantelkonstruktion vorschreiben wird im Folgenden auch nur auf diese Seilform eingegangen.

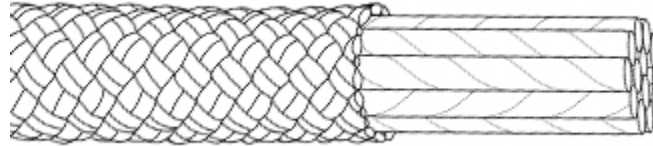


Abbildung 19: Seil in Kernmantelkonstruktion
(TEUFELBERGER Fiber Rope Corporation, 2019)

Für die Herstellung des Kerns werden beim Verzwirnen dünne Fasern zu einem Grundzwirn verdreht. Bei Dynamikseilen verleiht das Verzwirnen den Seilen eine Grunddynamik. Anschließend erfolgt eine Behandlung in einem Autoklav, bei dem die Fasern durch eine spezielle Kombination aus Hitze, Zeit und Druck zusammengeschrumpft werden. Dadurch erhält ein Dynamikseil seine Eigenschaften. Der Mantel wird analog zu den Kernfasern in Schlauchform verwebt und ebenfalls im Autoklav behandelt. Anschließend wird der Schlauch wieder aufgetrennt und das so erhaltene Garn wird in einem letzten Verarbeitungsschritt auf den Kern gewebt. Abschließend können abhängig vom späteren Verwendungszweck Veredelungsprozesse durchgeführt werden (z.B. Imprägnierungen). (Edelrid, 2019, S. 5ff)

Bei statischen Bergseilen aus Aramid und UHMWPE werden die Grundfasern zwar ebenfalls verzwirnt, jedoch weniger feinmaschig. Dadurch ergibt sich auch bei statischen Bergseilen eine im Vergleich zur Grundfaser höhere Dehnbarkeit. Die Steigerung ist aber wegen unterschiedlicher Verfahren wesentlich geringer. (Zusammenfassung eines Telefongesprächs mit Hr. Martin Schlemmer von der Fa. Edelrid vom 3. September 2019)

3.3.5 Auswirkung der Seileigenschaften auf das Halten von Spaltenstürzen

Die Phase unmittelbar nach dem (Spalten-) Sturz eines Seilschaftsmitglieds lässt sich grob in zwei Phasen teilen

1. Aufbau der Seilspannung

Der Sturzzug überträgt sich auf das haltende Seilschaftsmitglied (Popall, 2014).

2. Halten des Sturzes

Das gestürzte Seilschaftsmitglied versucht zu bremsen und das haltende Seilschaftsmitglied versucht dem Sturzzug zu widerstehen. Im günstigsten Fall erfolgt dieser Vorgang durch schnelle Gewichtsverlagerung, im ungünstigeren Fall durch die Reibung zwischen dem haltenden Seilschaftsmitglied und der Gletscheroberfläche. (Popall, 2014)

Je nachdem, ob ein dynamisches, oder ein statisches Bergseil verwendet wird, ergeben sich unterschiedliche Situationen beim Versuch einen Spaltensturz zu halten.

ad 1) Wie in den Kapiteln 3.3.1 und 3.3.3 beschrieben ist besitzen statische Bergseile, und hier besonders Seile aus UHMWPE, nahezu keine Seildehnung. Das führt zu einem abrupten Aufbau der Seilkraft. Bei dynamischen Bergseilen erfolgt der Aufbau der Seilkraft aufgrund der Seildehnung hingegen über einen längeren Zeitraum, was als angenehmer empfunden wird. (Popall, 2014)

ad 2) Bei dynamischen Bergseilen tritt nach dem Initialen Fangstoß ein Federn auf („Jojo-Effekt“). Aufgrund dieser Tatsache ist das Halten eines Sturzes einfach, solange das haltende Seilschaftsmitglied auf den Sturzzug vorbereitet ist und sich nicht in Bewegung befindet. Bei unerwarteten Sturzzügen ist es hingegen kaum möglich den Sturz sofort abzufangen. Bei hyperstatischen Seilen tritt genau der gegenteilige Effekt ein. Einem haltenden Seilschaftsmitglied das sich in Bewegung befindet und nicht auf den Sturz gefasst ist, fällt es leichter den Sturzzug abzufangen, solange der Sturzzug das haltende Seilschaftsmitglied von vorne trifft. Der Grund liegt im Fehlen des Jojo-Effekts.

Es wurden in diesem Zusammenhang leider keine Angaben über Sturzzüge gemacht, die von hinten auf ein Seilschaftsmitglied wirken. (Popall, 2014)

Ein weiterer wichtiger Faktor beim Halten eines Sturzes ist die Seiloberfläche. Da sich das Seil bei einem Spaltensturz in den Spaltenrand (Spaltenlippe) hinein gräbt, tritt Reibung zwischen Seil und Spaltenrand auf. Diese Reibung steigt mit der Oberflächenrauigkeit des Seils an, was das Halten eines Spaltensturzes erleichtert. (Popall, 2014) Weiters kommt durch das Hineingraben ein immer längeres Stück des Seils und ein immer größerer Anteil des Umfangs in Kontakt mit dem Gletscher. Zu guter Letzt tritt durch das Gleiten des Seils über die Umlenkung der Effekt auf, dass sich die Sturzdauer für das stürzende Seilschaftsmitglied verlängert. Dadurch fallen die auftretenden Maximalkräfte geringer aus. Auch diese Effekte werden im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt.

3.4 Mechanik

Hier wird eine Übersicht über die bekannten mechanischen Werte gegeben, die für unterschiedliche Sturzscenarien auf Gletschern relevant sind.

3.4.1 Stürze auf Gletscherhängen

Bereits in den 1980er Jahren wurde gezeigt, dass bei einer Hangneigung von 38 Grad und hartem Firn, in dem aber noch ohne Steigeisen aufgestiegen werden konnte, das Halten eines Sturzes selbst für eine Gruppe junger Heeresbergführeranwärter der Bundeswehr unmöglich war (Schubert, 2016, S. 231ff). Im Rahmen dieser Versuche wurden Untersuchungen durchgeführt, um festzustellen welchen Kräften eine Person mit 70 bis 80 kg Körpergewicht während des Stehens/Gehens widerstehen kann. Die entsprechenden Mitreißkräfte sind in Tabelle 6 angegeben.

Stand, seitliche Zugbelastung	0,3 in kN
Stand, frontale Zugbelastung	0,4 in kN
Gehen, seitliche Zugbelastung	0,05 – 0,2 in kN
Gehen, frontale Zugbelastung	0,05 – 0,5 in kN

Tabelle 6: Mitreißkräfte für unterschiedliche Belastungsrichtungen während des Stehens und Gehens (Schubert, 2016, S. 232)

Die Gründe für die stark unterschiedlichen Mitreißkräfte während des Gehens resultieren vermutlich aus den Gangphasen und variieren je nachdem in welcher Phase der Sturzzug erfolgt.

Bei Sturzversuchen während des Bergaufgehens auf einem weichen Firnhang war es den Teilnehmenden bereits bei 26° Steigung nichtmehr möglich den Sturz eines einzelnen am Seilschaftsende stürzenden Seilschaftsmitglieds abzufangen. Auch wenn ein Absturz bei dieser Steigung nicht zwingend ist, ist das Halten solcher Stürze häufig Glück. (Schubert, 2016, S. 243)

Ein wichtiger Grund für die schwere Haltbarkeit von Stürzen ist der geringe Reibungskoeffizient, der zwischen dem stürzenden Seilschaftsmitglied und dem Gletscher auftritt. Typische Reibungskoeffizienten für verschiedene „Materialpaarungen“ sind in Tabelle 7 angegeben.

Seilschaftsmitglied auf hartem Firn oder Eis, unabhängig von der Kleidung	$\mu = 0.03$
Seilschaftsmitglied auf weichem Schnee mit Kleidung aus Polyamid (PA6)	$\mu = 0.2$
Seilschaftsmitglied auf weichem Schnee mit normaler Kleidung	$\mu = 0.3$

Tabelle 7: Reibungskoeffizient zwischen stürzendem Seilschaftsmitglied und Gletscher (Würtl, 2005)

Für die dritte in Tabelle 7 angegebene Paarung wird keine Definition dafür angegeben was unter „normaler Kleidung“ verstanden wird. Da der Reibungskoeffizient höher ist als bei der Paarung mit Kleidung aus Polyamid wird aber von einem raueren Material, wie etwa Wolle ausgegangen.

Als nächstes soll die Frage nach den im Sturzfall auftretenden Kräften betrachtet werden.

Sulser geht bei seinen 2009 durchgeführten Versuchen zu Kräften, die infolge von Stürzen von Seilschaftsmitgliedern an Standplätzen auftreten, von den Voruntersuchungen von Pit Schubert aus (Sulser, 2012). Die durchgeführten Versuche hatten die folgenden Rahmenbedingungen

Nachstiegssturz: Sturz von 1 bis 3 Personen mit einem Gewicht von ca. 80 – 85kg und je 5m ausgegebenes Seil. Es wurden für jedes Sturzscenario mindestens fünf Versuche durchgeführt.

Pendelsturz: Fallgewicht mit 78.5kg und 5m ausgegebenes Seil.

Vorstiegssturz: Fallgewicht mit 78.5kg und 6m bzw. 14m ausgegebenem Seil. Es wurden für jedes Sturzscenario bis zu drei Versuche durchgeführt.

(Sulser, 2012)

Die Stürze erfolgten immer in einen Standplatz. Das Gelände wies bei den Nachstiegs- und Pendelsturzversuchen eine Steigung von 38°, und bei den Versuchen zu Vorstiegsstürzen eine Steigung von 35° auf. Die Steigung hatte damit bei den Versuchen zu Nachstiegsstürzen dieselbe Steigung wie bei Schubert (siehe oben). Die Sturzkräfte wurden mit einer elektronischen Kraftmessdose gemessen, wobei keine näheren Angaben zu Art oder Modell der Kraftmessdose gegeben sind. Die Versuchsreihe wurde mit einem [...] *ca. drei Jahre alten Einfachseil Beal Booster durchgeführt*. Im Falle eines Nachstiegssturzes stürzte immer die unterste Person und riss in der Folge immer die Oberstehenden mit. (Sulser, 2012)

Diese Ergebnisse entsprechen diesbezüglich denen von Schubert (Schubert, 2016). Unklar an diesen Versuchen bleibt wieviel Schlappseil im Moment des Sturzes bestand. Da es sich bei Sulser um einen ausgebildeten Bergretter handelt (Sulser, 2012), wird davon ausgegangen, dass die Seildisziplin eingehalten wurde und zum Zeitpunkt des Sturzes kein übermäßiges Schlappseil bestand.

Für den Fall des Nachsteigersturzes ergaben sich am Standplatz die in Tabelle 8 dargestellten Werte

	höchster Wert in kN	tiefster Wert in kN	Mittelwert der 5 Versuche in kN
1 Nachsteiger durch HMS gebremst	0,86	0,54	0,71
1 Nachsteiger durch Plate gebremst	1,15	0,86	0,99
2 Nachsteiger durch HMS gebremst	1,53	0,9	1,21
2 Nachsteiger durch Plate gebremst	1,64	1,21	1,38
3 Nachsteiger durch Plate gebremst	1,92	1,03	1,58

Tabelle 8: Kräfte am Standplatz bei Sturz des untersten nachsteigenden Seilschaftsmitglieds (Sulser, 2012)

Hier zeigt sich eine Konsistenz der Ergebnisse mit denen von Schubert (Schubert, 2016), da sämtliche Ergebnisse, auch der tiefste Wert eines stürzenden Nachsteigers, über den in Tabelle 6 gezeigten Mittreißkräften liegen.

Zum Nachstiegssturz resümiert Sulser:

[...], dass bei einer Hangneigung von 38° nur eine Sicherung von Standplatz zu Standplatz den Absturz der Seilschaft bei Sturz eines Mitglieds verhindern kann. Das kurze Seil ist hierfür ungeeignet. (Sulser, 2012)

Für den Fall des Pendelsturzes ergaben sich am Standplatz die in Tabelle 9 dargestellten Werte

	höchster Wert in kN	tiefster Wert in kN	Mittelwert der 3 Versuche in kN
Pendelsturz mit 5m ausgegebenem Seil	1,62	1,24	1,4

Tabelle 9: Kräfte am Standplatz bei Pendelsturz (Sulser, 2012)

Es wird nicht angegeben, ob der Pendelsturz mit einer HMS oder einer Plate gebremst wurde. Es zeigt sich jedoch, dass die Belastungen in jedem Fall über denen des Sturzes eines einzelnen Nachsteigers liegen.

Die für die Vorstiegssturzversuche gemessenen Kräfte sind in Tabelle 10 dargestellt

	höchster Wert in kN	tiefster Wert in kN	Mittelwert der 3 Versuche in kN	Anmerkung
6 Meter ausgegebenes Seil durch HMS gebremst	2,99	2,26	2,625	nur 2 Versuche
6 Meter ausgegebenes Seil durch Knicksicherung gebremst	1,49	1,49	1,49	nur 1 Versuch
14 Meter ausgegebenes Seil durch HMS gebremst	2,9	2,36	3	3 Versuche
14 Meter ausgegebenes Seil durch Knicksicherung gebremst	1,42	1,12	1,27	nur 2 Versuche

Tabelle 10: Kräfte am Standplatz bei Sturz des untersten Nachsteigers (Sulser, 2012)

Zu beachten ist, dass bei 6m ausgegebenem Seil, durch die dynamische Seildehnung Sturzlängen von ca. 13 – 14m und bei 14m ausgegebenem Seil Sturzlängen von ca. 30 – 32m erreicht wurden. Interessant an diesem Ergebnis ist, dass die Kräfte nur von der Sicherung und nicht der Länge des ausgegebenen Seils abhängen. Daraus lässt sich ableiten, dass möglicherweise nach einer Rutschstrecke von 12m bereits die Höchstgeschwindigkeit erreicht wurde und es keine weitere Beschleunigung gab. (Sulser, 2012)

3.4.2 Stürze beim Gehen am kurzen Seil

Weiters interessant sind die Kräfte, die beim Halten eines Sturzes am kurzen Seil auftreten. Braun-Elwert führte dazu eine Versuchsreihe durch. Es wurde dafür eine 30° steile Rampe mit Teppichboden ausgelegt, auf der eine Testperson mit Steigeisen aufstieg. Das Halteseil wurde über reibungsarme Seilrollen leicht straff gehalten. Zu einem zufälligen Zeitpunkt wurde dann über einen Shunt ein Fallgewicht, das an einem Turm hing, so in das Seil eingeklinkt, dass es zu keinem freien Fall des Fallgewichts kam. (Braun-Elwert, 2008)

Die genaue Versuchsanordnung ist aus Abbildung 20 ersichtlich.

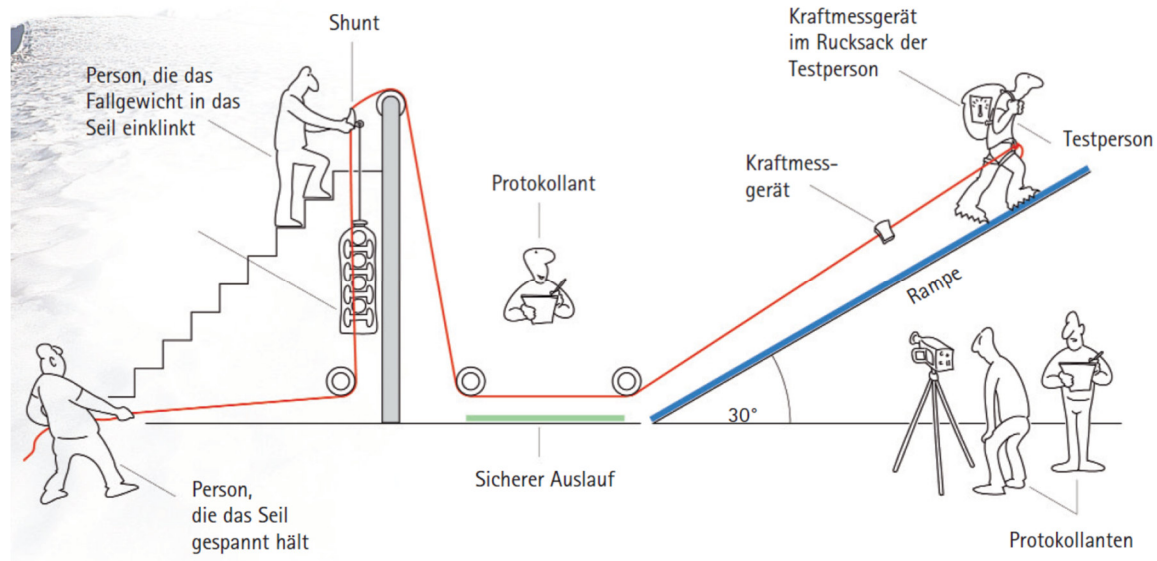


Abbildung 20: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Haltekräfte am kurzen Seil (Braun-Elwert, 2008)

In diesem Versuch konnten 13 Testpersonen in 193 Fallversuchen ein Fallgewicht von 10kg immer halten. Es gab auch Fälle, in denen 40kg gehalten wurden, jedoch nur bei günstiger Haltung und spezieller Anseilart. Die Grenze, bis zu der etwa 50% aller Stürze gehalten wurden, lag je nach Anseilart und Gehrichtung zwischen 20kg und 30kg. Es ist anzunehmen, dass die Versuchspersonen, dadurch, dass Sie auf einen Zug gefasst waren, höheren Kräften widerstehen konnten. (Braun-Elwert, 2008) Allgemein entsprechen die Ergebnisse denen von Schubert (siehe Tabelle 6).

Semmel (Semmel, 2017) führte im Rahmen einer Bergführerfortbildung eine Versuchsreihe für Stürze während des Gehens am kurzen Seil durch. Der höchste gehaltene Wert lag hier bei 0.5kN, was ebenfalls mit den Werten von Schubert (Schubert, 2016) und Braun-Elwert (Braun-Elwert, 2008) übereinstimmt. Er legt vier Kriterien fest, die für das Halten des Sturzes wichtig waren:

1. Die Schrittstellung während des Haltens
2. Das Gewichtsverhältnis der Teilnehmenden
3. Das verwendete Seil
4. Das Gelände

(Semmel, 2017)

Beim Verwenden eines Einfachseils (Edelrid Swift 8,9mm) wurden unter gleichen Rahmenbedingungen Kräfte von 0.3 – 0.6kN gemessen, während bei Verwendung eines statischen Bergseils (Petzl RAD-Line 6,5mm) Kräfte von 0.4 – 1kN gemessen

wurden. Es zeigt sich durch einen Vergleich mit Tabelle 6, dass das Halten eines Sturzes mit einem Statikseil wesentlich unwahrscheinlicher ist. (Semmel, 2017)

3.4.3 Spaltenstürze

Für den Spaltensturz wurden zwei Versuche der Bergführerverbände von Österreich, Schweiz und Südtirol durchgeführt. Dabei wurden folgende beiden Szenarien untersucht

1. Worst Case – Das Halten einer 85kg schweren Tonne, die von einer 75kg schweren Person gehalten werden musste. Die „stürzende“ Tonne befand sich hangaufwärts und es befanden sich 30cm Firnauflage auf dem Gletscher, darunter war Blankeis.
2. Best Practice – Das Halten einer 85kg schweren Person, die von einer 75kg schweren Person gehalten werden musste. Die stürzende Person befand sich hangabwärts und es lagen 75cm Firnauflage auf dem Gletscher. Weiters wurden drei Bremsknoten verwendet.

Beide Szenarien wurden mit Statikseilen (Petzl RAD-Line und Edelrid Rap-Line), Halbseilen (keine Spezifizierung, um welches Seil es sich gehandelt hat) und Einfachseilen (ebenfalls keine Spezifizierung, um welches Seil es sich gehandelt hat) durchgeführt. (Semmel, 2017)

Die beim Haltenden auftretenden Kräfte sind in Tabelle 11 dargestellt.

	Kräfte am Haltenden hangaufwärts in kN	Kräfte am Haltenden hangabwärts in kN
statisches Bergseil	3,1-3,4	1,4-1,8
Halbseil	1,3	1,2
Einfachseil	1,5	1,2

Tabelle 11: Am haltenden Seilschaftsmitglied bei Spaltensturz auftretende Kräfte (Semmel, 2017)

Alle Kräfte lagen über den als haltbar angenommenen 0.5kN (siehe Kapitel 3.4.1). Diese Feststellung ist insofern interessant, da Popall ein auf die Spalte Zugehen

beschreibt, das in manchen Situationen möglich ist und die Chance erhöht einem Sturzzug zu widerstehen (Popall, 2014). Bedauerlicherweise sind zu den Versuchen von Semmel auch keine Daten zur Sturzlänge gegeben. Weiters wurden beide Versuche nicht unter gleichen Rahmenbedingungen (bergab/bergauf, gleiche Schneelage) durchgeführt und lassen daher wenig Rückschlüsse auf den allgemeinen Einfluss von Bremsknoten zu. Aufgrund der Ergebnisse ist aber naheliegend, dass die Verwendung von Bremsknoten die Unterschiede der Seilarten zumindest teilweise ausgleicht.

3.5 Menschliche Faktoren (Reaktionsgeschwindigkeit)

Unter menschliche Faktoren fallen sowohl gut messbare Parameter, wie etwa haltbare Kräfte, als auch schwer messbare, etwa der momentane emotionale Zustand einer Person. Da Faktoren wie haltbare Kräfte, oder Veränderungen des Reibungskoeffizienten durch die Wahl der Kleidung, bereits besprochen wurden, wird hier auf Faktoren eingegangen, die die Reaktionszeit betreffen.

Das Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion (Burg & al., 2017) gibt betreffend die Reaktionszeit eines Fahrers die folgende Definition

Die Reaktionsdauer der absolut unvorbereiteten Fahrer wurde vom Zeitpunkt des Erscheinens einer Fußgängeratruppe aus Schaumstoff hinter einer Sichtblende bis zum Beginn des Bremsdruck- bzw. Lenkradwinkelanstiegs definiert und gemessen.

(Ibid., S. 289)

Auf Stürze auf Gletschern umgelegt bedeutet das, die Reaktionszeit beginnt mit dem Erkennen der Gefahrensituation und endet erst mit einer messbaren Bremskraft.

Die Reaktionszeit gliedert sich in unterschiedliche Phasen. In Tabelle 12 sind die aus dem Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion (Burg & al., 2017) entnommenen Phasen auf die Sturzsituation auf Gletschern umgedeutet.

	Definition gemäß Handbuch	Äquivalent für stürzende Seilschaftsmitglieder bei Gletscherstürzen	Äquivalent für haltende Seilschaftsmitglieder bei Gletscherstürzen
Wahrnehmungsdauer	Zeit vom Erscheinen des Signals bis zur optischen oder akustischen Wahrnehmung.	-	Zeit, bis ein Sturz gesehen wird. Wird der Sturz nicht gesehen, dann Zeit bis der Sturzzug spürbar wird.
Erkennungsdauer	Von der Wahrnehmung des Signals bis zur Erkennung einer notwendigen Abwehrhandlung	Zeit, bis das Seilschaftsmitglied realisiert, dass es fällt.	Zeit, bis der Sturzzug als solcher wahrgenommen wird
Entscheidungsdauer	Von der Erkennung der Reaktionsaufforderung bis zur Entscheidung über die Art der Handlung	Zeit, bis das Seilschaftsmitglied sich entschieden hat, wie der Sturz am besten zu bremsen ist	Zeit, bis das Seilschaftsmitglied sich entschieden hat, wie es dem Sturzzug widerstehen kann
Motorische Phase	Reizleitung und Muskelaktivierung. 0.005s bis 0.05s.	siehe Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion	siehe Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion
Umsetzdauer	Vom Beginn der Handlung (Wegnahme des Fußes vom Gaspedal) bis zum Berühren des Bremspedals (sekundäre Reaktionszeit). 0.15s bis 0.3s.	Zeit, bis eine Bremsposition eingenommen wird	Zeit bis eine Halte-/Bremsposition eingenommen wird
Anlegedauer	Überwindung der Spiele und Elastizitäten im mechanischen Teil der Bremsanlage oder der Lenkung. 0.015s bis 0.05s	Zeit bis der Pickel unter den Körper gebracht wird. Entfällt wenn nur aufgrund der Körperreibung gebremst wird.	siehe links
Schwelldauer	Vom Anfang des Bremsdruckanstiegs bis zum Erreichen des Maximaldrucks für die jeweilige Bremsung bzw. des notwendigen Lenkradwinkels (tertiäre Reaktionszeit). 0.15s bis 0.3s.	Zeit bis der Pickel im Eis greift. Entfällt wenn nur aufgrund der Körperreibung gebremst wird.	siehe links

Tabelle 12: Phasen der Reaktionszeit

(Burg & al., 2017, S. 289)

Es ist naheliegend, dass eine Person, die gedanklich abwesend ist, langsamer auf ein Problem, etwa den Sturz eines Seilschaftsmitglieds, reagieren wird, als eine völlig aufmerksame Person. Ähnliches gilt für Alkoholkonsum. Da die Berücksichtigung dieser Faktoren schwer quantifizierbar ist und den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird im Weiteren von einer Person mit durchschnittlicher Reaktionszeit ausgegangen.

Aufgrund mangelnder Daten zu Reaktionszeiten bei unerwarteten Stürzen eines Seilschaftsmitglieds wird hier als Referenz die Reaktionszeit im Straßenverkehr herangezogen. Diese Annahme gilt nur für den Fall, dass das haltende Seilschaftsmitglied das stürzende Seilschaftsmitglied sieht. Andernfalls ist die Wahrnehmungsdauer die Zeit, die zwischen dem Sturz und dem Zug auf das haltende Seilschaftsmitglied verstreicht. Es wird angenommen, dass Fahrzeuglenker im Durchschnitt aufmerksamer auf den Straßenverkehr achten als die Mitglieder einer Gletscherseilschaft aufeinander. Der Grund dafür ist, dass in den seltensten Fällen mit dem Sturz eines Seilschaftsmitglieds gerechnet wird. Daher wird als Referenz die Reaktionszeit eines Straßenbahnfahrers herangezogen. Straßenbahnfahrer sind selten mit einfachen, klaren Reaktionsaufforderungen konfrontiert. Eine Situation, die mit der auf einem Gletscher vergleichbar ist. Dadurch ergibt sich eine Reaktionszeit von 2s (Burg & al., 2017, S. 513). Diese 2s sind im Normalfall länger als die Zeit, bis ein haltendes Seilschaftsmitglied den Sturzzug spürt. Ein Reagieren auf einen Sturzzug, bevor dieser gehalten werden soll, ist daher nur in absoluten Ausnahmefällen möglich. Eine mögliche Ausnahme stellt einen sehr aufmerksamen Bergführer mit Gast dar.

Die Entscheidungsdauer ist von den Möglichkeiten abhängig, die zum Halten des Sturzes zur Verfügung stehen (Burg & al., 2017, S. 290). Da sich diese meistens auf das Fallenlassen, oder im Fall eines Spaltensturzes in einem gewissen Maße auf das auf-die-Spalte-zugehen beschränkt, wird die Entscheidungsdauer als kurz angenommen.

Die Umsetzdauer ist stark davon abhängig in welcher Situation ein Seilschaftsmitglied von einem Sturzzug getroffen wird. Bei einem Sturz auf einer Gletscherflanke kann diese lang sein, wenn sich ein haltendes Seilschaftsmitglied erst vom Rücken auf die Brust drehen und die Bremshaltung einnehmen muss. Es wird angenommen, dass dieser Vorgang bei einer ungeübten Person im Extremfall einige Sekunden dauern kann. Bei einem Spaltensturz in der Ebene ist die Umsetzdauer hingegen gering, da das haltende Seilschaftsmitglied zu Boden

gerissen wird und damit augenblicklich durch die auftretende Körperreibung bremst. Ein weiterer Punkt, der in die Umsetzdauer einfließen kann, ist wenn ein Seilschaftsmitglied den Pickel nicht in der Hand trägt, sondern aus Bequemlichkeit Wanderstöcken verwendet und den Pickel währenddessen in einem Pickelhalter am Rucksack (ORTOVOX SPORTARTIKEL GMBH, 2019) verstaut hat.

Für die Anlegedauer gelten ähnliche Überlegungen wie für die Umsetzdauer. Viel ist von der Routine abhängig, die ein haltendes Seilschaftsmitglied beim Bremsen mit einem Pickel besitzt.

Die Schwelldauer wird als kurz angenommen, da die Körperreibung sofort eintritt bzw. der Pickel schnell greift.

Aus diesen Gründen wird wie bereits beschrieben als Untergrenze für die Gesamtreaktionszeit eines haltenden Seilschaftsmitglieds bei überraschend auftretendem Sturzzug die Reaktionszeit eines Straßenbahnfahrers von 2s angenommen.

Für ein Seilschaftsmitglied das selbst stürzt muss eine Fallunterscheidung getroffen werden. Bei einem Spaltensturz ist die eigene Reaktionszeit im Fall eines kompletten Einbruchs irrelevant, da das Seilschaftsmitglied keine Gegenmaßnahmen setzen kann. Beim Sturz durch Stolpern oder ausgleiten wird als absolute Untergrenze die durchschnittliche Reaktionszeit eines PKW-Fahrers von 0.7 Sekunden angenommen (Burg & al., 2017, S. 291). Als normale Reaktionszeit wird wieder die Reaktionszeit eines Straßenbahnfahrers herangezogen.

4 Entwicklung des mechanischen Ersatzmodells

Wird der Seilschaftssturz auf einem Gletscher in ein mechanisches Ersatzmodell überführt, so lässt sich das System in Teile aufsplitten:

- Die Seilschaftsmitglieder lassen sich als Massen ansehen, die eine Aufstandsfläche besitzen und daher ab einer bestimmten Zugbelastung kippen. Die Aufstandsfläche des Ersatzmodells ist dabei abhängig von der Gangphase und der daraus resultierenden Haltekraft. Es tritt daher bei Überschreiten der Haltekraft kippen auf. Dieses Modell wird gewählt, da entweder Steigeisen oder Trittmulden im Firn ein Rutschen des Seilschaftsmitglieds auf dem Gletscher ausschließen.
- Das die Massen verbindende Seil

Im Sturzfall durchläuft die Seilschaft mehrere Phasen:

1. Phase der Beschleunigung des stürzenden Seilschaftsmitglieds. Die Beschleunigung kann entweder
 - a) rein luftgebremst, oder
 - b) Luft und Gleitreibungsgebremst sein.

Fall a) tritt für kurze Zeit bei Einbruch in eine Gletscherspalte auf. Fall b) tritt bei einem Sturz auf einem Gletscherhang auf.

2. Phase der Spannung des Seils. Das Seil spannt sich wodurch zwischen der gleitenden Masse (dem stürzenden Seilschaftsmitglied) und der ruhenden, oder sich langsam bewegenden Masse (das haltende Seilschaftsmitglied) eine Kraft übertragen wird. Die Größe des dadurch übertragenen Fangstoßes ist unter anderem von der Länge des Schlappseils, Art und Beschaffenheit des Seils, sowie der Position der Seilschaftsmitglieder relativ zueinander abhängig. Weiters ist wichtig, ob sich das Seil in einen Spaltenrand einschneidet. In diesem Fall wird die auf das haltende Seilschaftsmitglied wirkende Kraft durch die Reibung zwischen Seil und Spaltenrand reduziert (siehe Kapitel 3.4.3).

3. Phase des Fangstoßes. Diese Phase verläuft parallel zu Phase 2. Hier entscheidet sich, ob das haltende Seilschaftsmitglied dem Fangstoß widerstehen kann.
4. Phase der Beschleunigung des haltenden Seilschaftsmitglieds. Sollte das haltende Seilschaftsmitglied in 3. dem Fangstoß nicht widerstehen können, so wird die Masse des haltenden Seilschaftsmitglieds durch den Fangstoß in Bewegung versetzt.
5. Phase der Bremsung. Alle Seilschaftsmitglieder sind nach der Reaktionszeit dazu in der Lage durch aktives Bremsen, etwa mit einem Pickel, die eigene Bremskraft zu erhöhen.

Es handelt sich also um ein System von Massen (Seilschaftsmitglieder) auf einer geneigten Fläche mit Neigungswinkel α (Steigung), das durch Feder-Dämpfer-Elemente (Seil) miteinander verbunden ist und im Fall einer Abwärtsbewegung über eine variable Gleitreibung verfügt. Abbildung 21 illustriert dieses Ersatzmodell.

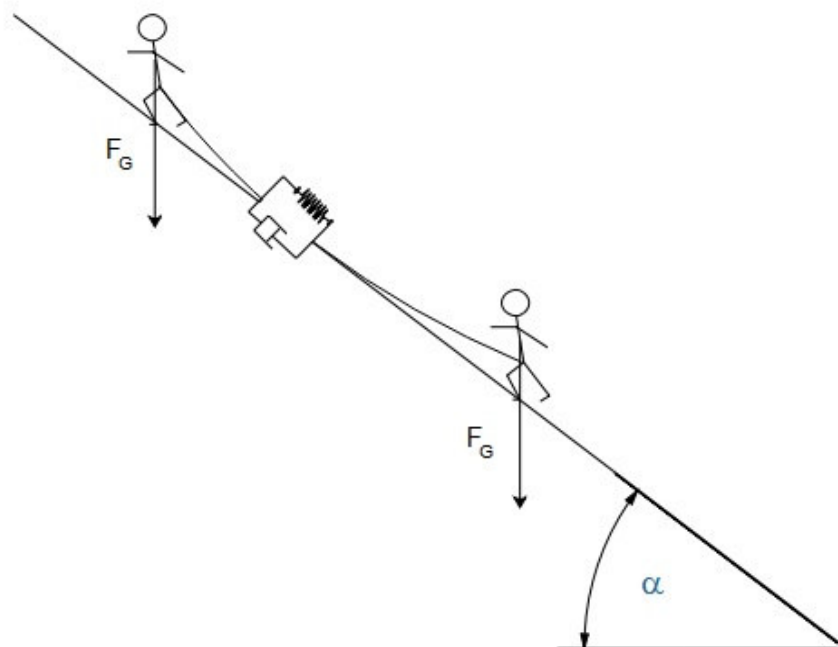


Abbildung 21: Grafische Darstellung des mechanischen Ersatzmodells einer zweier Gletscherseilschaft

Im Folgenden wird zuerst detailliert auf die einzelnen Faktoren im Sturzfall eingegangen. Anschließend werden die benötigten Modellparameter für ausgewählte Bergseile und den gebremsten Fall bestimmt. Danach folgt ein Modell für die oben beschriebenen Phasen des Sturzes der Seilschaftsmitglieder. In einem letzten Schritt wird ein gesamtes mechanisches Ersatzmodell für den Sturz eines Mitglieds einer Gletscherseilschaft und die Folgen für die Seilschaft präsentiert.

4.1 Einflussparameter im Sturzfall

Zur Analyse des Sturzablaufes und der beim Sturz auftretenden Kräfte ist es wichtig verschiedene Parameter einzubeziehen, die den Sturz direkt beeinflussen. Die dafür wichtigsten sind:

I. Steigung

Die Steigung des Hanges, auf dem sich die Seilschaft zum Zeitpunkt eines Sturzes bewegt, spielt aus 2 Gründen eine entscheidende Rolle.

Erstens übersteigen die im Sturzfall auftretenden Kräfte fast immer die Haltekräfte des nächsten Seilschaftsmitglied (siehe Kapitel 3.4). Dadurch wird das betreffende Seilschaftsmitglied zu Boden gerissen und in Richtung des gestürzten Seilschaftsmitglieds gezogen. (Schubert, 2016, S. 219ff) Da für die Reibkraft bei coulombscher Reibung

$$F_R = F_N \mu \quad (3)$$

gilt und μ im Allgemeinen unabhängig von der Neigung der Ebene ist, nimmt die Reibkraft mit zunehmender Steigung ab. Abbildung 22 zeigt die auftretenden Kräfte für einen Sturzzug hangabwärts.

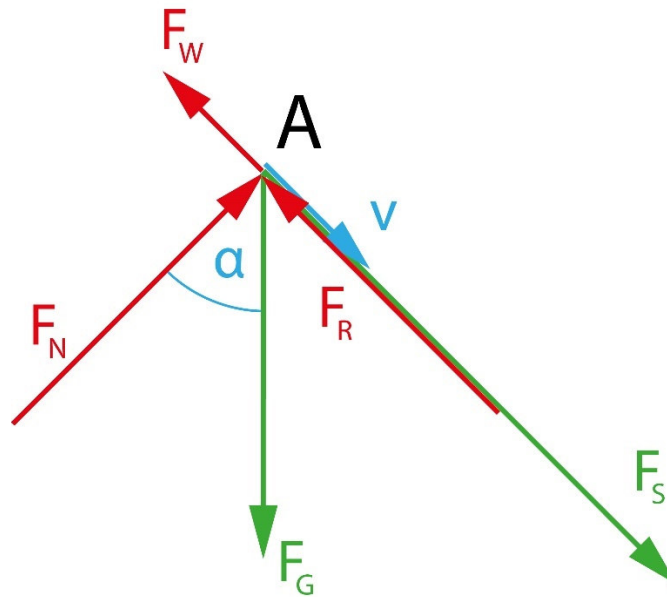


Abbildung 22: Kräftesystem eines allgemeinen Sturzes in der schiefen Ebene

Wie aus Abbildung 22 ersichtlich ist teilt sich für den Fall der schiefen Ebene die Gewichtskraft F_G des Haltenden auf einen Anteil entlang und einen Anteil normal zur Sturzebene auf. Ein haltendes Seilschaftsmitglied muss daher

$$F_R \geq F_G \sin \alpha + F_S - F_W \quad (4)$$

erfüllen, um die eigene Masse in ein statisches Gleichgewicht bringen zu können. Dabei sind F_S die Seilkraft und F_W die durch den Luftwiderstand indizierte Kraft. Ist die Reibung der Haltenden nicht ausreichend, kommt es zu einem Absturz der gesamten Seilschaft. Besonders gefährdet sind Zweierseilschaften (Schubert, 2016, S. 220).

Der Zweite Grund gilt für den Fall eines Spaltensturzes, aufgrund der, durch die Euler-Eytelwein-Gleichung

$$F_S = \frac{F_G}{e^{\mu_H \cdot \beta}} \quad (5)$$

dargestellten, Zunahme der Reibungskraft bei größerem Umschlingungswinkel des Seils am Spaltenrand.

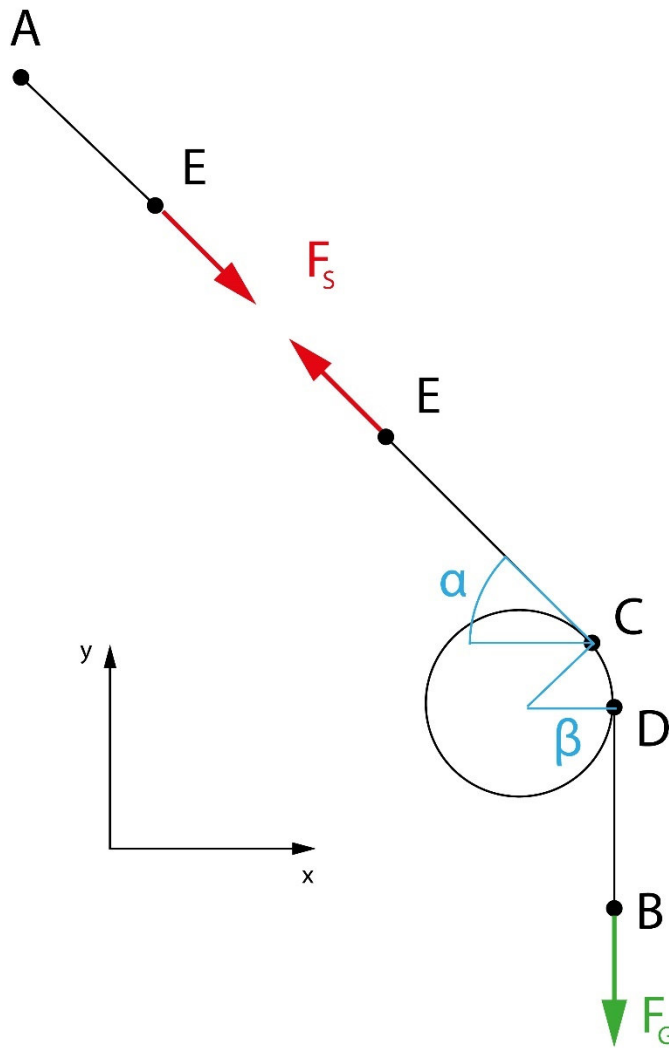


Abbildung 23: Kräftesystem für den Spaltensturz eines Seilschaftsmitglieds bei Steigung

Das in Abbildung 23 stürzende Seilschaftsmitglied ist in Punkt B in das Seil eingebunden und verursacht dort die Gewichtskraft F_G . Das Seil läuft dabei über die Spaltenlippe (Punkt C bis D). Das erste Seilschaftsmitglied nach dem gestürzten Seilschaftsmitglied ist in Punkt A in das Seil eingebunden. In Punkt E ist das Seil geschnitten dargestellt, um die innere Seilkraft F_S zu verdeutlichen. Der Hangneigungswinkel ist mit α , der Umschlingungswinkel des Seils an der Spaltenlippe mit β angegeben. Es gilt der Zusammenhang $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$. Wie aus Abbildung 23 in Verbindung mit der Euler-Eytelwein-Gleichung zu sehen ist, steigt die zum Halten des Sturzes bei gleicher Belastung durch B benötigte Kraft aufgrund des reduzierten Umschlingungswinkels mit positiver Steigung des Hanges an.

II. Richtung des Sturzzuges

Das Einbinden ins Seil erfolgt immer bauchseitig. Beim ersten Seilschaftsmitglied läuft es anschließend seitlich vorbei und weiter nach hinten zum nächsten Seilschaftsmitglied, das wieder mittig eingebunden ist. Alle Seilschaftsmitglieder gehen in einer Reihe, ihre Schwerpunkte befinden sich daher näherungsweise auf einer Linie.

Für die Seilschaftsmitglieder, die den Fangstoß halten müssen, ist es ein Unterschied, ob der Sturzzug von hinten, der Seite, oder vorne einwirkt (siehe Kapitel 3.4). Einerseits ergibt sich durch einen Sturz, der vor einem Seilschaftsmitglied stattfindet und von diesem gesehen wird, die Möglichkeit einer Gegenmaßnahme wie ein Verlagern des eigenen Schwerpunkts. Andererseits wirkt bei einem Sturzzug von hinten bzw. der Seite im Allgemeinen ein zusätzliches Drehmoment auf das haltende Seilschaftsmitglied. Abbildung 24 zeigt in der Draufsicht das Drehmoment, bezogen auf den Schwerpunkt, das durch eine Seilkraft von hinten verursacht wird. Dabei ist F_S die Seilkraft der stürzenden Person und M das durch den Sturzzug erzeugte Drehmoment, um eine durch den Schwerpunkt verlaufende vertikale Achse (x), der haltenden Person.

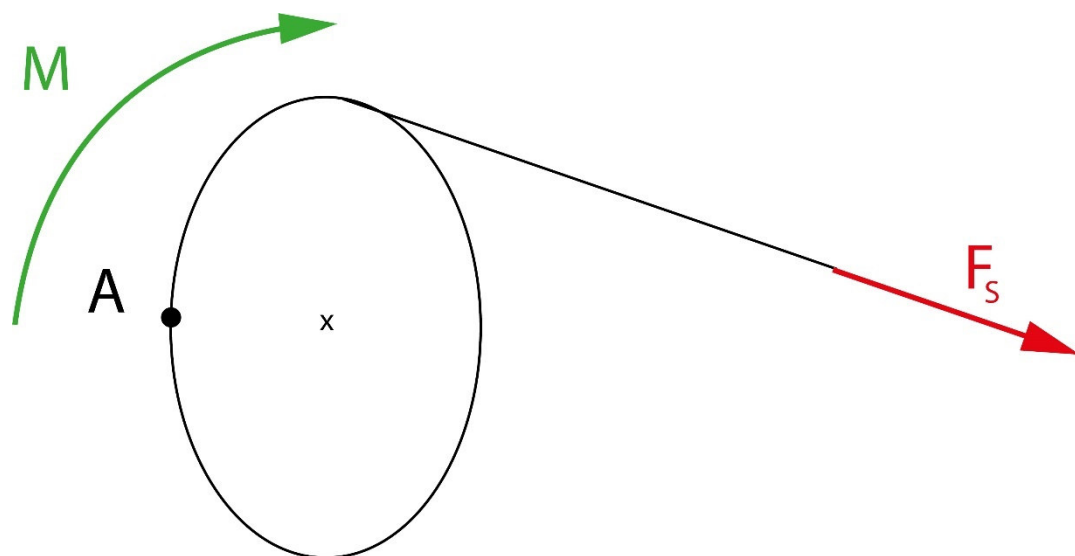


Abbildung 24: Kräftesystem bei einem Sturzzug von hinten

Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass auch der Sturz des ersten Seilschaftsmitglieds in einer aufsteigenden Seilschaft, beim zweiten Seilschaftsmitglied ein Drehmoment analog zu Abbildung 24 auslöst, sobald das erste Seilschaftsmitglied am Zweiten vorbeigefallen ist. Auf diese Weise

können auch vorausgehende Seilschaftsmitglieder Drehmomente durch einen Sturzzug auslösen. Dies gilt auch für Traversen über Gletscherhänge.

III. Gehrichtung während des Sturzzuges

Der Aufstieg gilt im Bergsport als weniger gefährlicher als der Abstieg. Diese Regel gilt auch für Hochtouren. So ereigneten sich von 1. November 2016 bis 31. Oktober 2017 50% (Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit, 2018) und von 1. November 2017 bis 31. Oktober 2018 44% (Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit, 2019) aller erfassten Unfälle bei Hochtouren im Abstieg. Zusätzlich zu dem erhöhten Grundrisiko stellt sich im Falle des Sturzes eines weiter oben am Hang gehenden Seilschaftsmitglieds während des Bergabgehens eine Kombination mit den obigen Punkten (I) und bei Gletscherspalten (II) ein.

IV. Position des stürzenden Seilschaftsmitglieds

Die Position eines stürzenden Seilschaftsmitglieds ist aus zwei Gründen wichtig.

1. Stürzendes Seilschaftsmitglied an einem der beiden Enden einer Seilschaft:

Dieser Umstand zeigt sich gut in Abbildung 22. Würde der Sturzzug, anders als dort dargestellt, nicht bergab, sondern bergauf auf das haltende Seilschaftsmitglied wirken, so würde die Gewichtskraft F_G gegen den Sturzzug wirken und das Halten des Sturzes unterstützen.

2. Stürzendes Seilschaftsmitglied zwischen zwei anderen Seilschaftsmitgliedern:

Dieser Fall tritt bei Spaltensturz eines mittleren Seilschaftsmitglieds auf, da bei einem normalen Sturz der nächsthöhere eine Sturzbelastung gemäß Abbildung 23 erfahren würde. Bei Einbruch eines mittleren Seilschaftsmitglieds in eine versteckte Spalte, verteilt sich die Belastung jedoch auf die beiden Nächststehenden. Im optimalen Fall bei guter Seildisziplin wäre die Belastung durch den Sturzzug für die beiden nächststehenden Seilschaftsmitglieder in etwa gleich.

V. Masseverteilung

Für eine schwerere Person ist es einfacher den Sturz einer leichteren Person abzufangen als umgekehrt (Sammel, 2017). Weiters kann eine schwerere Person, im Fall des Spaltensturzes eines anderen Seilschaftsmitglieds, aufgrund des höheren Eigengewichts eine höhere Reibkraft aufbringen (siehe Abbildung 22). Gleichzeitig steigt für schwerere Personen durch das höhere Gewicht aber das Risiko ihrerseits in eine verschlossene Spalte einzubrechen.

VI. Reaktionszeit

Eine aufmerksame Person hat im Fall eines Spaltensturzes durch Gewichtsverlagerung und durch Bewegung in Richtung des Sturzzuges die Möglichkeit einem Sturz besser zu widerstehen. Problematisch ist in diesem Zusammenhang, dass Spaltenstürze in der Regel überraschend auftreten. (Popall, 2014)

Bei Stürzen auf Gletscherflanken spielt die Reaktionszeit keine Rolle mehr sobald mehrere Seilschaftsmitglieder fallen, da ein Halten nur bei zufälligem gleichzeitigem Bremsen möglich ist (Schubert, 2016, S. 232f).

VII. Gangphase

Welchen Mitreißkräften ein haltendes Seilschaftsmitglied widerstehen kann hängt stark davon ab in welcher Phase eines Schrittes es sich befindet. Die höchsten Haltekräfte werden kurz nach dem Aufsetzen des vorderen Beins am Boden erreicht (Schubert, 2016, S. 232). Die in Abbildung 25 dargestellte rote Kurve stellt schematisch den Verlauf der haltbaren Kräfte dar.

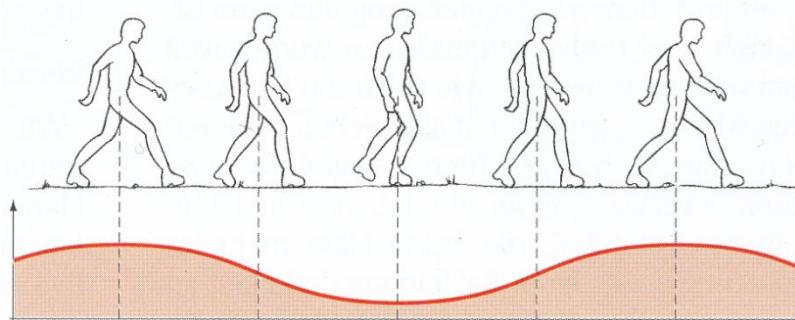


Abbildung 25: Gangphasen mit schematischer Darstellung der haltbaren Kräfte (rote Kurve)

(Schubert, 2016, S. 232)

VIII. Dynamik des Seils

Die maximale Kraft während des Fangstoßes fällt bei dynamischen Seilen niedriger aus als bei statischen Seilen. Andererseits federn dynamische Seile was das Halten eines Sturzes erschweren kann. Details zum Verhalten von unterschiedlichen Seilarten siehe Kapitel 3.3.5.

IX. Untergrund

Der Untergrund ist sowohl für die Wahrscheinlichkeit eines Sturzes wichtig als auch für die nachfolgenden Chancen den Sturz noch zu bremsen. Dabei spielt besonders der zwischen dem Untergrund und den stürzenden Personen auftretende Haftgrenz- bzw. Gleitreibungskoeffizient eine entscheidende Rolle. Details zu den Materialeigenschaften unterschiedlicher Untergründe und deren Gleitreibungskoeffizient bei Paarung mit einer Person siehe Kapitel 3.1.

Neben den genannten Parametern gibt es noch eine Reihe weiterer, besonders subjektiver, Parameter, die die Haltbarkeit eines Sturzes beeinflussen. Einer der Wichtigsten ist die Möglichkeit sich während des Sturzes über eine Flanke im Seil zu verfangen, was es unmöglich macht aktiv zu bremsen (Schubert, 2016, S. 233f). Ein weiterer erwähnenswerter Punkt sind Seilschaften, die stürzen und hangabwärts weitere Seilschaften mitreißen (Ibid., S. 234). Aufgrund angenommener Vernachlässigbarkeit und/oder schlechter Quantifizierbarkeit wird aber auf die Untersuchung dieser Möglichkeiten verzichtet.

4.2 Mechanische Eigenschaften des Seils

Für die weitere Betrachtung werden die mechanischen Eigenschaften der Seile benötigt. Dafür wurden Versuche mit dynamischen Bergseilen verschiedener Hersteller durchgeführt. Weiters werden die veröffentlichten Versuchsergebnisse der Normversuche für dynamische Bergseile herangezogen. Diese Kombination soll ausreichend genaue mechanische Eigenschaften hinsichtlich des Dehnungs- und Dämpfungsverhaltens der Seile in Bezug auf die Modellrechnungen liefern.

Die zu den Normversuchen veröffentlichten Daten enthalten keine Informationen zum Dämpfungsverhalten der zertifizierten Bergseile und auch keine Informationen über Veränderungen der Seile über mehrere Versuche hinweg. Weiters liegen höchstens fünf Datenpunkte – zwei aus den statischen und drei aus den dynamischen Versuchen – vor. Um die für das Modell notwendigen Eigenschaften der Seile zu erhalten wurden Versuche an mehreren dynamischen Bergseilen durchgeführt. Die Tests erfolgten dabei an folgenden Seilen:

1. Edelrid Canary Pro Dry 8,6mm, 50m
2. Beal Opera 8,5mm Unicore, 30m
3. Petzl Volta Guide 9.0mm, 30m
4. Mammut Serenity Dry 8.7mm, 60m

Diese vier Seile wurden ausgewählt, da einerseits die Lehrmeinung des Alpenvereins für Gletscherseilschaften größtenteils Einfachseile empfiehlt (siehe Kapitel 2.3), andererseits da sie die Topprodukte der einzelnen Hersteller repräsentieren (Stand: Februar 2020). Der zweite Punkt ist wichtig, da die Seile die leichtesten Einfachseile der jeweiligen Hersteller sind und das Gewicht des Materials, speziell bei Hochtouren ein wichtiges Entscheidungskriterium ist. Die Seile von Edelrid, Beal und Petzl wurden im Laufe des Jänner 2020 bei unterschiedlichen Sporthändlern erworben, das Seil von Mammut wurde freundlicherweise von Mammut kostenlos zur Verfügung gestellt. Alle Seile wurden vor den Versuchen in ihrer Originalverpackung in einem Karton vor Staub und Licht geschützt bei Raumtemperatur aufbewahrt.

Es wurden vor den eigentlichen Materialtests, Vortests mit Seilproben des Edelrid Canary Pro Dry, des Mammut Serenity Dry sowie einem stark gebrauchten Beal Booster von 2014 durchgeführt. Die Seile von Edelrid und Mammut wurden gewählt, um die Messeinrichtung zu testen, da von ihnen mehr als 30m vorhanden waren. Das Seil von Beal, da hier aufgrund des Alters und Gebrauchszustands mit einem höheren Fangstoß gerechnet wurde und die Messsysteme dadurch auch für Belastungen getestet werden konnten, die höher waren als die erwarteten.

4.2.1 Versuchsaufbau

Abbildung 26 zeigt den Versuchsaufbau. Dieser besteht aus einer Fallführung 1, einer Fallmasse 2, einem Probenseil 3, einem Lastseil 4, einer Abspanneinheit 5 und einer Kamera 6. Abbildung 26 zeigt den Zustand unmittelbar nach dem Hochziehen der Fallmasse 2 auf Fallhöhe. Es wurde, anders als für Normversuche, ein Versuchsstand ohne Umlenkung gewählt, um Reibungseinflüsse an der Umlenkung auszuschließen.



Abbildung 26: Versuchsaufbau Seiltests

Die Fallführung 1 ist im Detail in Abbildung 27 dargestellt. Sie besteht aus zwei Holzträgern 7, auf denen ein hölzerner Aufsatz 8 festgeschraubt ist und die über Schraubzwingen 9 mit einem an der Decke befestigten I-Träger 10 kraftschlüssig verbunden sind. Die Schraubzwingen wurden aus Sicherheitsgründen durch ein Seil miteinander verbunden. Auf dem linken hölzernen Aufsatz 8 ist auf der Innenseite ein Maßband 13 zur Wegmessung angebracht. Auf den Holzträgern 7 sind als Leitschienen T-Profile aus Aluminium 11 verschraubt, wobei die Verschraubung nur jeweils an den Enden der Profile erfolgte, um sicher zu stellen, dass mögliche Unebenheiten oder minimale Biegungen des Holzträgers sich nicht auf die T-Profile auswirken können. Das Fundament 12 besteht aus Stahlguss und hat eine Masse

von etwa 150kg. Abbildung 27 zeigt den Versuchsaufbau mit zur Ermittlung der statischen Dehnung abgelassener 120kg Fallmasse.

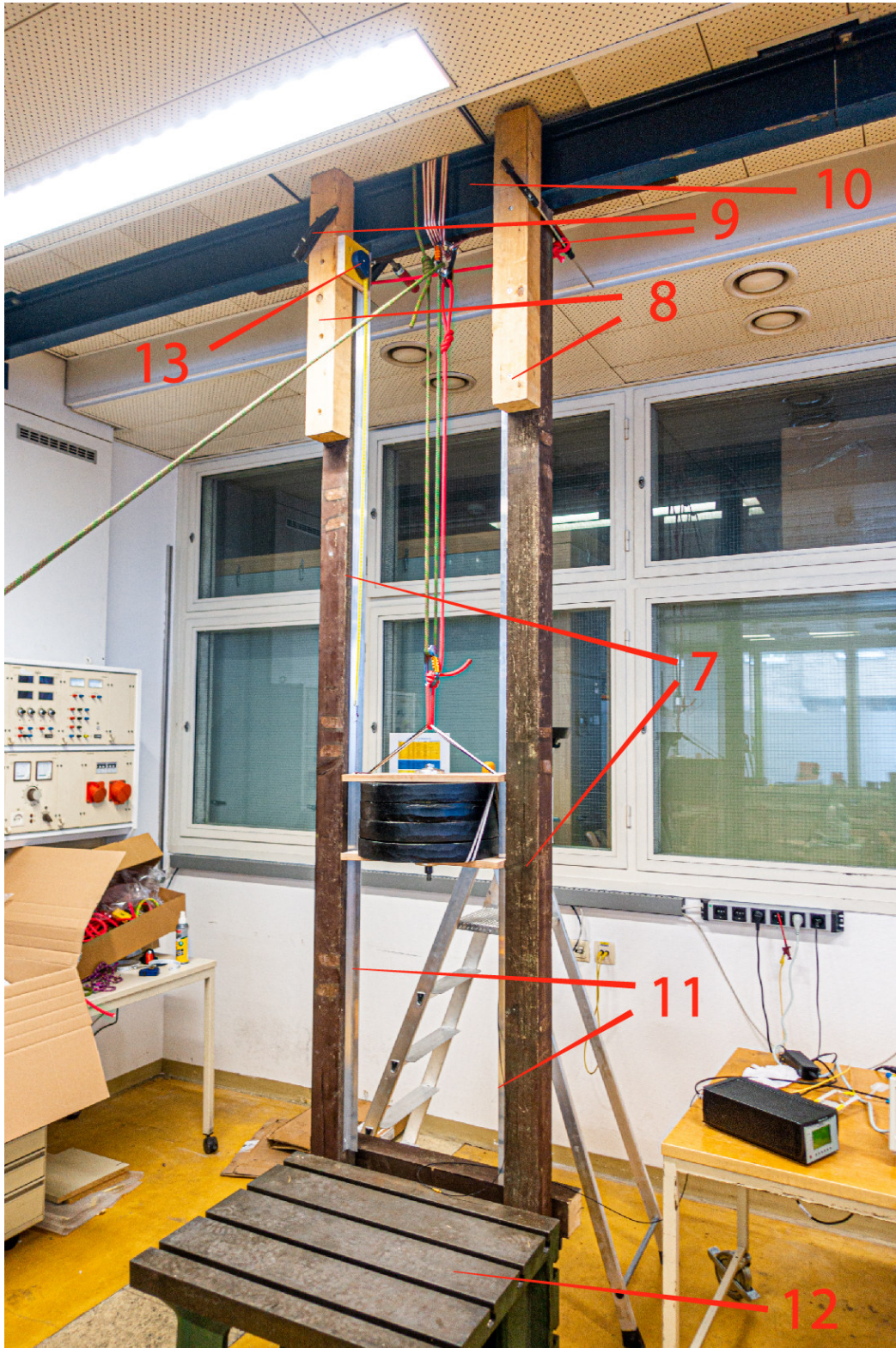


Abbildung 27: Fallführung des Seiltests bei 120kg

Abbildung 28 zeigt die Fallführung 1 aus einer anderen Perspektive, unmittelbar nach dem letzten Falltest mit 30kg. Die Fallmasse 2 hängt am straffen Probenseil 3 und dieses wieder über die Befestigungen 14 am I-Träger 10.

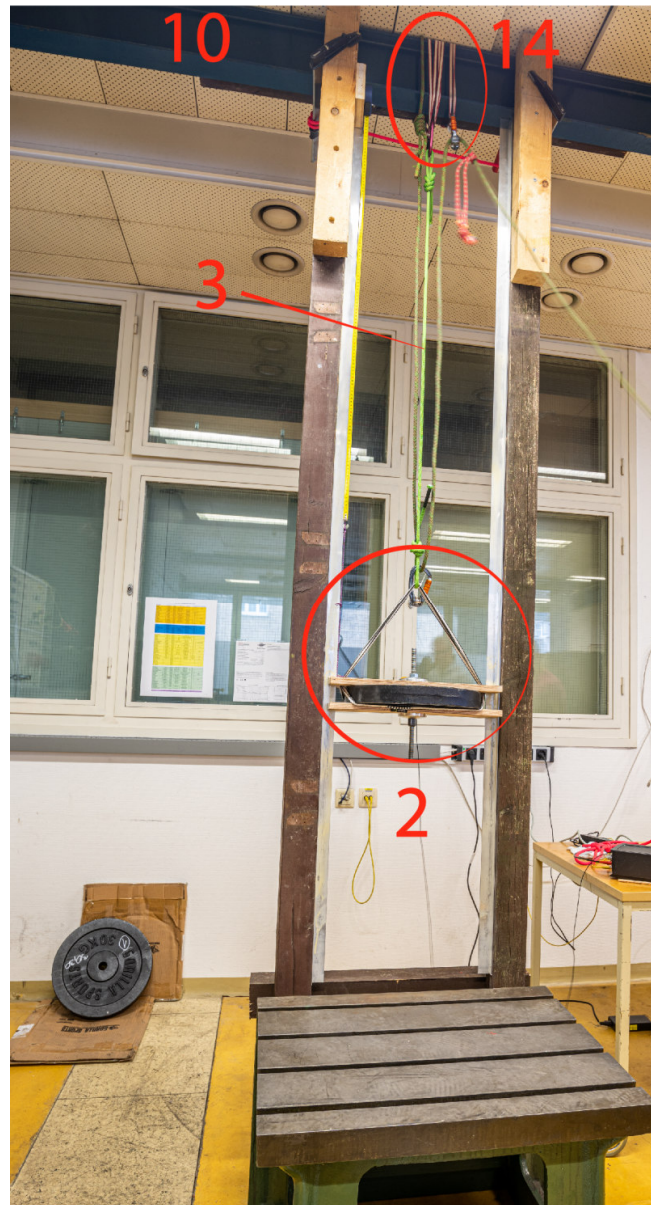


Abbildung 28: Fallführung des Seiltests bei 30kg

Abbildung 29 zeigt eine Vergrößerung des oberen Teils der Fallführung 1. Als Maßband 13 wird ein 2m Maßband der Marke Lux verwendet. Es ist mit einer Schraube zentrisch über eine Zwischenplatte mit dem hölzernen Aufsatz 8 des linken Holzträgers 7 verbunden. Um ein Verdrehen des Maßbandes 13 zu verhindern, ist durch eine Schraube hinter dem Maßband ein Drehhalt realisiert. Die Befestigung 14 besteht aus einer 120cm Dyneema-Bandschlinge 15, die zentral doppelt um den

I-Träger 10 gelegt ist, so dass vier Stränge über dem I-Träger liegen. In diese Bandschlinge ist ein HMS Karabiner 16 vom Typ „Twin-Gate“ eingehängt, wobei der spitze Winkel des Karabiners nach unten zeigt. Links neben der zentralen Bandschlinge 15 ist das Lastseil 4 um den I-Träger 10 geschlungen. Die geschlossene Schlaufe wird durch einen dreifachen Spierenstich erzeugt. Rechts neben der zentralen Bandschlinge 15 ist eine 60cm Bandschlinge 17 um den I-Träger 10 gelegt. In diese Bandschlinge ist ein Karabiner 18 vom Typ „Rollclip Z“ eingehängt, durch den das Lastseil 4 geführt wird. Durch diese Umlenkung wird ein erster Flaschenzug realisiert.

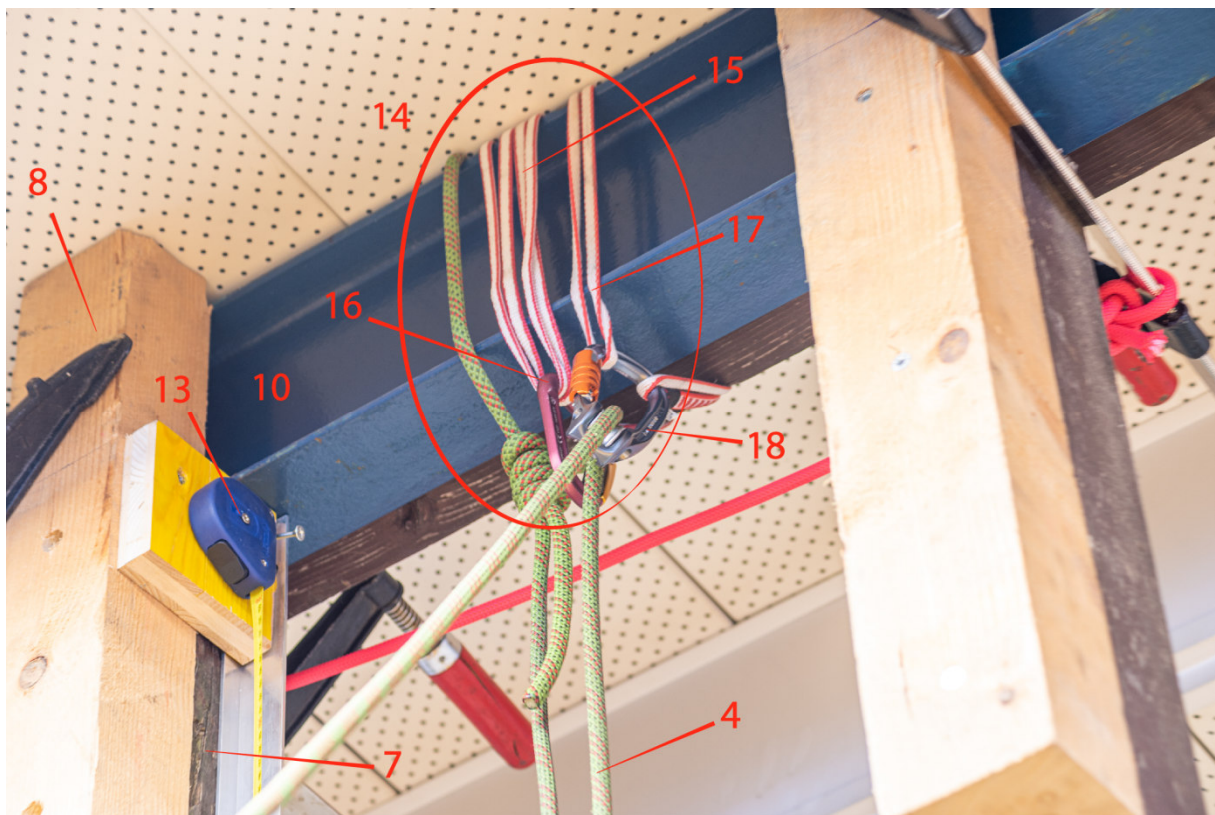


Abbildung 29: Vergrößerung des oberen Teils der Fallführung

Abbildung 30 zeigt die Fallmasse 2 in den Leitschienen 11. Die Fallmasse besteht dabei aus zwischen ein und vier Hantelscheiben 19 mit einer Maße von jeweils 30kg, zwei Holzplatten 20, zwei Aluminium-Druckplatten 21, einer M10 Gewindestange 22 aus Stahl, zwei Fixierungsmuttern 23 (wobei die untere Mutter größer war als die obere) sowie einer Abstandshülse pro verwendeter Hantelscheibe (nicht dargestellt), die als Abstandhalter zwischen der 30mm Bohrung der Hantelscheiben 19 und der Gewindestange 22 fungiert. Auf der obersten Hantelscheibe 19 ist mittels UHU Plus Schnellfest (2-Komponenten-Epoxidkleber) ein Stahlsockel von 3.2cm Durchmesser befestigt. Das Harz härtete für länger als 12h aus. In diesen Stahlsockel ist ein

Beschleunigungssensor „Type 4383“ der Fa. Brüel & Kjær eingeschraubt, der per Kabel mit einem Ladungsverstärker „Nexus Conditioning Amplifier“ der Fa. Brüel & Kjær verbunden ist, der wieder mit einem Oszilloskop „TDS 2024B“ der Fa. Tektronix verbunden ist. Um den Beschleunigungssensor sowie die Anschlussstelle des Kabels am Beschleunigungsmesser möglichst gut vor äußeren Einflüssen, wie etwa schlaff hängenden Seilen, zu schützen ist weiters eine Schutzkappe 24 aus Polypropylen über den Beschleunigungssensor gestülpt und diese, ebenfalls mit UHU Plus Schnellfest, mit dem Stahlsockel verklebt. Die Hantelscheiben 19 ist zwischen den Holzplatten 20 eingeklemmt und diese mittels der Fixiermutter 23, über die Druckplatten 21, gegeneinander verspannt. Die Holzplatten 20 verfügen seitlich über Ausnehmungen von 1.5cm Breite, um einerseits eine sichere Führung der Fallmasse 2 in den Leitschienen 11 zu gewährleisten, andererseits aber möglichst wenig Reibung zu verursachen. Durch die Ausnehmungen der oberen Holzplatte 20 ist eine Dyneema-Schlinge 25 mit 240cm Länge geführt. Die Schlinge ist doppelt genommen und liegt jeweils seitlich auf der unteren Holzplatte sowie unten auf der untersten Hantelscheibe 19 auf. Dadurch wird eine optimale Zentrierung der Schlinge zwischen Vorder- und Rückseite sichergestellt. Das Probeseil 3 ist direkt in die Dyneema-Schlinge 25 eingebunden. Für Versuche mit 90kg und weniger wurde das Probeseil 3 zusätzlich mittels Kabelbinder mit der Dyneema-Schlinge 25 verklemt, um ein seitliches Verrutschen der Seilschlinge zu verhindern. Zum Hochziehen der Fallmasse ist ein Karabiner vom Typ „Rollclip Z“ in die Seilschlinge des Probeseils 3 eingehängt. Weiters ist das Maßband 13 mittels Reepschnur 27 mit einer Schraube verbunden, die ihrerseits auf der oberen Holzplatte der Fallmasse 2 befestigt ist. Auf diese Weise wird selbst bei leichter Schiefstellung der Fallmasse 2 ein Verwinden des Maßbandes verhindert. Für die Versuche mit 60kg und 30kg musste die Reepschnur 27 einmalig verlängert werden, da das Maßband nicht lang genug war. Abbildung 30 zeigt eine Aufnahme nach dem letzten Fallversuch.

Nach der Umlenkung des Lastseils 4 durch den in Abbildung 29 gezeigten Karabiner 18 führt dieses zur Abspanneinheit 5 (siehe Abbildung 26). Bei der Abspanneinheit handelt es sich um einen Block aus Stahlguss mit einer Masse von etwa 100kg, der mit Löchern und Nuten versehen ist.

Abbildung 31 zeigt die Rückseite der Abspanneinheit 5 in abgespanntem Zustand. Das Lastseil 4 führt zu einer Klemmvorrichtung 28, wofür ein „GriGri 2“ der Fa. Petzl verwendet wird, die ihrerseits über einen Karabiner 29 und eine Dyneema-Bandschlinge 30 mit dem Fundament 31 der Abspanneinheit 5 verbunden ist.



Abbildung 30: Vergrößerung der Fallmasse

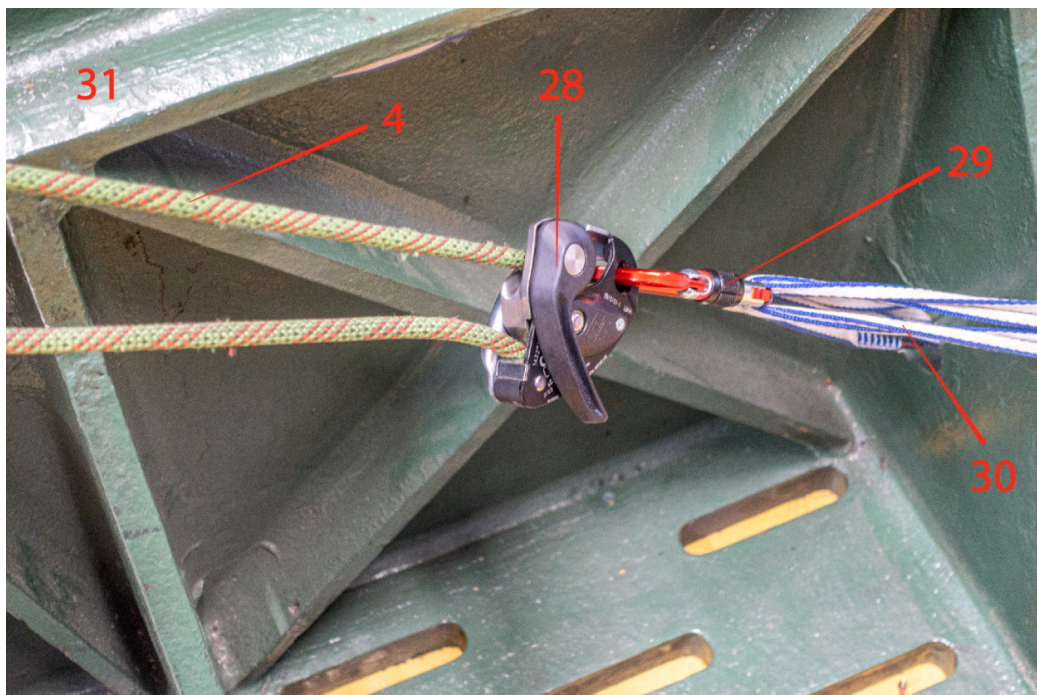


Abbildung 31: Abspanneinheit

Abbildung 32 zeigt den Versuchsaufbau von der Rückseite. Zu erkennen sind hier die Aluminiumprofile 32 (rechteckiger Querschnitt), die als Abstandhalter zwischen der Abspanneinheit 5 und der Fallführung 1 verwendet werden. Das ist nötig, um zu verhindern, dass die Abspanneinheit 5 durch die Zugbelastung des Lastseils 4 in Richtung der Fallführung 1 gezogen wird.

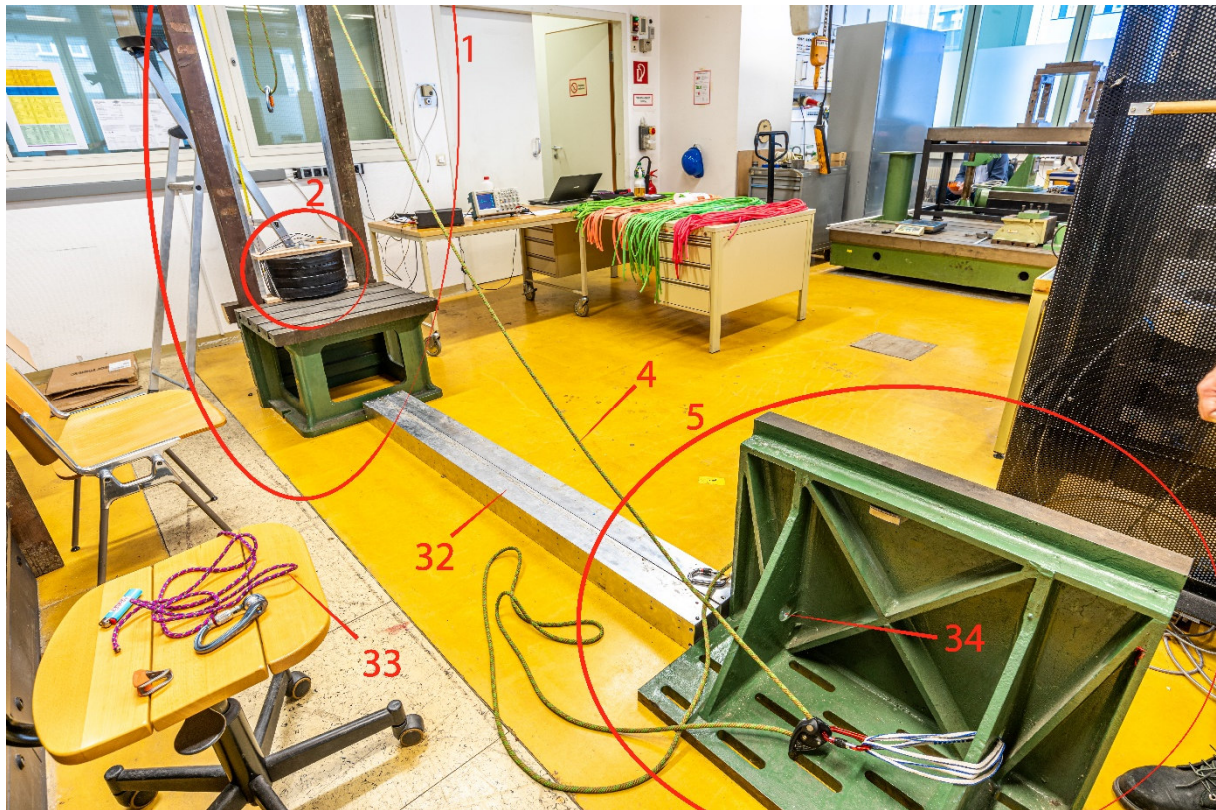


Abbildung 32: Rückseite des Versuchsaufbaus

Nach der Umlenkung des Lastseils 4 durch die Klemmvorrichtung 28 wird dessen Zugende während des Hochziehens der Fallmasse 2 parallel zum in die Klemmvorrichtung 28 einlaufenden Teil des Lastseil 4 geführt (siehe Abbildung 26, Klemmvorrichtung 28 befindet sich auf der Rückseite von Abspanneinheit 5). Während des Hochziehens der Fallmasse wird ein zweiter Flaschenzug aus einem Tibloc der Fa. Petzl und einem Karabiner vom Typ „Rollclip Z“ genutzt (siehe Abbildung 26). Dieser Versuchsaufbau ist besonders vorteilhaft, da sich der zweite Flaschenzug vor Durchführung der Fallversuche entfernen lässt und daher keine innere Reibung verursacht. Das Auslösen des Falls erfolgt durch das Kappen der Reepschnur 33, die am Lastseil 4 mittels doppeltem Prusikknoten und an der Abspanneinheit 5 in der Bohrung 34 mittels Sackstich befestigt ist.

Zur Messung der Maximallänge sowie der nach dem Fangstoß verbleibenden Dehnung des Seils wurde eine Kamera vom Typ „D810“ der Fa. Nikon mit einem Objektiv AF 75-300mm f/4,5-5,6mm verwendet. Die Kamera wurde dazu aus ca. 5m Entfernung auf das Maßband gerichtet. Die Aufnahmen erfolgten bei 300mm, Blende f/11 mit der Videoeinstellung 1920x1080; 60p. Die Aufnahme­frequenz von 60Hz erwies sich als gerade noch ausreichend für die Bestimmung der Maximaldehnung. Die Scharfstellung erfolgte manuell über die 100% Vergrößerung im LiveView. Die Schärfe wurde nach jeder 3. Messung, die Ausrichtung bei jeder Messung kontrolliert. Die Kamera befand sich während der gesamten Versuchsreihe auf einem Aluminiumstativ der Marke Maginon.

4.2.2 Versuchsablauf

Vorbereitung:

- Der Ladungsverstärker wurde auf $31.6 \frac{mVs^2}{m}$ eingestellt.
- Die Seile wurden aus der Verpackung genommen und einmal aufgenommen, um Krangelbildung zu vermeiden. Danach wurden vom Probeseil der Fa. Edelrid 2.5m Proben abgelängt. Die Seile von Beal und Petzl wurden in zwölf gleich lange Proben geteilt. Das Seil von Mammut wurde, aufgrund der ursprünglichen 60m Länge zu Beginn einmal geteilt, anschließend wurde eine der Hälften ebenfalls in zwölf gleich lange Proben geteilt. Die zugeschnittenen Seilproben wurden auf einem separaten Tisch bereitgelegt, siehe Abbildung 33.
- Es wurden von jedem Seil drei Proben gemessen und deren mittlere Länge notiert.
- Je eine Probe bekannter Länge wurde pro Seil abgewogen. Dafür wurde eine Waage vom Typ UWE EM-1100 (1.1kg x 0.1g) verwendet.
- Die Hantelscheiben der Fallmassen wurden mit einer Waage vom Typ „DE 150 K 50“ der Fa. Kern gemessen, wobei die Waage nach jeder Messung zurückgesetzt wurde. Die Messunsicherheit ist mit $d = 50g$ angegeben.
- Die Holzplatten, Gewindestange, Muttern, Abstandshülsen sowie Druckplatten der Fallmasse wurden mit einer Waage vom Typ UWE EM-1100 abgewogen.



Abbildung 33: Tisch mit zugeschnittenen Seilproben

Durchführung:

1. Die gewünschte Fallmasse wird zusammengestellt und zwischen den Führungsbrettern verspannt. Dieser Vorgang erfolgte nur vier Mal, da immer die Proben aller vier Seile mit einer Fallmasse getestet wurden, um häufiges Umbauen zu vermeiden und die Masse möglichst konstant zu belassen.
2. Die Dyneema-Schlinge wird gemäß Abbildung 30 an die Fallmasse angebracht.
3. Binden eines 8er-Knotens an einem Ende der Seilprobe.
4. Das freie Ende der Seilprobe wird mittels 8er Knoten in die Dyneema-Schlinge der Fallmasse eingebunden.
5. Alle vier in den 8er-Knoten einlaufende Seilstränge werden der Reihe nach händisch festgezogen. Dabei wird darauf geachtet, dass der 8er-Knoten sauber gebunden ist und alle Seilstränge parallel zueinander liegen.
6. Die Grundlänge $l_{0,0}$ zwischen den Knoten in unbelastetem Zustand wird gemessen.

7. Die Fallmasse wird mittels Lastseil auf eine Höhe gehoben, auf der ein Einhängen der Seilschleife des freien 8er-Knotens möglich ist.
8. Der 8er-Knoten der Seilprobe wird in den Twin-Gate Karabiner eingehängt.
9. Das Lastseil wird stoßfrei entlastet, bis das Gewicht der Fallmasse nur von der Seilprobe getragen wird. Um das sicher zu stellen wird am Lastseil ausreichend Seil durch die Klemmvorrichtung gezogen, um auch bei zunehmender Dehnung der Seilprobe Schlappseil zu gewährleisten.
10. Die Seilprobe wird für $60s_0^{+15}$ statisch durch die Prüfmasse belastet.
11. Die Länge l_s des Seils wird gemessen. Als Länge l_s gilt der Abstand zwischen den Beiden 8er-Knoten.
12. Die Fallmasse wird angehoben, bis ein deutlicher Durchhang der Seilprobe feststellbar ist. In diesem Zustand wird die Fallmasse für $60s_0^{+15}$ ruhen gelassen.
13. Es wird erneut der Abstand zwischen den 8er-Knoten gemessen. Diese Länge wird als l_0 bezeichnet.
14. Die Prüfmasse wird mittels Zugseils an den höchsten Punkt des Versuchsaufbaus gezogen, um einen Faktor 1 Sturz zu ermöglichen.
15. Der Flaschenzug zwischen Abspanneinheit und Fallführung wird entfernt.
16. Das Zugseil wird am Fundament der Abspanneinheit mittels 6mm Reepschnur und doppeltem Prusikknoten fixiert.
17. Das GriGri wird langsam geöffnet, um eine stoßfreie Lastübertragung auf die Reepschnur sicher zu stellen.
18. Alle Ladungsspeicher am Ladungsverstärker werden zurückgesetzt.

19. Es wird eine Einzelsequenzaufnahme am Oszillographen mit Trigger auf 280mV eingestellt.
20. Die Videoaufnahme auf der Kamera wird gestartet.
21. Die Reepschnur wird mittels Messer gekappt.
22. Die Masse fällt.
23. Die Beschleunigungswerte werden aufgezeichnet. Daraus werden in weiterer Folge die Seilkräfte, der Fallweg und die Schwingungen ermittelt. Die Maximaldehnung wird zwar auch über die Auswertung des Videos ermittelt, für die Berechnungen wird aber auf die Integration des Beschleunigungssignals zurückgegriffen. Dadurch konnte die Dehnung zum Zeitpunkt der Maximalbeschleunigung eruiert werden.
24. Bei jeweils einer Seilprobe je Hersteller wurden bei einer Fallmasse von 120kg drei Fallversuche hintereinander durchgeführt, um die Auswirkungen von Folgestürzen auf die Seileigenschaften zu analysieren.

Anmerkungen:

Es wurden pro Seil je 3 Tests mit Fallmassen von je 120kg, 90kg, 60kg und 30kg durchgeführt, gesamt also 12 Tests pro Seil, 48 Tests gesamt. Nicht eingerechnet sind hier Vorversuche, die in der Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Ursprünglich wurde überlegt die Seilprobe in den oberen Twin-Gate Karabiner mittels Mastwurf-Knoten einzubinden. Nachdem ein Testversuch dazu durchgeführt wurde, wurde die Idee wieder verworfen. Der Mastwurf rutschte, obwohl er festgezogen und statisch mit der Fallmasse belastet wurde, bis zu einem Sackstich durch, der vorsorglich als Sturzsicherung eingeknotet wurde. Als der Knoten dann griff saß er so fest auf dem Karabiner, dass er sich nur noch aufschneiden ließ. Das Seil wies am Beginn des Knotens einen aufgerissenen Mantel und im Inneren des Knotens leichte Schmelzverbrennungen am Mantel auf.

Abbildung 34 zeigt den ausgefransten Mantel. Bei genauer Betrachtung ist der weiße Kern des Seils sichtbar.



Abbildung 34: Aufgerissener Mantel des Testseils

Abbildung 35 zeigt die oberflächliche Schmelzverbrennung des Mantels.



Abbildung 35: Testseil mit oberflächlicher Schmelzverbrennung

Weiters wurde überlegt die Längen l_0 und l_S von einem Ende der Anseilschleife bis zum anderen Ende zu messen. Da die Messung aber mit einem Maßband durchgeführt wurde erwiesen sich Testmessungen als zu ungenau. Es wird daher für die weiteren Untersuchungen dieser Längen auf die integrierten Beschleunigungswerte des Oszillographen zurückgegriffen. Durch das Aussparen der Knoten ist es auch möglich exaktere Werte für die statische Dehnung zu bestimmen, da ein Zusammenziehen der Knoten und der Anteil der Schlingen nicht in die statische Dehnung einfließen. Die Längen wurden mit einem 2m Maßband der Marke Lux bestimmt und auf halbe Zentimeter gerundet.

Bei den Fallversuchen mit einer Fallmasse von 90kg wurden die Leitschienen ab dem zweiten Versuch mit einem Silikonspray behandelt, um die Reibung noch weiter zu reduzieren.

4.2.3 Daten der Seilproben

In Tabelle 13 sind die wichtigsten Daten zu den verwendeten Seilen angeführt.

Name	Durchmesser in mm	Länge gesamt in m	Länge Probe in m	Gewicht pro Meter laut Hersteller in g/m	Gewicht pro Meter gemessen in g/m	Herstellungsdatum
Edelrid Canary Pro Dry	8,6	50	2,50	51	54	02/2019
Beal Opera Unicore	8,5	30	2,90	48	52	10/2019
Petzl Volta Guide	9,0	30	2,59	54	56	08/2019
Mammut Serenity Dry	8,7	60	2,54	51	53	06/2019

Tabelle 13: Daten der Seilproben

- Die Längen der Proben wurden für die Messungen auf 1cm
- Das Gewicht pro Meter der Proben wurde auf 1g gerundet.
- Da die Herstellerdaten nicht immer konsistent sind und Unterschiede, etwa zwischen Internetauftritt und Verpackung sowie Internetauftritten von Händlern

bestehen, stammen alle verwendeten Daten von der Verpackung der verwendeten Seile.

- Der Durchmesser wurde nicht gemessen, da sich eine exakte Messung an mehreren Querschnitten als zu aufwändig erwies. Hier werden die Daten der Hersteller übernommen.
- Als Gesamtlänge ist die auf der Packung angegebene Gesamtlänge angeführt. Die tatsächliche Länge der Seile wich teils massiv von der Herstellerangabe ab. So hatte das Seil von Beal eine Länge von knapp 35m. Positiv anzumerken ist hier, dass keines der Seile kürzer war als von den Herstellern angegeben.
- Der Monat der Herstellung wird hier angeführt, um Veränderungen aufgrund von Alterung auszuschließen.

4.2.4 Statische Ergebnisse

Der statische Normversuch bezieht sich auf eine einfache Dehnung des Seils. Zu beachten ist, dass die Testmasse nach Norm zwar 80kg beträgt, bei der statischen Prüfung aber eine Vorbelastung von 5kg aufgebracht wird. Die ermittelte statische Dehnung kommt daher durch die Differenz von 75kg zustande (siehe Kapitel 3.3.2). Kriechen durch die Reibung der Seilfasern aufeinander wird hier als vernachlässigbar angenommen. Der Grund liegt erstens in der recht kurzen Versuchsdauer von $60s \pm 5$ und zweitens in der Vorbelastung. Auch Kriechen des Polyamids selbst wird ausgeschlossen (Ehrenstein, 2011, S. 223)

Die Ergebnisse für die statischen Versuche der einzelnen Seilproben sind im Folgenden in Tabelle 14 bis Tabelle 17 aufgelistet. Die Fallmassen wurden mit den gewogenen Werten berechnet. Da die für das Wiegen der Hantelscheiben verwendete Waage nur eine Genauigkeit von $d = 50g$ aufweist, werden die Gesamtmassen der zusammengestellten Fallmassen auf 50g gerundet. Es sind in den Tabellen nur die Werte erfolgreich durchgeführter statischer und dynamischer Versuche angeführt, da nur vollständige Versuchssätze weiterverwendet werden. In den Bemerkungen sind Änderungen und Vorkommnisse angeführt, die für die Messergebnisse relevant sind. Eine genaue Besprechung dieser Bemerkungen erfolgt im Anschluss an die Tabellen.

Versuch Nr.	$l_{0,0}$ in mm	l_0 in mm	l_s in mm	statische Dehnung in %	Seilprobe	Fallmasse in kg	Bemerkungen
1	88	96	105	9,38%	E1x1	123,05	
2	-	-	-	-	E1x2	123,05	
3	-	-	-	-	E1x3	123,05	
4	85	91	103	13,19%	E2	123,05	
5	88,5	95,5	106	10,99%	E3	123,05	
6	95,5	98	109,5	11,73%	B1	123,05	
7	89,5	94	105	11,70%	B2x1	123,05	
8	-	-	-	-	B2x2	123,05	
9	-	-	-	-	B2x3	123,05	
10	98,5	106,5	115,5	8,45%	B3	123,05	
11	92,5	97	107,5	10,82%	B4	123,05	
12	96,5	100	111	11,00%	P1x1	123,05	
13	-	-	-	-	P1x2	123,05	
14	-	-	-	-	P1x3	123,05	
15	90,5	96,5	106	9,84%	P2	123,05	
16	87,5	92	102,5	11,41%	P3	123,05	
17	80,5	86,5	96,5	11,56%	M1x1	123,05	
18	-	-	-	-	M1x2	123,05	
19	-	-	-	-	M1x3	123,05	
20	88	96	106	10,42%	M2	123,05	
21	94,5	99	112	13,13%	M3	123,05	

Tabelle 14: Ergebnisse der statischen Messung 123,05kg

Versuch Nr.	$l_{0,0}$ in mm	l_0 in mm	l_s in mm	statische Dehnung in %	Seilprobe	Fallmasse in kg	Bemerkungen
22	88	92	101,5	10,33%	E1	93,20	
23	89	91,5	101,5	10,93%	E2	93,20	1)
24	92	95,5	106	10,99%	E3	93,20	
25	96	100	108	8,00%	B1	93,20	
26	90	92,5	100	8,11%	B2	93,20	
27	95,5	97,5	105	7,69%	B3	93,20	
28	92,5	95	105	10,53%	P1	93,20	
29	96,5	104,5	113	8,13%	P2	93,20	
30	94,5	97	108	11,34%	P3	93,20	
31	94	99	109	10,10%	M1	93,20	
32	96,5	98,5	108	9,64%	M2	93,20	
33	99	101	111	9,90%	M3	93,20	

Tabelle 15: Ergebnisse der statischen Messung 93,20kg

Versuch Nr.	$l_{0,0}$ in mm	l_0 in mm	l_s in mm	statische Dehnung in %	Seilprobe	Fallmasse in kg	Bemerkungen
34	89	91	99,5	9,34%	E1	62,45	2)
35	90	92	100,5	9,24%	E2	62,45	
36	-	97,5	106	8,72%	E3	62,45	3)
37	-	113,5	120,5	6,17%	B1	62,45	4)
38	103	105	111,5	6,19%	B2	62,45	
39	101	102,5	110	7,32%	B3	62,45	
40	98	100	107	7,00%	P1	62,45	
41	96	97	106	9,28%	P2	62,45	
42	98	102	109	6,86%	P3	62,45	
43	94	95	103	8,42%	M1	62,45	
44	107,5	108,5	117	7,83%	M2	62,45	
45	91	91	98,5	8,24%	M3	62,45	

Tabelle 16: Ergebnisse der statischen Messung 62,45kg

- 1) Vor Versuch Nr. 23 wurden die Führungsschienen mit Silikonspray behandelt, um Reibungseinflüsse zu reduzieren. Diese Behandlung hat Auswirkungen auf das Schwingungsverhaltens nach dem Fangstoß.

- 2) Vor Versuch Nr. 34 wurde eine Verlängerung des Fadens, mit dem das Maßband zur Maximalwegmessung mit dem oberen Führungsbrett verbunden war, durchgeführt. Das wurde nötig, da das Maßband sonst zu kurz gewesen wäre. Da der Offset des Maßbandes bei jeder Messung neu bestimmt wird, wird ein Einfluss auf das Messergebnis ausgeschlossen.
- 3) Bei Versuch Nr. 36 wurde vergessen $l_{0,0}$ zu bestimmen. Da dieser Wert nur als Referenz dafür genutzt wird, wie sehr sich die Knoten durch den statischen Versuch zuziehen, hat das Fehlen dieses Wertes keinen Einfluss auf die Auswertung.
- 4) Bei Versuch Nr. 37 wurde $l_{0,0}$ zu groß gewählt (122cm). Das Seil wurde nach der statischen Belastung verkürzt, um ein Aufschlagen der Masse durch eine zu große dynamische Dehnung sicher auszuschließen, daher sind keine Angaben zu $l_{0,0}$ möglich. Auch hier hat das Fehlen dieses Wertes keinen Einfluss auf die Auswertung.

Versuch Nr.	$l_{0,0}$ in mm	l_0 in mm	l_s in mm	statische Dehnung in %	Seilprobe	Fallmasse in kg	Bemerkungen
46	87,5	90	97	7,78%	E1	32,15	
47	82	81	88,5	9,26%	E2	32,15	
48	84,5	84	91,5	8,93%	E3	32,15	
49	101,5	103	107,5	4,37%	B1	32,15	
50	91,5	91,5	95	3,83%	B2	32,15	
51	93,5	94,5	101,5	7,41%	P1	32,15	
52	87	87	92,5	6,32%	P2	32,15	
53	96	96	101	5,21%	P3	32,15	
54	101,5	102,5	108,5	5,85%	M1	32,15	
55	97	97,5	102,5	5,13%	M2	32,15	
56	-	93,5	99	5,88%	M3	32,15	5)

Tabelle 17: Ergebnisse der statischen Messung 32,15kg

- 5) Bei Versuch Nr. 56 wurde vergessen $l_{0,0}$ zu bestimmen. Das Fehlen dieses Wertes hat keinen Einfluss auf die Auswertung.

Tabelle 18 zeigt die aus den obigen Versuchen ermittelten Mittelwerte der statischen Dehnung für 123.05kg, 93.20kg, 62.45kg und 32.15kg sowie die von der Verpackung der Seile entnommenen Werte der statischen Dehnung nach Norm für 75kg und 37.5kg. Zu beachten ist, dass die Dehnung des Beal Opera bei 32.15kg mit nur zwei Proben berechnet wurde. Der Wert des Mammut Serenity Dry bei 37.5kg wurde bei Mammut direkt erfragt.

	Masse	123,05 kg	93,20 kg	62,45 kg	32,15 kg	75 kg	37,5 kg
Name							
Edelrid Canary Pro Dry		11,19%	10,75%	9,10%	8,66%	7,25%	5,60%
Beal Opera Unicore		10,68%	7,93%	6,56%	4,10%	8,40%	5,10%
Petzl Volta Guide		10,75%	10,00%	7,71%	6,31%	7,60%	4,40%
Mammut Serenity Dry		11,70%	9,88%	8,17%	5,62%	6,00%	4,00%

Tabelle 18: Statische Dehnung der Seilproben

Abbildung 36 zeigt Plots aller ermittelten Werte sowie der Mittelwerte. Die ermittelten Werte weichen teilweise massiv von den Herstellerwerten ab. Mögliche Gründe dafür sind

- Messunsicherheiten

Die Messungen erfolgten auf einen halben Zentimeter gerundet und sind damit sowohl mit Messunsicherheit als auch mit Rundungsfehlern behaftet. Ein Messfehler von 1cm verursacht in der Auswertung einen relativen Fehler von zumindest 1%. Allerdings kann Messunsicherheit nicht alle Unterschiede erklären, da die Messwerte mit den von Beal und Petzl angegebenen Werten eine wesentlich höhere Übereinstimmung haben als mit denen von Mammut und Edelrid. Weiters ist, mit Ausnahme der Seilprobe von Petzl, die Schwankungsbreite der Messungen gering. Dieser Umstand spricht eher für einen systemischen Fehler.

- Ungenauigkeit des Messgeräts

Als Messgerät wurde ein handelsübliches Maßband der Marke Lux verwendet. Es ist zwar möglich, dass die Skala ungenau war, jedoch ist es unwahrscheinlich, dass die Skala so ungenau war, dass die Abweichungen einen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse hatten.

- Unterschiede im Versuchsaufbau im Vergleich zum Normversuch

Die Norm schreibt für den statischen Normversuch eine Vorbelastung über 180s mit einer Masse von 80kg, mit anschließender Entlastung für 10min vor. Weiters ist eine dauerhafte Vorbelastung mit 5kg vorgeschrieben (siehe Kapitel 3.3.2). Es kann daher sein, dass die längere Vorbelastung in Verbindung mit der konstanten Belastung mit 5kg einen größeren Einfluss hat als erwartet wurde.

Ein weiterer Unterschied zu den Normersuchen liegt darin, dass die Messung von l_0 erst nach der Belastung erfolgte. Ein Unterschied durch die geänderte Belastungsreihenfolge kann nicht ausgeschlossen werden. Ein Einfluss durch Festziehen der Knoten wird ausgeschlossen, da die Seile unmittelbar nach Messung der statischen Dehnung entlastet wurden und zugezogene 8er-Knoten sich bei Entlastung nicht von selbst lockern.

- Toleranzen der Normversuche

Da auch Normversuche gewissen Toleranzen unterliegen könnten auch diese einen Teil der Abweichungen erklären.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass alle getesteten Seile im Bereich niedriger Belastungen scheinbar eine überproportionale Dehnungszunahme vorweisen. Diese Dehnung ist sichtbar, unabhängig davon, ob die Normwerte, oder die Versuchswerte herangezogen werden. Der Grund dafür könnte einerseits darin liegen, dass die Seillitzen zu Beginn der Belastung wegen der niedrigeren inneren Spannung noch mit relativ geringer innerer Reibung aufeinander gleiten können, andererseits darin, dass durch den flacheren Winkel der Seillitzen in Relation zur Zugrichtung, zu Beginn der Belastung ein günstigerer Hebel für das Verdrehen der Litzen gegeben ist. Beide Theorien würden weitere Untersuchungen benötigen.

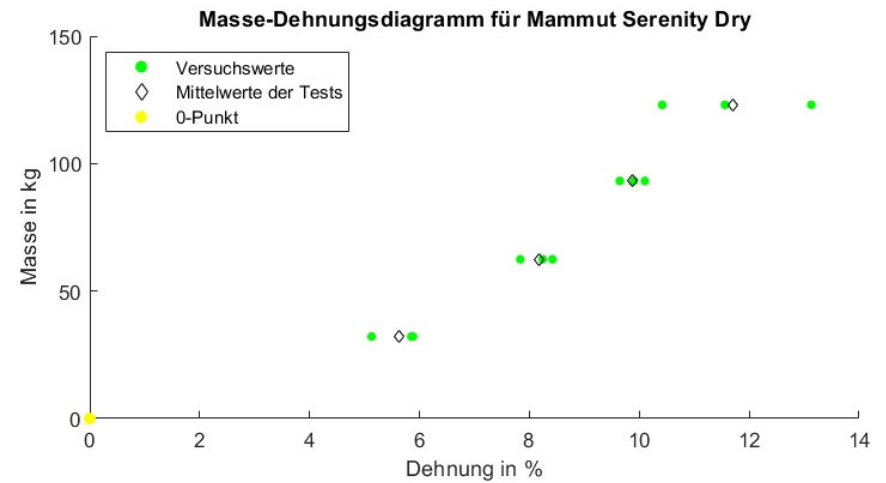
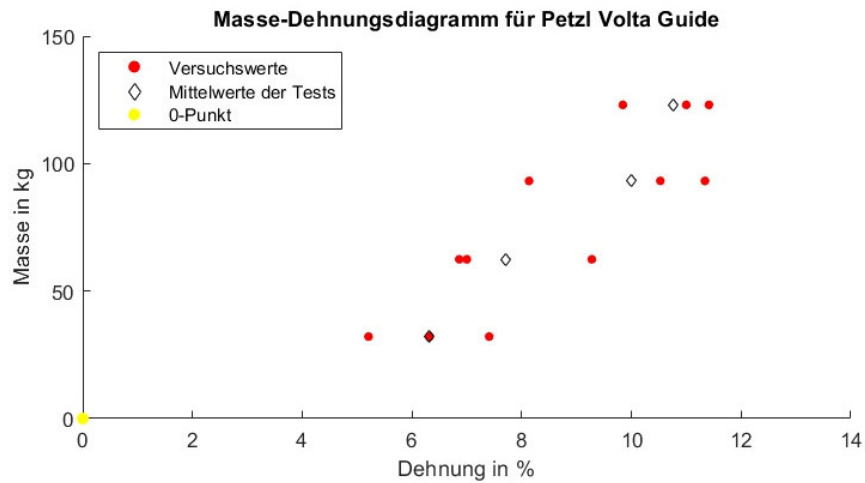
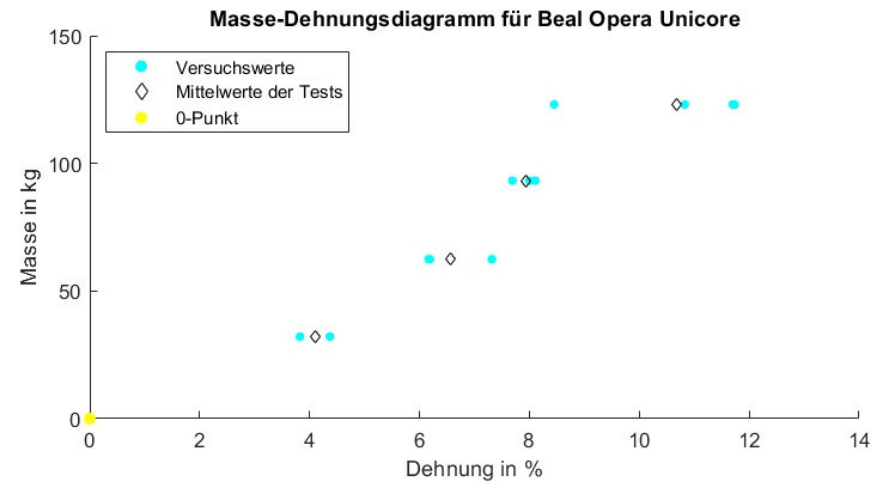
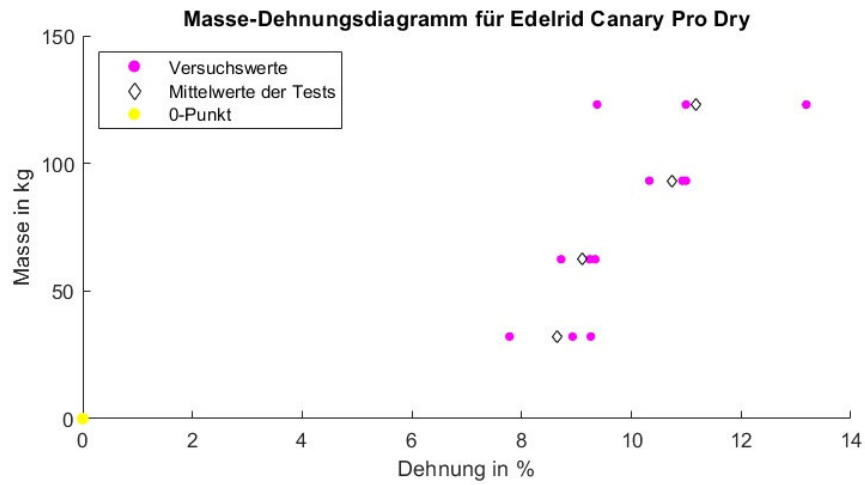


Abbildung 36: Werte Messung der statischen Seildehnung

4.2.5 Dynamische Ergebnisse

Der Versuchsaufbau bei den dynamischen Seilversuchen unterschied sich vom Versuchsaufbau gemäß DIN EN 892 in folgenden Punkten:

1. Die Seilprobe wurde nicht umgelenkt (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28)
Eine Umlenkung des Seils findet in der Norm statt, um die Bruchfreiheit des Seils für eine bestimmte Anzahl von Normstürzen zu testen. Die vorgeschriebene Mindeststurzzahl hängt dabei von der Art des Seils (Einfach-, Halb-, oder Zwillingsseil) ab. (DIN EN 892, S. 8) Da bei den durchgeführten Versuchen kein Seilriss provoziert werden sollte und eine Umlenkung zusätzliche Reibung einbringt, wurde für die durchgeführten Versuche auf eine Umlenkung verzichtet.
2. Der Sturfaktor bei Normversuchen beträgt etwa 1.7, während er in diesen Versuchen bei 1 liegt.

Eine schematische Skizze des dynamischen Seilversuchs zeigt Abbildung 37. Dabei ist Zeitpunkt 0 der Zeitpunkt des Ausklinkens, Zeitpunkt 1 der Zeitpunkt des Beginns des Fangstoßes und Zeitpunkt 2 jener der maximalen Dehnung.

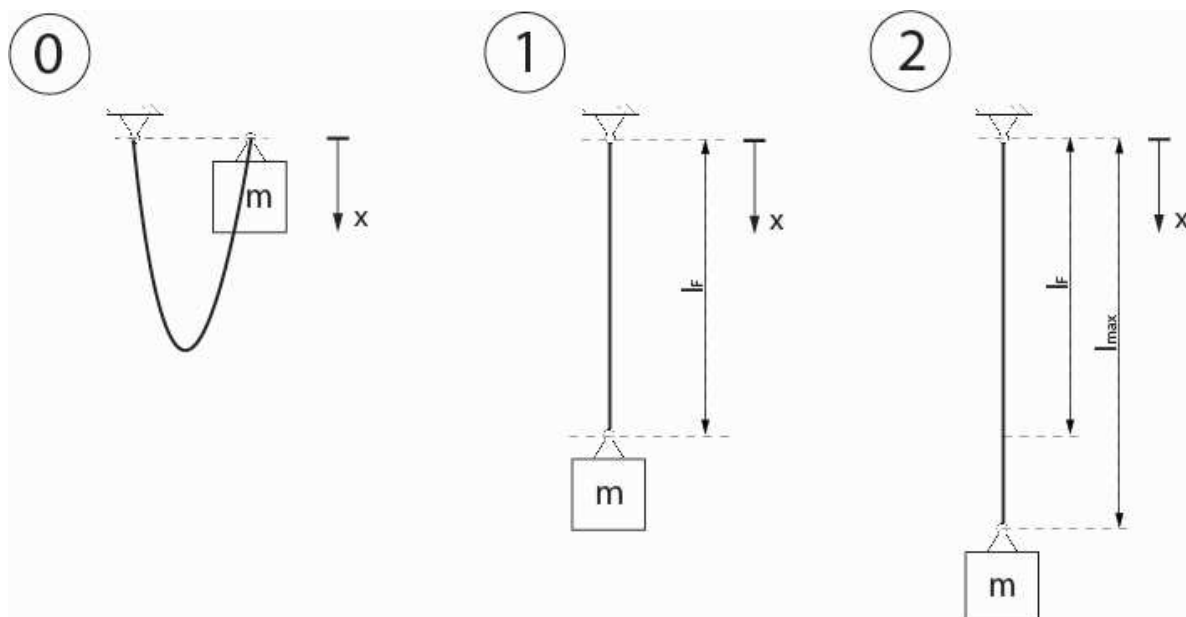


Abbildung 37: Schematische Skizze des dynamischen Seilversuchs

Abbildung 39 zeigt beispielhaft den Beschleunigungsverlauf des ungefilterten und unkorrigierten Signals von Versuch 1 über die Zeit.

Wie in Abbildung 38 zu sehen ist, tritt beim Signal während des freien Falls eine Drift auf, die eine konstante Abnahme der Beschleunigung suggeriert. Die Begründung dafür ist, dass als Beschleunigungssensor ein Piezosensor verwendet wurde, der keine statischen Werte messen kann.

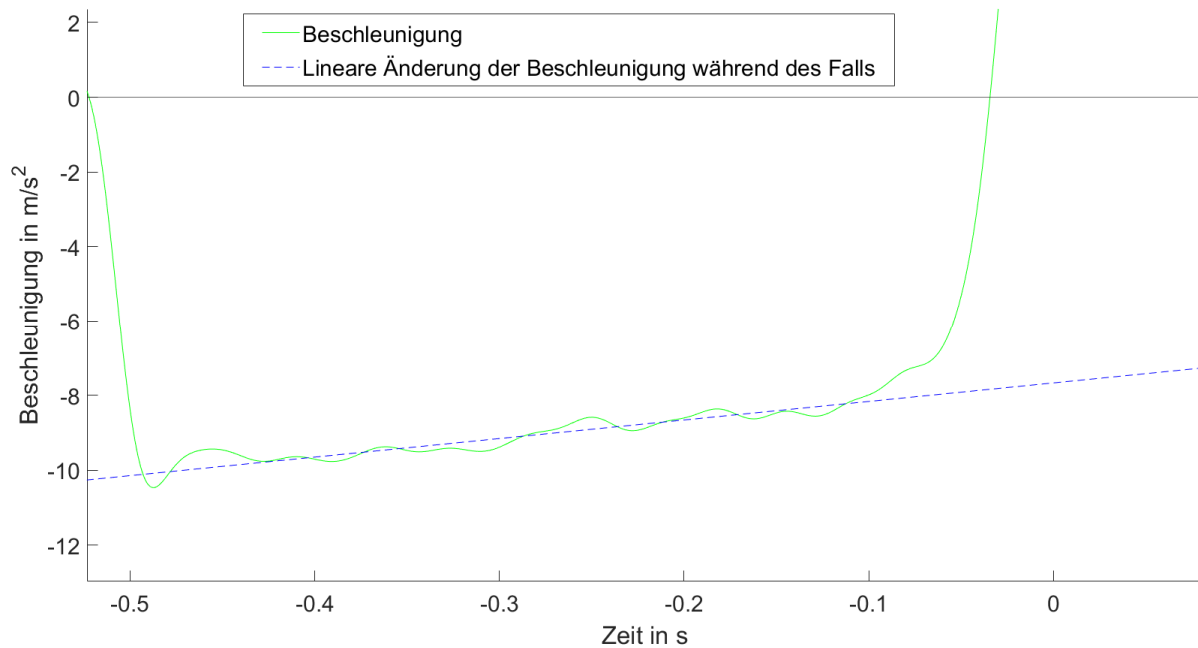


Abbildung 38: Lineare Änderung des Beschleunigungssignals während des freien Falls, Versuch 1

Für die Änderung im Ladungsverstärker durch den Spannungsabfall im Piezosensor gilt

$$\frac{dQ}{dt} = c_{Korr} Q \quad (6)$$

Damit lässt sich das Signal folgendermaßen korrigieren

$$Q_{t1,Korr} = Q_{t1} + c_{Korr} \int_{t1}^{t2} Q dt \quad (7)$$

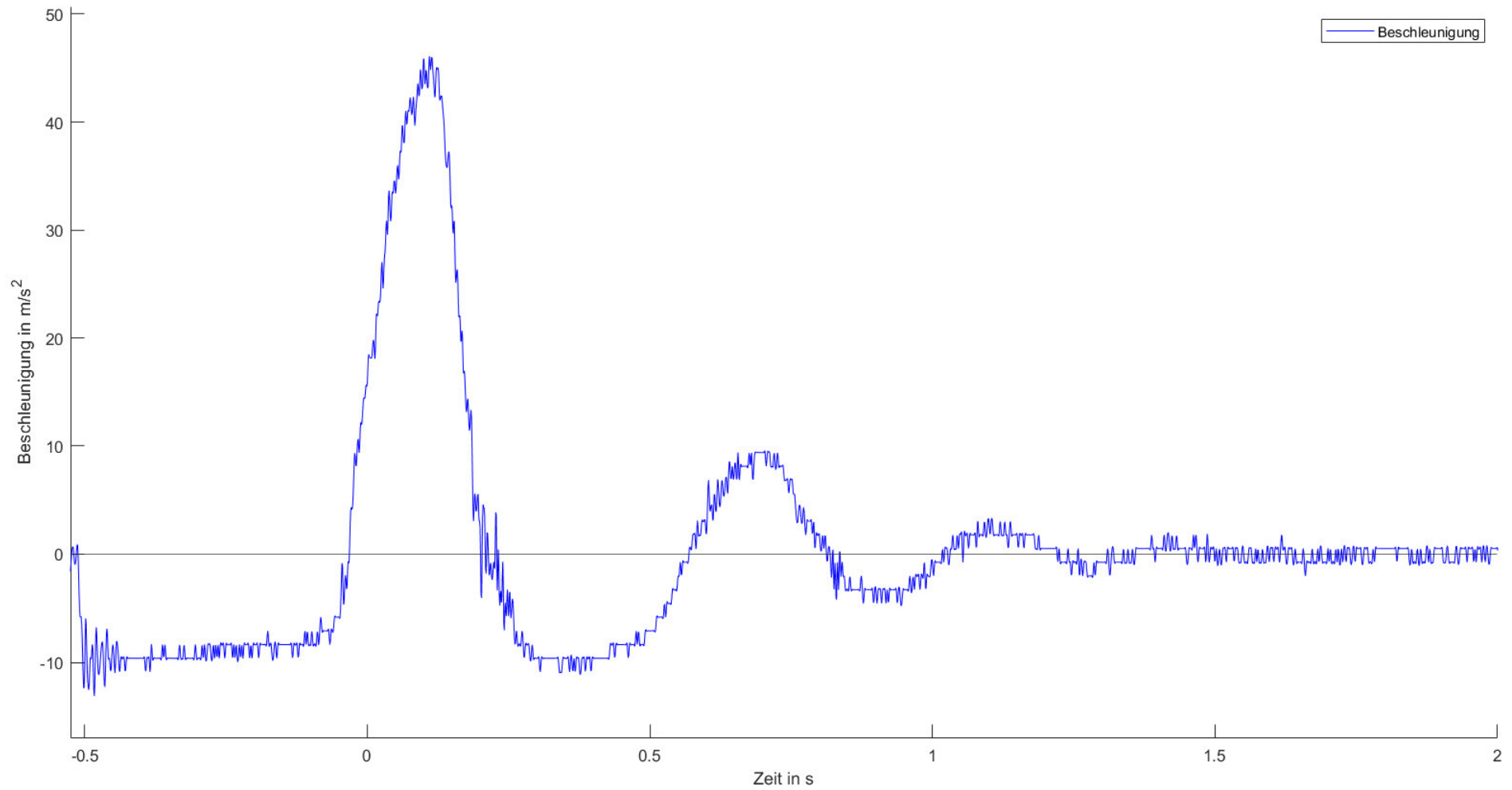


Abbildung 39: Beschleunigungs-Zeit Diagramm des ungefilterten Signals von Versuch 1

Für die Erstellung eines mechanischen Ersatzmodells ist die Bestimmung der Seilparameter c – Federsteifigkeit und k – Dämpfungskonstante nötig. Für die Bestimmung wurde ein Näherungsverfahren auf die linke Flanke des Beschleunigungssignals des ersten Fangstoßes angewendet. Die Gründe dafür sind

1. Es handelt es sich bei einem Seil um keinen linearen Schwinger, da
 - I. Keine Druckkräfte übertragen werden können. Diese Eigenschaft zeigt sich in Abbildung 39 etwa dadurch, dass nach dem ersten Fangstoß keine Beschleunigung von unter -10 m/s^2 erreicht wird, da dort ein Erschlaffen des Seils eintritt.
 - II. Das Verhalten während des Spannens und Entspannens des Seils unterschiedlich ist (siehe Abbildung 40). Während beim Spannen nahezu linear elastisches Verhalten auftritt, ist beim Entspannen eine deutliche Änderung im Verhalten sichtbar.
2. Der erste Fangstoß führt zu Änderungen der Eigenschaften des Seils. Das wird besonders deutlich, wenn die Messungen des ersten Fallversuchs mit denen des zweiten Fallversuchs mit gleicher Seilprobe überlagert werden, siehe Abbildung 42 bis Abbildung 45, S. 93ff.
3. Für die Frage, ob ein Seilschaftsmitglied einem Fangstoß widerstehen kann ist primär der erste Fangstoß entscheidend, da hier die größten Kräfte auftreten.

Für das Näherungsverfahren auf die linke Flanke des Beschleunigungssignals des ersten Fangstoßes wird als Näherung zunächst von der Schwingungsgleichung eines linearen Schwingers unter Eigengewicht ausgegangen.

$$m\ddot{x} = mg - kx - cx \quad (8)$$

Die Lagekoordinate x wird von der ungedehnten Feder und nicht von der Gleichgewichtslage aus gemessen. Im Rahmen der Versuche wurde die Beschleunigung $\ddot{x}(t) = \ddot{x}_m$ gemessen. Geschwindigkeit und Weg lassen sich damit über numerische Integration nach der Trapezregel bestimmen. Somit ergibt sich der Unterschied zwischen Messung und Modell zu

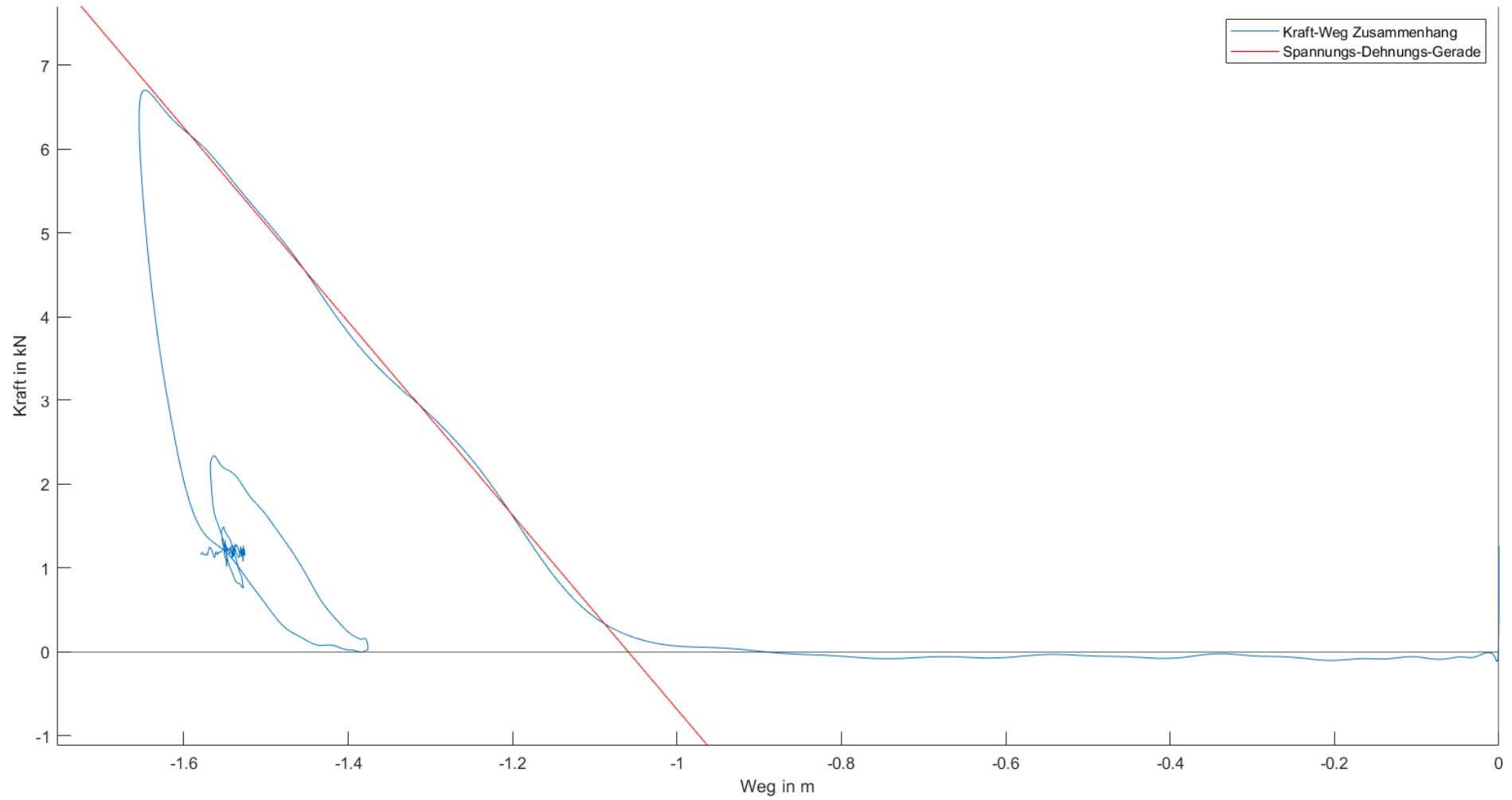


Abbildung 40: Kraft-Weg Diagramm von Versuch 1

$$f = m(\ddot{x}_m - \ddot{x}) = m\ddot{x}_m + k\dot{x}_m + cx_m - mg \quad (9)$$

Das Quadrat der Integration dieses Fehlers über das Messintervall soll ein Minimum annehmen.

$$F = \int_{t_1}^{t_2} f^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} (m\ddot{x}_m + k\dot{x}_m + cx_m - mg)^2 dt \rightarrow \min \quad (10)$$

Um die Position des minimalen Fehlers für c und k zu bestimmen wird Gleichung (10) einmal partiell nach c bzw. k abgeleitet.

$$\frac{\partial F}{\partial c} = 2 \int_{t_1}^{t_2} (m\ddot{x}_m + k\dot{x}_m + cx_m - mg)x_m dt = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial F}{\partial k} = 2 \int_{t_1}^{t_2} (m\ddot{x}_m + k\dot{x}_m + cx_m - mg)\dot{x}_m dt = 0 \quad (12)$$

Die Auswertung erfolgte mittels Matlab R2018b. Das Auswertungsschema war dabei wie folgt:

- Einlesen der Daten in Matlab.
- Festlegen des Signal-Offsets durch Analyse des Signalrauschens vor dem Ausklinken der Fallmasse und ab 1.5s der Zeitachse. Zu beachten ist hier, dass der 0-Punkt der Zeitachse in der linken Flanke des ersten Fangstoßes liegt (siehe Abbildung 39).
- Festlegen des Korrekturfaktors der Drift.
- Filterung des Signals mittels Tiefpassfilter. In Abbildung 39 ist gut ersichtlich, dass ein deutliches Signalrauschen auftrat. Dieses Rauschen betrug $0.02V$. Um das Signal zu filtern wurden unterschiedliche Tiefpassfilter und Methoden der Signalglättung versucht. Dabei wurde neben der Entfernung des Signalrauschens darauf geachtet das Signal nicht überproportional zu glätten und dadurch Messdaten zu verlieren. Als Grenzfrequenz wurde schließlich

$f_c = 0.02\pi \frac{\text{rad}}{\text{ms}} = 10 \text{ MHz}$, als Flankensteilheit im Übergangsbereich 0.85 und als Sperrdämpfung 60dB gewählt. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Versuche mit 30kg Fallmasse wurde klar, dass dieses Rauschen bereits bis zu 10% des Signals ausmacht, was die Daten mit großer Unsicherheit behaftet. Auf eine Auswertung und Verwendung der Daten der dynamischen Versuche mit 30kg Fallmasse wird daher im Folgenden verzichtet.

- Korrektur des Signals gemäß Gleichung (7).
- Umrechnen der gemessenen Spannung auf Beschleunigungswerte.
- Numerische Integration nach Trapezregel $\ddot{x}_m \xrightarrow{\int dt} \dot{x}_m \xrightarrow{\int dt} x_m$, siehe Abbildung 41.
- Finden des Punktes an der linken Schulter des ersten Fangstoßes, an dem -6 m/s^2 überschritten wird. Dieser Punkt wird als Startpunkt für die Näherung verwendet.
- Finden des Punktes, an dem das erste Mal die maximale Kraft des Fangstoßes erreicht wird. 20ms später wird der Endpunkt des Intervalls für die Näherung festgelegt.
- Lösen des Systems aus Gleichung (11) und (12). Grafische Darstellung der Näherung siehe Abbildung 41.
- Grafische Kontrolle bis zum Ende der Zeitachse.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 bis Tabelle 21 dargestellt. Bei Versuch Nr. 6 wurde nach dem Abspringen versehentlich das falsche Ende der Seilprobe durchtrennt, weshalb die Fallmasse auf das Fundament stürzte. Ein anschließender Test der Prüfanlage ergab keine Veränderungen der nachfolgenden Messwerte, jedoch waren die Ergebnisse dieser Messung unbrauchbar. Das Ergebnis ist deshalb nicht angeführt. Dadurch stand eine Probe des Beal Opera weniger zur Verfügung. Da erwartet wurde, dass die Versuche mit schwerer Fallmasse aussagekräftiger sind, wurde zugunsten eines Versuchs mit 120kg auf den dritten Versuch mit 30kg verzichtet.

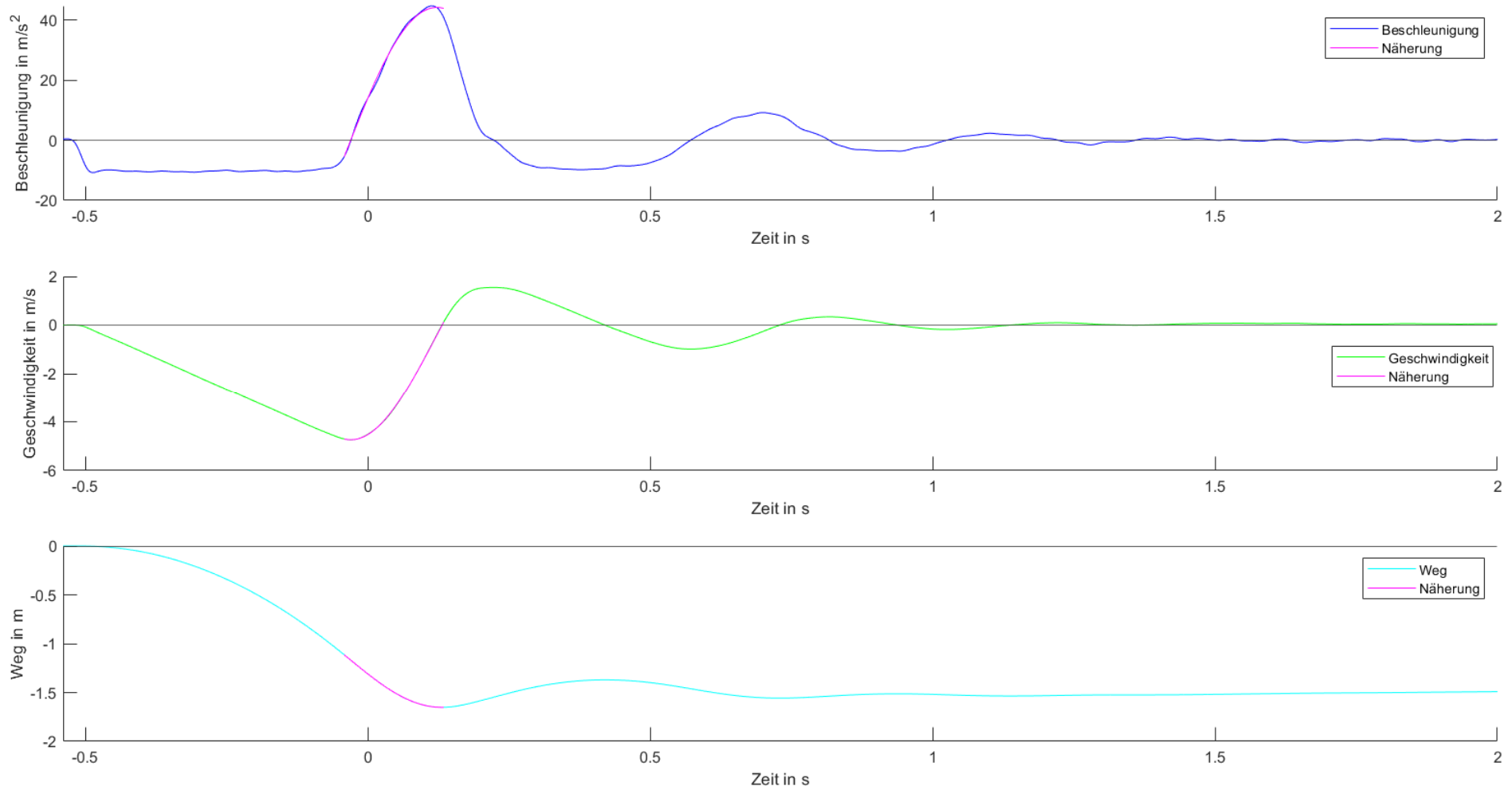


Abbildung 41: Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg über die Zeit, Versuch 1

Versuch Nr.	Masse in kg	Maximale Kraft in N	Federkonstante c in N/m	Dämpfungs-konstante k in Ns/m	Hersteller	Anmerkung
1	123,05	6701,02	12283,93	114,93	Edelrid	
2	123,05	8953,32	23050,62	30,62	Edelrid	
3	123,05	10185,67	26109,76	-	Edelrid	1)
4	123,05	6786,11	13424,27	93,10	Edelrid	
5	123,05	6786,02	13416,18	93,14	Edelrid	
7	123,05	5896,45	9865,76	152,51	Beal	2)
8	123,05	7839,26	25114,97	40,40	Beal	
9	123,05	8811,62	21738,51	27,64	Beal	
10	123,05	6000,24	10402,34	170,89	Beal	
11	123,05	5768,91	11299,26	149,85	Beal	
12	123,05	6761,38	14301,64	123,23	Petzl	
13	123,05	8719,49	22100,47	41,86	Petzl	
14	123,05	9736,13	25217,20	26,18	Petzl	
15	123,05	6839,31	14428,57	117,06	Petzl	
16	123,05	6815,97	16054,13	83,03	Petzl	
17	123,05	6815,97	16054,13	83,03	Mammut	
18	123,05	8895,61	21633,01	60,42	Mammut	
19	123,05	9995,93	20435,08	40,64	Mammut	
20	123,05	6648,20	16337,88	49,79	Mammut	
21	123,05	6748,47	13339,47	64,99	Mammut	

Tabelle 19: Ergebnisse der dynamischen Versuche mit 123,05kg Fallmasse

- 1) Die Näherung ergab eine negative Dämpfung.
- 2) Bei Versuch Nr. 7 trat eine Überladung des Ladungsverstärkers auf. Zurückzuführen ist diese auf ein kurzes Anschlagen der Fallmasse an der Führungsschiene. Das Ereignis trat erst nach dem Peak der Maximalbeschleunigung auf, eine Auswirkung auf die Näherung wird daher ausgeschlossen. Solche Ereignisse traten gelegentlich auf, jedoch interessanterweise meistens erst nachdem die maximale Kraft des Fangstoßes erreicht war. Die Ursache liegt vermutlich an drei Effekten:

1. In einer leichten Asymmetrie der Fallmasse, die dazu führt, dass die Wirkungslinie der Seilkraft nicht durch den Massemittelpunkt der Fallmasse führt. Das führt zu einer Kippbewegung der Fallmasse. Es war die Idee diesen – erwarteten – Effekt durch die flexible Konstruktion der Fallaufhängung mittels Dyneema-Schlinge zu kompensieren. Die

Fallmassen wurden immer exakt waagrecht austariert, um diesem Effekt gegenzusteuern.

2. Ein Lösen des Kontakts zwischen den Seilproben und der Dyneema-Schlinge. Dadurch wird eine Längsverschiebung der Probeseilschleufe an der Dyneema-Schlinge möglich. Diesem Effekt wurde erfolgreich gegengesteuert, indem die Probeseilschleufen für Versuche mit 90kg und weniger Fallmasse mittels Kabelbinder mit der Dyneema-Schlinge verklemmt wurden.
3. Interessanterweise trat das Anschlagen wesentlich häufiger bei Seilproben des Beal Opera als bei anderen Seilproben auf. Eine mögliche Erklärung kann die unterschiedliche Steifigkeit der Seile sein. Diese fiel schon während des Einbindens der 8er- Knoten auf. Während sich die Seile von Edelrid, Petzl und Mammut gut bis sehr gut knoten ließen, war es aufgrund der Steifigkeit sehr schwer das Beal Opera sauber zu binden. Es erscheint plausibel, dass diese erhöhte Steifigkeit zu einer schlechteren Zentrierung über dem Massemittelpunkt der Fallmasse führte.

Versuch Nr.	Masse in kg	Maximale Kraft in N	Federkonstante c in N/m	Dämpfungs-konstante k in Ns/m	Hersteller	Anmerkung
22	93,20	5333,88	11252,65	93,91	Edelrid	
23	93,20	5323,48	11504,02	113,80	Edelrid	
24	93,20	5283,38	11025,35	109,61	Edelrid	
25	93,20	4945,09	9679,03	138,46	Beal	
26	93,20	4781,78	10892,12	150,50	Beal	
27	93,20	4921,51	11377,11	194,63	Beal	3)
28	93,20	5282,36	12020,90	106,96	Petzl	
29	93,20	5187,66	11539,45	128,04	Petzl	
30	93,20	5292,09	11958,42	149,12	Petzl	
31	93,20	4789,75	11173,58	161,02	Mammut	
32	93,20	4836,51	10517,91	180,05	Mammut	
33	93,20	4875,23	10391,78	138,13	Mammut	

Tabelle 20: Ergebnisse der dynamischen Versuche mit 93,20 kg Fallmasse

- 3) Bei Versuch Nr. 26 trat in der Nähe des Zeitpunkts der Maximalkraft eine Störung im Signal auf, die vermutlich von einem Anschlagen an der Führungsschiene stammte. Trotz dieses Umstandes ergeben sich im Vergleich mit den anderen Versuchen plausible Werte. Erfreulicherweise war

dieser der einzige Fall in dem das Aufschlagen der Fallmasse vor dem ersten Beschleunigungsmaximum auftrat.

Versuch Nr.	Masse in kg	Maximale Kraft in N	Federkonstante c in N/m	Dämpfungs-konstante k in Ns/m	Hersteller	Anmerkung
34	62,45	3665,54	9199,40	71,50	Edelrid	
35	62,45	3713,99	10283,06	62,97	Edelrid	
36	62,45	3860,90	10431,91	98,11	Edelrid	
37	62,45	3397,85	7173,80	61,30	Beal	
38	62,45	3609,63	8760,91	78,50	Beal	
39	62,45	3518,51	9071,78	96,59	Beal	
40	62,45	3948,44	10319,45	84,61	Petzl	
41	62,45	3905,95	10593,79	79,05	Petzl	
42	62,45	4063,96	10911,46	106,00	Petzl	
43	62,45	3702,39	9583,14	92,68	Mammut	
44	62,45	3825,74	9777,31	100,19	Mammut	
45	62,45	3640,21	10062,51	100,02	Mammut	

Tabelle 21: Ergebnisse der dynamischen Versuche mit 62,45 kg Fallmasse

Eine wichtige Erkenntnis der Versuche ist die Veränderung des Verhaltens über mehrere Versuche hinweg. Diese sind Abbildung 42 bis Abbildung 45 zu entnehmen. Dabei wurde jeweils der Beginn des Falls übereinandergelegt. Gut zu sehen ist

1. Der Zeitpunkt der maximalen Fangstoßkraft verschiebt sich zwischen den Versuchen kaum. Da die absolute Falllänge der Probe zunimmt wird die relative Seildehnung mit jedem durchgeführten Versuch der gleichen Probe geringer. Da zwischen den Versuchen jeweils etwa eine Minute verging, in der die Fallmasse wieder angehoben und die Datenmessung vorbereitet wurde, wird davon ausgegangen, dass das Seil ausreichend Zeit für den reversiblen Teil der Längenänderungen hatte. Es ist somit sehr wahrscheinlich, dass es durch den Sturz zu einer bleibenden Längenänderung der Seile kommt.
2. Die maximale Fangstoßkraft nimmt mit jedem Versuch zu. Die Änderung vom ersten auf den zweiten Versuch der Probe ist wesentlich deutlicher als vom zweiten auf den dritten Versuch. Die Zunahme der maximalen Kraft kann kaum mit einem weiteren Festziehen der Knoten zusammenhängen, da dieser Prozess als Dämpfung in der Auswertung sichtbar wäre.

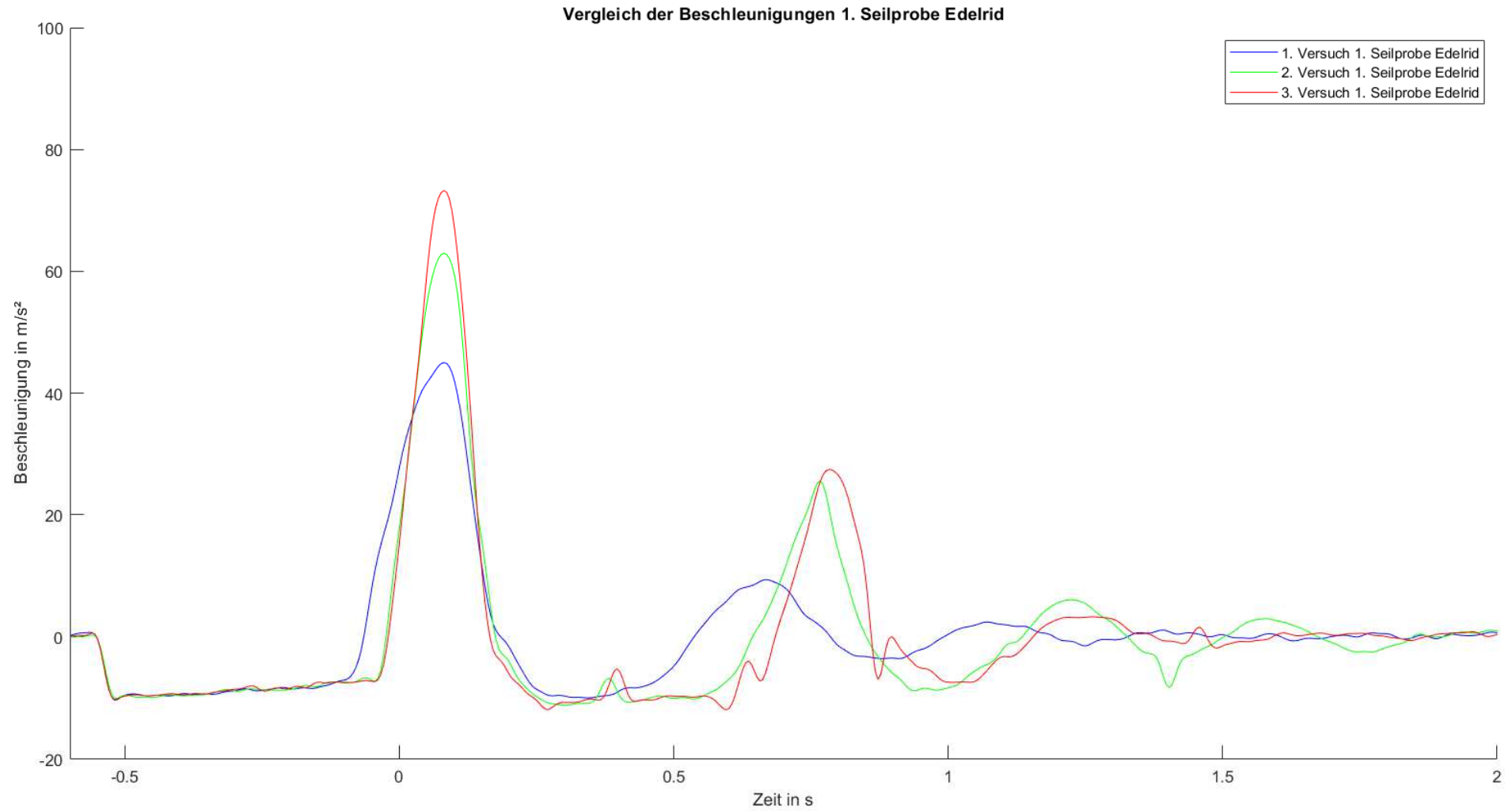


Abbildung 42: Vergleich der Beschleunigungsverläufe der drei Versuche der 1. Seilprobe Edelrid

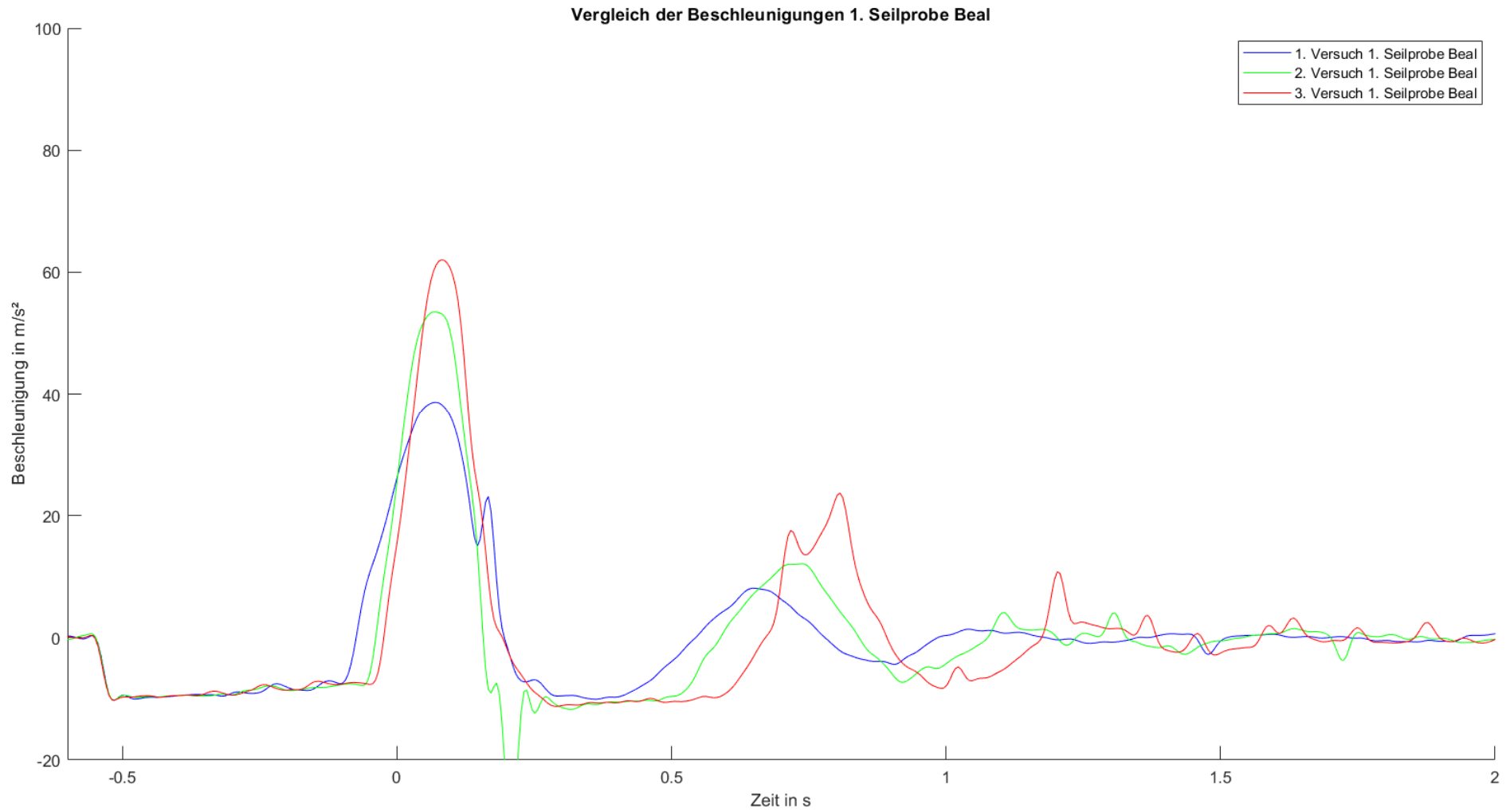


Abbildung 43: Vergleich der Beschleunigungsverläufe der drei Versuche der 1. Seilprobe Beal

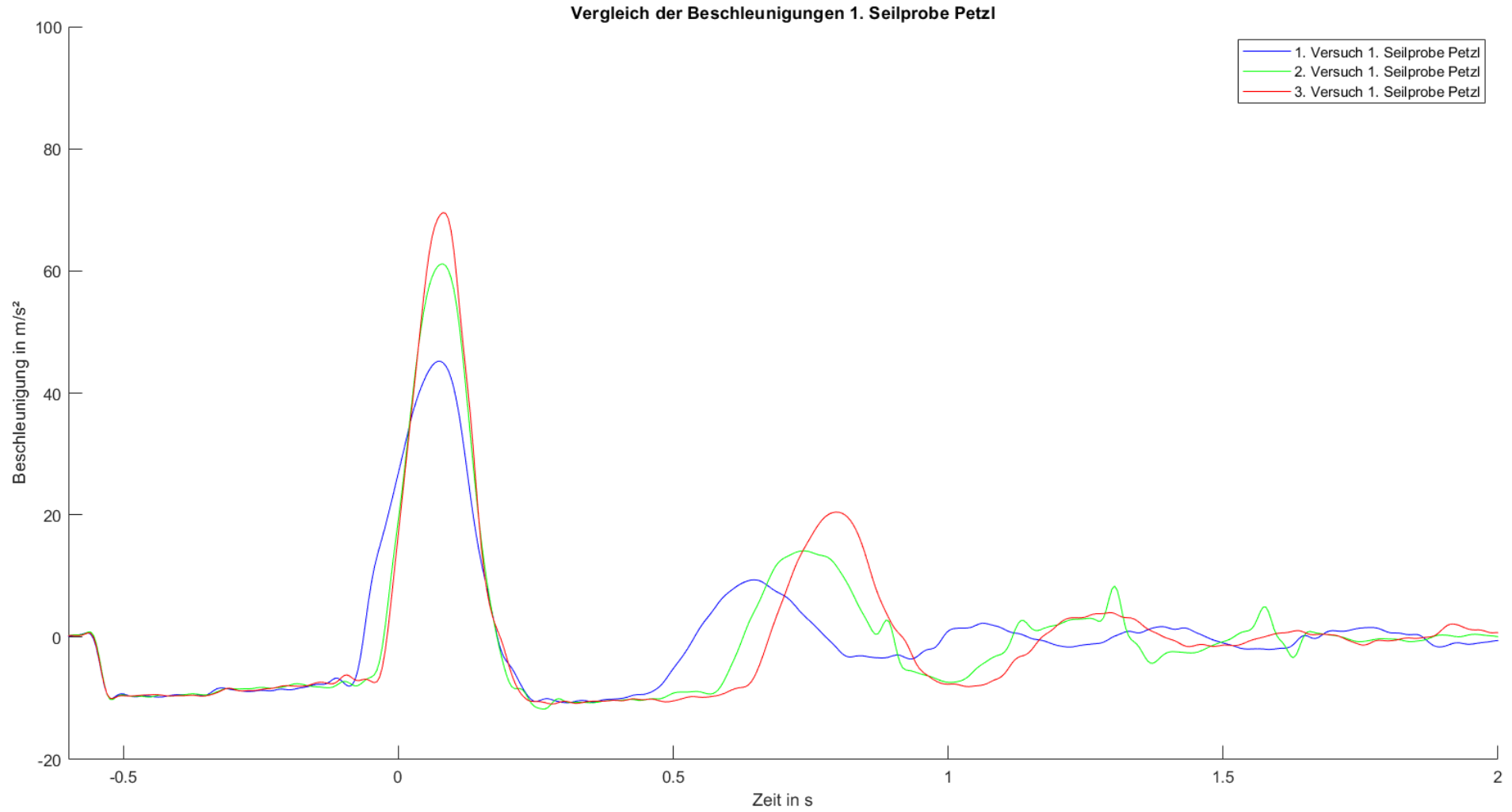


Abbildung 44: Vergleich der Beschleunigungsverläufe der drei Versuche der 1. Seilprobe Petzl

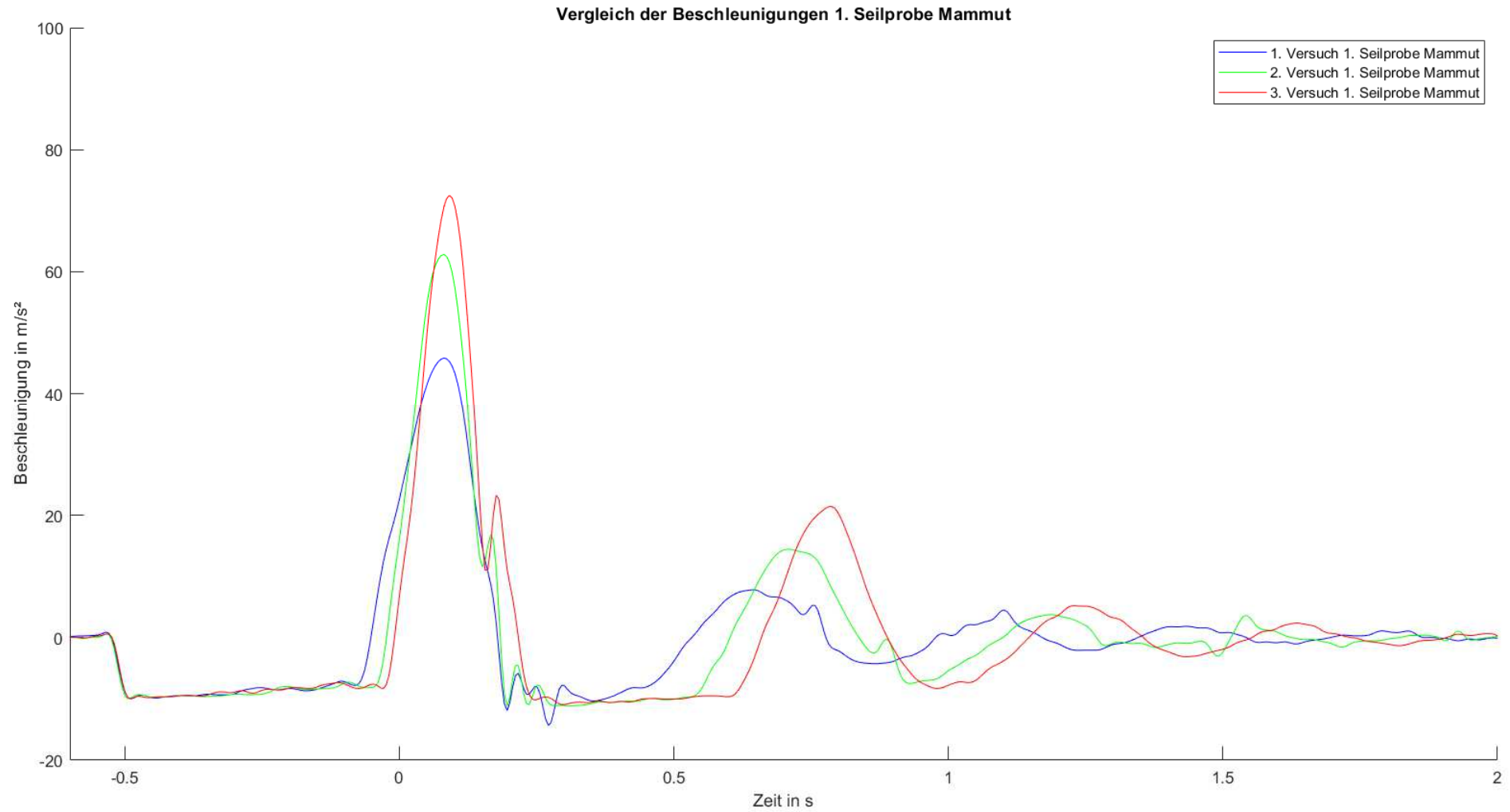


Abbildung 45: Vergleich der Beschleunigungsverläufe der drei Versuche der 1. Seilprobe Mammut

Die beiden Beobachtungen zeigen sich unabhängig vom Hersteller bei allen Seilproben. Für eine belastbare Aussage sind in diesem Zusammenhang weitere Versuche mit verbessertem Versuchsdesign nötig. Die Ergebnisse der Analyse der Mehrfachversuche sind in Tabelle 22 dargestellt.

Nr. (Hersteller)	Steigerung der Maximalkraft in %
Versuch Nr. 1 auf 2 (Edelrid))	33,61%
Versuch Nr. 2 auf 3 (Edelrid)	13,76%
Versuch Nr. 1 auf 3 (Edelrid)	52,00%
Versuch Nr. 7 auf 8 (Beal)	32,95%
Versuch Nr. 8 auf 9 (Beal)	12,40%
Versuch Nr. 7 auf 9 (Beal)	49,44%
Versuch Nr. 12 auf 13 (Petzl)	28,96%
Versuch Nr. 13 auf 14 (Petzl)	11,66%
Versuch Nr. 12 auf 14 (Petzl)	44,00%
Versuch Nr. 17 auf 18 (Mammut)	30,51%
Versuch Nr. 18 auf 19 (Mammut)	12,37%
Versuch Nr. 17 auf 19 (Mammut)	46,65%

Tabelle 22: Prozentuelle Steigerungen der Fangstöße

Da sich die Werte herstellerübergreifend stark ähneln, wird davon ausgegangen, dass dieses Verhalten bei allen Bergseilen in ähnlicher Form auftritt.

Weiters zeigt sich in Tabelle 19 bis Tabelle 21, dass die viskose Dämpfung sehr gering ist. Besonders bei den zweiten und dritten Versuchen mit gleicher Seilprobe wird die Dämpfungskonstante so gering, dass sich Messunsicherheiten besonders ungünstig auswirken. Das wird besonders deutlich bei Versuch Nr. 3 wo sich aus der Berechnung eine negative Dämpfung ergibt.

4.2.6 Zusammenfassung der Materialparameter

In Tabelle 23 sind die gemittelten Federkonstanten der statischen Versuche zusammengefasst. Die Federkonstanten wurden dabei ermittelt durch

$$c = \frac{mg}{\Delta l} \quad (13)$$

Masse in kg	Maximalkraft in N	Federkonstante c in N/m	Hersteller
123,05	1207,12	10790,71	Edelrid
123,05	1207,12	11693,13	Beal
123,05	1207,12	11229,03	Petzl
123,05	1207,12	10314,33	Mammut
93,20	914,29	8505,04	Edelrid
93,20	914,29	11524,69	Beal
93,20	914,29	9142,92	Petzl
93,20	914,29	9253,97	Mammut
62,45	612,63	6732,25	Edelrid
62,45	612,63	9338,94	Beal
62,45	612,63	7942,54	Petzl
62,45	612,63	7504,71	Mammut
32,15	315,39	3643,34	Edelrid
32,15	315,39	11538,71	Beal
32,15	315,39	4995,64	Petzl
32,15	315,39	5611,95	Mammut
75,00	735,75	10148,28	Edelrid
75,00	735,75	8758,93	Beal
75,00	735,75	9680,92	Petzl
75,00	735,75	12262,50	Mammut
37,50	367,88	6569,20	Edelrid
37,50	367,88	7213,24	Beal
37,50	367,88	8360,80	Petzl
37,50	367,88	9196,88	Mammut

Tabelle 23: Gemittelte Federkonstanten aus den statischen Versuchen

In Tabelle 24 sind die gemittelten Feder- und Dämpfungskonstanten aus den dynamischen Versuchen zusammengefasst.

Masse in kg	Maximalkraft in N	Federkonstante c in N/m	Dämpfungs-konstante k in Ns/m	Hersteller
123,05	6757,72	13041,46	100,39	Edelrid
123,05	5888,53	10522,45	157,75	Beal
123,05	6805,55	14928,11	107,77	Petzl
123,05	6737,55	15243,82	65,93	Mammut
93,20	5313,58	11260,68	105,77	Edelrid
93,20	4882,79	10649,42	161,19	Beal
93,20	5254,04	11839,59	128,04	Petzl
93,20	4833,83	10694,42	159,73	Mammut
62,45	3746,81	9971,46	77,53	Edelrid
62,45	3508,66	8335,49	78,80	Beal
62,45	3972,78	10608,23	89,89	Petzl
62,45	3722,78	9807,65	97,63	Mammut

Tabelle 24: Gemittelte Feder- und Dämpfungskonstanten aus den dynamischen Versuchen

Wie in Kapitel 4.2.4 gezeigt, waren die statischen Messungen für niedrige Massen mit großen Unsicherheiten behaftet. Es werden deshalb für die weitere Betrachtung nur Daten der statischen Versuche mit 75kg oder mehr herangezogen.

Abbildung 46 zeigt die Federkonstante in Abhängigkeit von der Kraft. Der Determinationskoeffizient für den linearen Fit liegt zwischen 0 und 0.7, wobei die Standardabweichung zwischen 1400 N/m für Beal und 2200 N/m für die Seilprobe von Mammut liegt. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Federkonstante nicht von der auftretenden Kraft abhängig ist. Für die weitere Berechnung werden deshalb die Mittelwerte der Federkonstanten der statischen Versuche mit einer Fallmasse von zumindest 75kg und der dynamischen Versuche herangezogen.

Abbildung 47 zeigt die Dämpfungskonstante in Abhängigkeit von der auftretenden Kraft. Es erscheint möglich, dass es einen nicht-linearen Zusammenhang gibt. Da nur wenige Datenpunkte vorliegen und die Dämpfungskonstante sehr klein ist, lässt sich das nicht abschließend beurteilen. Für die weitere Berechnung werden deshalb die Mittelwerte der Dämpfungskonstanten herangezogen.

Tabelle 25 zeigt die Mittelwerte der Feder- und Dämpfungskonstanten.

Federkonstante c in N/m	Dämpfungskonstante k in Ns/m	Hersteller
10619,60	94,56	Edelrid
10247,35	132,58	Beal
11238,13	108,57	Petzl
11262,78	107,77	Mammut

Tabelle 25: Mittelwerte der Feder- und Dämpfungskonstanten

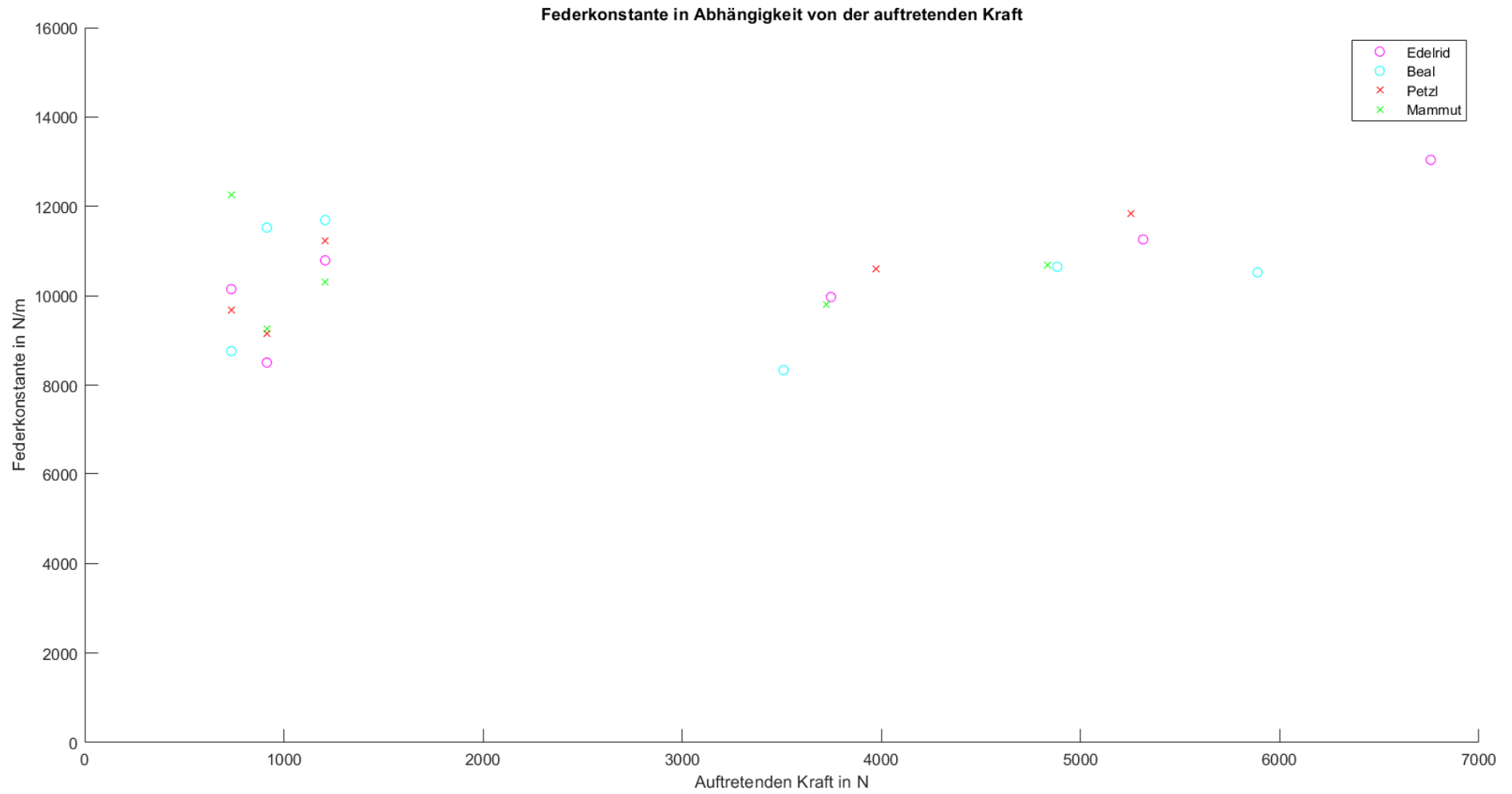


Abbildung 46: Federkonstante in Abhängigkeit von der auftretenden Kraft

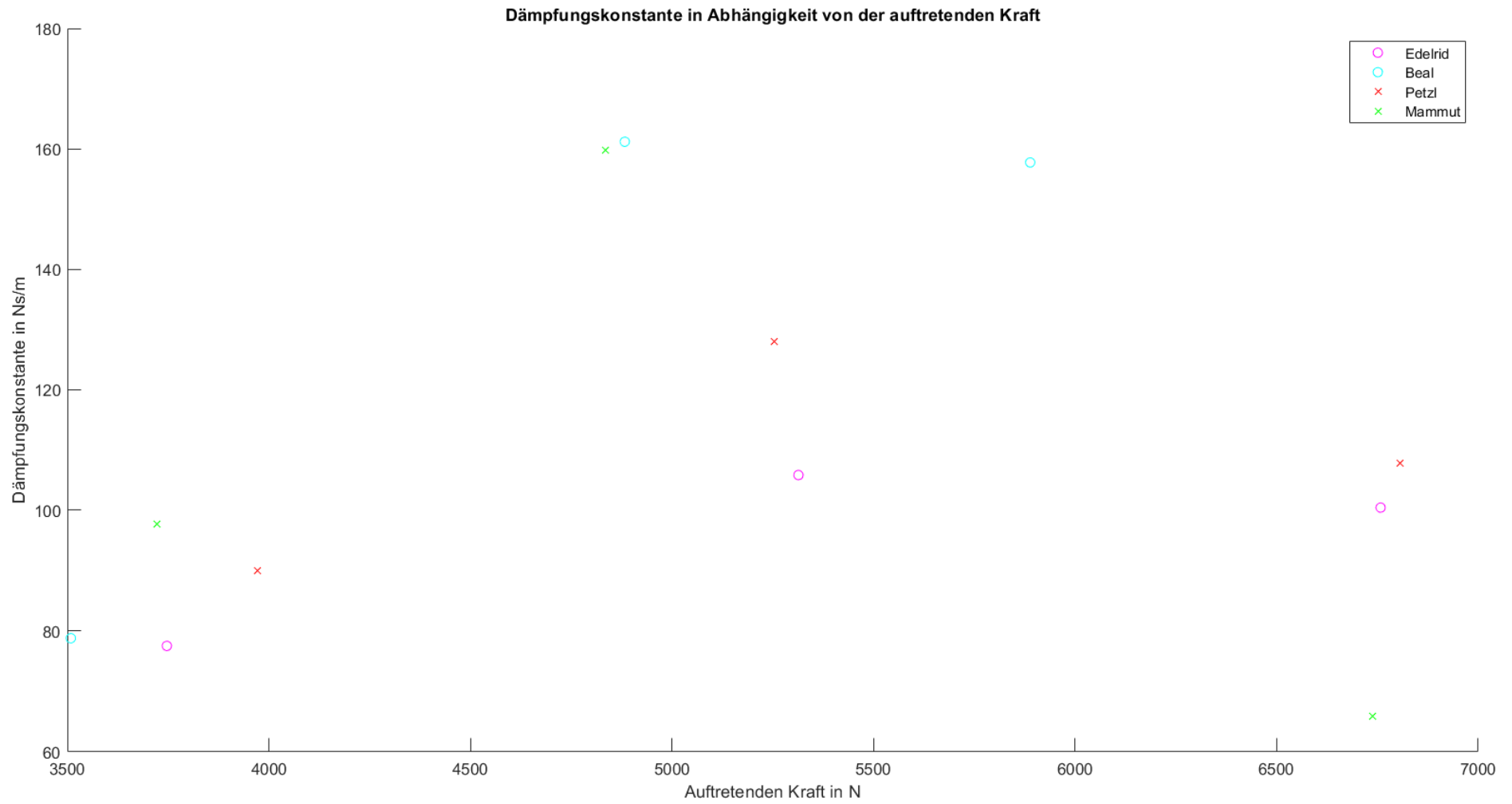


Abbildung 47: Dämpfungskonstante in Abhängigkeit von der auftretenden Kraft

4.3 Fallgeschwindigkeit

In der Literatur wird gerne der Vergleich zwischen dem Rutschen über eine Gletscherflanke und dem freien Fall gezogen. Um den Einfluss des Luftwiderstandes auf das mechanische Ersatzmodell einschätzen zu können wird nachfolgend für einen aus der Literatur bekannten Fall, bei dem die Falllänge angegeben wird (Hoi, 2016) die Geschwindigkeitsdifferenz bestimmt. Hoi (Hoi, 2016) bezieht sich bei seinen Aussagen auf Untersuchungen des DAV-Sicherheitskreises vom Beginn der 80er Jahre, aus denen Schubert (Schubert, 2016) seine Daten bezogen hat.

Zuerst wird ein Vergleich zwischen der Geschwindigkeit des freien Falls ohne und mit Luftwiderstand gezogen. Die Geschwindigkeit ohne Luftwiderstand lässt sich auf zwei Arten bestimmen. Gleichung (14) gibt die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fallzeit Δt an. Gleichung (15) gibt die Geschwindigkeit zeitfrei als Funktion des zurückgelegten Weges Δs an.

$$\Delta v = a \Delta t \quad (14)$$

$$\Delta v = \sqrt{2a \Delta s} \quad (15)$$

Für den Luftwiderstand gilt die folgende Bewegungsgleichung (16)

$$m\dot{v} = \underbrace{mg}_{F_G} - \underbrace{\frac{c_W \rho_L A_p}{2} v^2}_{F_W} \quad (16)$$

wobei die Geschwindigkeit nach unten positiv gezählt wird.

Für die Geschwindigkeit v gilt mit der Anfangsbedingung $v(0) = 0$ zu einem Zeitpunkt t

$$v(t) = v_s \tanh \frac{t}{t_s} \quad (17)$$

Dabei ist

$$v_s = \sqrt{\frac{2mg}{c_W \rho_L A_p}} \quad (18)$$

die stationäre Sinkgeschwindigkeit. Sie folgt aus dem Gleichgewicht von Gewichtskraft $F_G = mg$ und Luftwiderstand und ist daher die Geschwindigkeit, die sich als stationäre Geschwindigkeit bei unendlich langem Fall einstellen würde. (Böge, 2009, S. 157f)

Für den zurückgelegten Weg ab Beginn des Falls gilt

$$s(t) = v_s t_s \ln \left(\cosh \left(\frac{t}{t_s} \right) \right) \quad (19)$$

Für die Zeitkonstante gilt:

$$t_s = \sqrt{\frac{2m}{c_W \rho_L A_p g}} \quad (20)$$

Dabei sind

c_W	1	Luftwiderstandsbeiwert
ρ_L	kg/m ³	Dichte der Luft
A_p	mm ²	Anströmquerschnitt des Körpers
v	m/s	Geschwindigkeit
\dot{v}	m/s ²	Beschleunigung
v_s	m/s	stationäre Sinkgeschwindigkeit
t_s	s	Zeitkonstante
g	m/s ²	Gravitationskonstante (= 9.81 m/s ²)
m	kg	Masse des stürzenden Seilschaftsmitglieds

Für die Dichte der Luft wird $\rho_L = 0.9 \text{ kg/m}^3$ angenommen. Dieser Wert bezieht sich auf eine Höhe von 3 km und eine Temperatur von $-4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Klose, 2008, S. 73).

Ein gestürztes Seilschaftsmitglied, das versucht den eigenen Sturz zu bremsen muss in Liegestützstellung gehen (siehe Kapitel 2.3). Das Seilschaftsmitglied ähnelt dann

im Querschnitt einem Turmspringer. Dieses Modell ist aus der Literatur bekannt. Für den Luftwiderstandsbeiwert wird als Näherung $c_W = 1.0$ und für den Querschnitt $A = 0.125 \text{ m}^2$ verwendet (Schröder, 2019, S. 293).

Die Wahl der Masse des Seilschaftsmitglieds ist theoretisch beliebig, wird für diesen Vergleich aber mit $m = 80 \text{ kg}$ angenommen. Damit entspricht die Masse jener zur dynamischen Normprüfung von Bergseilen.

Für die näherungsweise Berechnung der Fallzeit für die bei Hoi (Hoi, 2016) angegebenen 12.71 m des freien Falls werden die Gleichungen (14) und (15) zusammengefasst. Mit einer Startzeit $t_0 = 0$ und Startweg $s_0 = 0$ folgt

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}} \quad (21)$$

Aus Gleichung (21) ergibt sich für den freien Fall eine Fallzeit von $t_1 = 1.61 \text{ s}$. Dieses Beispiel ist praktikabel, da die Fallzeit unter der Reaktionszeit liegt. Die folgenden Vergleichsrechnungen werden auf diese Fallzeit bezogen.

Aus Gleichung (15) folgt für den freien Fall ohne Luftwiderstand nach 12.71 m eine Geschwindigkeit von $v_{1rl} = 15.792 \text{ m/s}$. Diese Geschwindigkeit deckt sich mit den in der Literatur angegebenen $v_{1Hoi} = 15.8 \text{ m/s}$ (Hoi, 2016).

Für die Fallzeit mit Luftwiderstand gilt

$$t = t_s \operatorname{acosh} e^{\frac{S_F}{v_s t_s}} \quad (22)$$

Für den freien Fall mit Luftwiderstand ergibt sich dann aus Gleichung (17) eine Geschwindigkeit von $v_{1r} = 15.790 \text{ m/s}$. Bei Berücksichtigung des Luftwiderstands wird damit eine Geschwindigkeit von 99.993 % im Vergleich zum Fall ohne Luftreibung erreicht, wobei die Differenz mit der Länge des Falls zunimmt. So würde ein Seilschaftsmitglied nach 50 m freiem Fall (entspricht 3.2 s) mit Luftwiderstand 98.27 % des Wertes ohne Luftwiderstand erreichen.

Da alle im Folgenden betrachteten Falldistanzen eine Höhendifferenz von unter 12.71 m aufweisen, wird der Luftwiderstand im weiteren Modell vernachlässigt.

4.4 Mechanisches Ersatzmodell

Die Erstellung des mechanischen Ersatzmodells folgt den 5 Phasen vom Beginn des Kapitels 4. Diese 5 Phasen müssen für eine vollständige Simulation der Reihe nach durchlaufen werden. Dafür werden die Seilschaftsmitglieder durch Quader angenähert. Zur besseren Übersicht sind in den folgenden Abbildungen Kräfte, die zur Beschleunigung der Masse beitragen mit rot, bremsende Kräfte mit grün, die Geschwindigkeit mit blau und sonstige Parameter mit schwarz eingezeichnet.

4.4.1 Phase der Beschleunigung

In dieser Phase beschleunigt das gestürzte Seilschaftsmitglied und wird dabei durch Gleitreibung gebremst. Abbildung 48 zeigt das freigemachte System der Beschleunigungsphase eines gestürzten Seilschaftsmitglieds mit der Masse m_1 . Die Nomenklatur folgt dabei dem Prinzip von Abbildung 22.

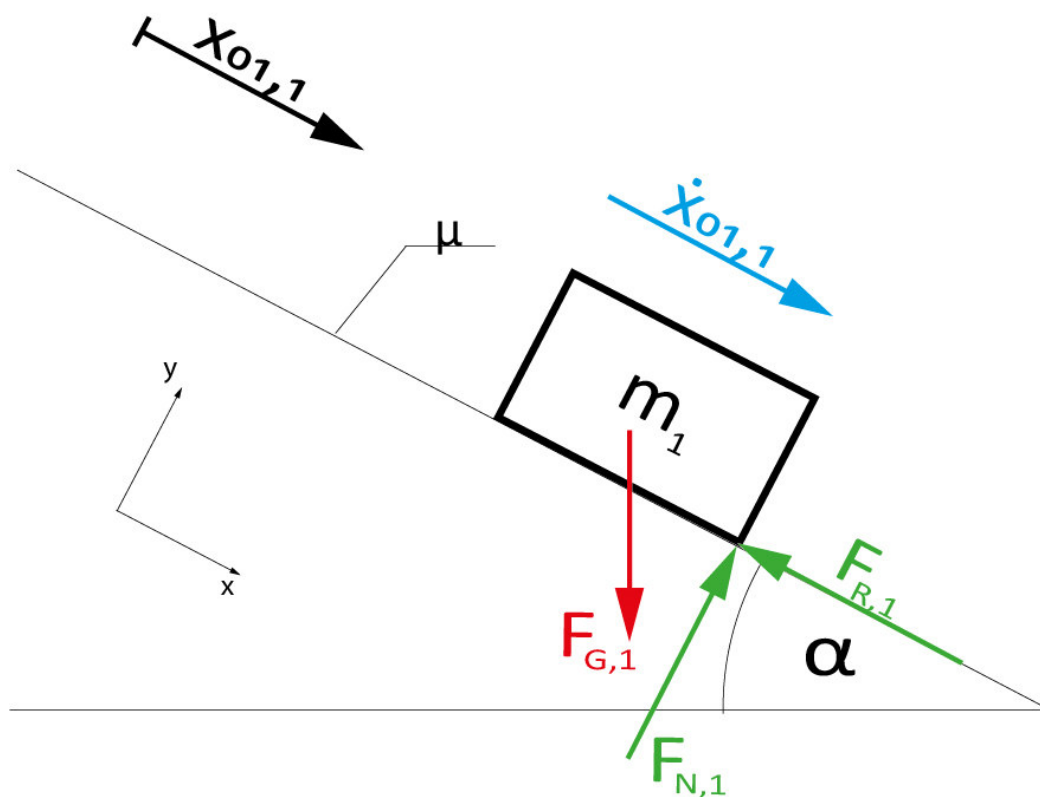


Abbildung 48: Freigemachtes System der Phase der Beschleunigung

Aus dem Kräftegleichgewicht in y-Richtung folgt

$$F_N = F_G \cos \alpha = m_1 g \cos \alpha \quad (23)$$

Für den Schwerpunktsatz in x-Richtung gilt dann

$$m_1 \ddot{x}_{01,1} = F_G \sin \alpha - F_R = m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \quad (24)$$

Dabei stellt der Spaltensturz einen Sonderfall mit $\alpha = 90^\circ$ dar.

Mit Gleichung (15) folgt dann die Geschwindigkeit $v_{1,1}$ bei t_1

$$v_{1,1} = \sqrt{2a s_1} \quad (25)$$

Wobei s_1 die Sturzdistanz bis zum Beginn des Fangstoßes ist. Die Geschwindigkeit $v_{1,1}$ stellt die Ausgangsgröße für diese Phase dar.

4.4.2 Phase der Spannung des Seils

Im Zuge der Dehnung des Seils während des Fangstoßes wird zusätzlich zur vorhandenen Reibung kinetische Energie des stürzenden Seilschaftsmitglieds in Federenergie umgewandelt und durch die Seildämpfung dissipiert. Abbildung 49 zeigt das freigemachte System der Phase der Seilspannung für ein einzelnes gestürztes Seilschaftsmitglied mit der Masse m_1 .

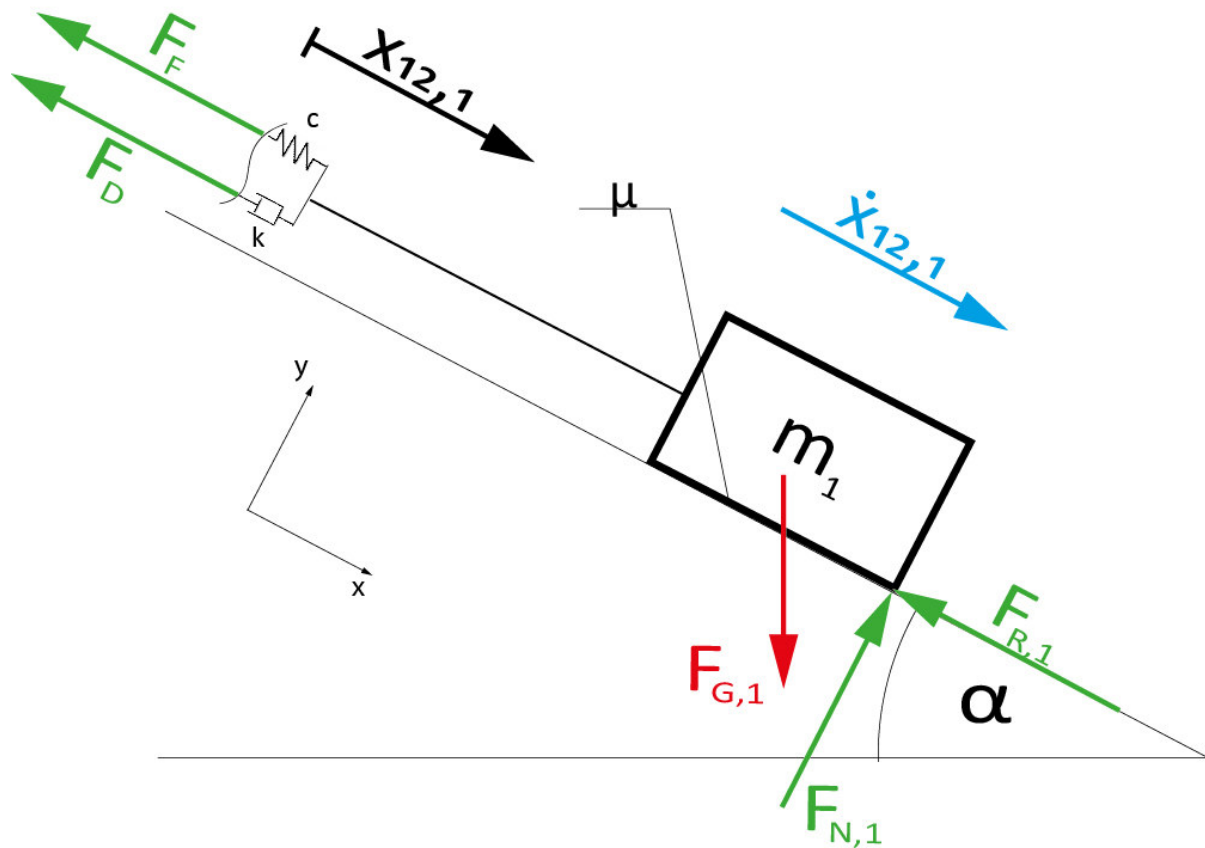


Abbildung 49: Freigemachtes System der Phase der Spannung des Seils

Da das Seil ab t_1 straff ist gilt $x_{12,1}(t_1) = 0$ und $\dot{x}_{12,1}(t_1) = v_{1,1}$ als Anfangsbedingungen.

Damit folgt die Bestimmungsgleichung des Gleichgewichts am Ende der Phase der Seilspannung durch Aufstellen des Schwerpunktsatzes in x-Richtung und umformen auf die Seilkraft F_S

$$m_1 \ddot{x}_{12,1} = F_G \sin \alpha - F_F - F_D - F_R \quad (26)$$

$$F_S = F_F + F_D = c x_{12,1} + k \dot{x}_{12,1} = m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - \ddot{x}_{12,1} m_1 \quad (27)$$

Die linke und die rechte Flanke des Fangstoßes sind bei einem Bergseil unterschiedlich (siehe Kapitel 4.2.5). Da aber nur die linke Flanke des ersten Fangstoßes untersucht wurde, wird der Fangstoß im Rahmen dieses Modells mit der

Feder- und Dämpfungskonstante der linken Flanke als gedämpfte Schwingung modelliert. Gleichung (27) hat die allgemeine Lösung

$$x(t) = e^{-\delta t} (A \cos(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)) + \frac{m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{c} \quad (28)$$

$$\dot{x}(t) = e^{-\delta t} ((B\omega_d - A\delta) \cos(\omega_d t) - (B\delta - A\omega_d) \sin(\omega_d t)) \quad (29)$$

Mit den Anfangsbedingungen $x_{12,1}(t_1) = 0$ und $\dot{x}_{12,1}(t_1) = v_{1,1}$ ergeben sich die Integrationskonstanten

$$0 = A + \frac{m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{c} \Rightarrow A = -\frac{m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{c} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} v_{1,1} &= B\omega_d - A\delta = B\omega_d + \frac{m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{c} \delta \\ \Rightarrow B &= \frac{v_{1,1}}{\omega_d} - \frac{m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{c} \frac{\delta}{\omega_d} \end{aligned} \quad (31)$$

Für die Lösung bis zur Maximalkraft folgt damit

$$x(t) = \frac{v_{1,1}}{\omega_d} e^{-\delta t} \sin(\omega_d t) + \frac{m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{c} \left(1 - e^{-\delta t} \left(\cos(\omega_d t) + \frac{\delta}{\omega_d} \sin(\omega_d t) \right) \right) \quad (32)$$

$$\dot{x}(t) = e^{-\delta t} \left(v_{1,1} \cos(\omega_d t) - \left(\frac{v_{1,1} \delta}{\omega_d} - \frac{m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) (\delta^2 + \omega_d^2)}{c \omega_d} \right) \sin(\omega_d t) \right) \quad (33)$$

Dabei beschreibt δ die Abklingkonstante, ω_0 die ungedämpfte Eigenfrequenz und ω_d die gedämpfte Eigenfrequenz. Für sie gilt

$$\delta = \frac{k}{2m_1} \quad (34)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m_1}} \quad (35)$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (36)$$

Wird für das stürzende Seilschaftsmitglied als Extrembeispiel $m_1 = 110 \text{ kg}$ das aufgerundete P95 Gewicht (108.8 kg) der in Österreich lebenden Männer (Österreichischer Ernährungsbericht 2017, 2017, S. 94) und als Steigung $\alpha = 90^\circ$ verwendet, so gilt (siehe Kapitel 4.3 für die Referenz zu $v_{1,1}$)

$$\frac{m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{c} \delta \approx 0.047 \ll v_{1,1} \quad (37)$$

Damit lässt sich für die Gleichungen (32) und (33) folgende Näherung angeben

$$x_{12,1} \approx e^{-\delta t} \frac{v_{1,1}}{\omega_d} \sin(\omega_d t) \quad (38)$$

$$\dot{x}_{12,1} \approx e^{-\delta t} \frac{v_{1,1}}{\omega_d} (\omega_d \cos(\omega_d t) - \delta \sin(\omega_d t)) \quad (39)$$

Diese Phase endet mit dem Erreichen der maximalen Kraft des Fangstoßes was in guter Näherung bei $\dot{x}_{12,1} = 0$ auftritt. Das haltende Seilschaftsmitglied kann dieser widerstehen, solange die Seilkraft F_S kleiner bleibt als die haltbare Kraft gemäß Kapitel 3.4. Andernfalls kann der Sturz nicht abgefangen werden und die Masse bewegt sich weiter.

4.4.3 Phase des Fangstoßes

Diese Phase läuft parallel zur Phase der Spannung des Seils ab und beschreibt die Situation für das haltende Seilschaftsmitglied. Das freigemachte System der Phase des Fangstoßes ist in Abbildung 50 dargestellt.

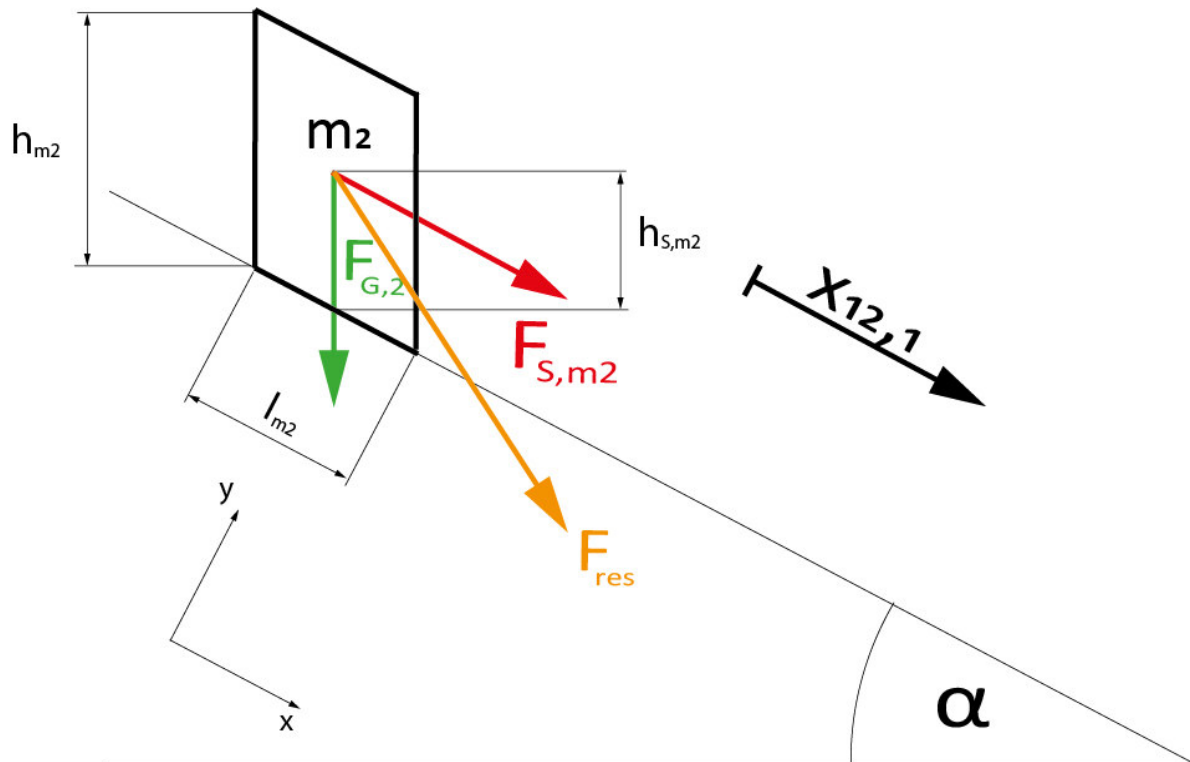


Abbildung 50: Freigemachtes System der Phase des Fangstoßes

Wie bereits beschrieben wird davon ausgegangen, dass zwischen dem haltenden Seilschaftsmitglied der Masse m_2 und dem Untergrund Haften auftritt, da das Seilschaftsmitglied entweder Steigeisen trägt oder in Trittmulden in Schnee oder Firn steht, die ebenfalls Haften sicherstellen. Auf den – weit außerhalb der Lehrmeinung der Alpenvereine liegenden – Fall einer Person, die beispielsweise mit Turnschuhen, ohne Steigeisen, jedoch angeseilt auf einem (nahezu) aperen Gletscher unterwegs ist, wird hier nicht eingegangen.

Im Rahmen dieses Modells wird das haltende Seilschaftsmitglied als Quader angenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Aufstandsfläche A_{m2} des Quaders nur von der Gangphase abhängig ist. Es gilt damit $A_{m2} = l_{m2}(t) b_{m2}(t)$. Die Erstreckung normal zur Bildebene – in Abbildung 50 die Breite – wird in diesem Modell als konstant angenommen, sodass die Aufstandsfläche nur von der Länge abhängig ist.

Durch das Ausschließen der Reibung für das haltende Seilschaftsmitglied tritt Kippen auf, sobald die in Abbildung 50 dargestellte resultierende Kraft F_{res} (orange dargestellt) sich wie dargestellt über die rechte Kante des Masseblocks hinaus schiebt. Bei Schubert (Schubert, 2016) werden nur Kräfte für den Sturzzug von Vorne und der Seite angegeben und auch diese nur für eine Steigung von 38° . Kippen tritt ein, sobald die Kippbedingung der Gleichung (40) für das haltende Seilschaftsmitglied erfüllt ist

$$F_S \cos \alpha h_{S,m2} > F_{G,2} \frac{l_{m2}(t)}{2} \cos \alpha \Rightarrow F_S > F_{G,2} \frac{l_{m2}(t)}{2 h_{S,m2}} \quad (40)$$

mit $h_{S,m2} \approx 0.7 h_2$

$$F_{G,2} = m_2 g$$

$h_{S,m2}$ beschreibt dabei die Höhe, in der sich der Schwerpunkt des Seilschaftsmitglieds befindet (Hanavan, 1964, S. 57). Es wird davon ausgegangen, dass das Einbinden des Seiles so erfolgt, dass die Wirkungslinie durch den Schwerpunkt geht. Für Kippen bei seitlicher Zugbelastung wird die Kipplänge $l_{m2}(t)$ durch die Kippbreite $b_{m2}(t)$ ersetzt, wobei das Berechnungsschema gleichbleibt.

Da die Kippbedingung unter den obigen Annahmen unabhängig von der Steigung ist, ergibt sich, dass Unterschiede beim Halten eines Sturzes allein durch die maximale Kraft des Fangstoßes erklärt werden können.

Die Aufstandsfläche des Quaders ist, neben der Gangphase, von der Länge der Beine abhängig. Da Menschen unterschiedlich lange Beine haben, das Verhältnis der Beine zur Körpergröße aber annähernd konstant bleibt (Hanavan, 1964, S. 56) wird das Verhältnis von Schwerpunkthöhe zur Aufstandslänge bzw. -breite, je nach Richtung des Sturzzuges, als Konstant angesehen.

Wird Gleichung (40) für die Kippgrenze angesetzt und umgeformt, so kann ein Kippkoeffizienten definiert werden.

$$K_{kippe}(t) = \frac{l_{m2}(t)}{2 h_{S,m2}} = \frac{F_S}{F_{G,2}} \quad (41)$$

Der Kippkoeffizienten $K_{kippe}(t)$, ist von der Gangphase abhängig. Bei Schubert (Schubert, 2016) wird das Gewicht der Probanden mit 70 bis 80 kg angegeben. Deshalb wird die Masse mit 75 kg angenommen. Tabelle 26 zeigt die Kippkonstanten für die von der Belastungsrichtung abhängigen widerstehbaren Kräfte. (Schubert, 2016, S. 232)

Belastungsrichtung	widerstehbare Kraft in N	Kippkoeffizient
Fangstoß im Stand seitlich	300	0,41
Fangstoß im Stand frontal	400	0,54
Fangstoß im Gang seitlich minimal	50	0,07
Fangstoß im Gang seitlich maximal	200	0,27
Fangstoß im Gang frontal minimal	50	0,07
Fangstoß im Gang frontal maximal	500	0,68

Tabelle 26:Kippkonstanten

Durch Kombination von Gleichung (27), (40) und (41) folgt für die Kippbedingung des zweiten Seilschaftsmitglieds in Abhängigkeit vom ersten Seilschaftsmitglied

$$F_S = cx_{12,1} + k\dot{x}_{12,1} > m_2 g K_{kippe}(t) \quad (42)$$

Der Spaltensturz stellt einen Spezialfall dar. Durch die Spaltenlippe ändert sich die Seilkraft vor und nach der Spalte. Dadurch besitzt das Seil vom Spaltenrand bis zum gestürzten Seilschaftsmitglied eine andere Dehnung und eine andere Dehnungsgeschwindigkeit als das Seil vom Spaltenrand bis zum haltenden Seilschaftsmitglied. Der Anteil des Seils der zu Beginn des Fangstoßes vom Spaltenrand bis zum gestürzten Seilschaftsmitglied reicht ist dabei abhängig vom Schlappseil zwischen den Seilschaftsmitgliedern. Bis zum Kippen des haltenden Seilschaftsmitglieds kann sich dieses Verhältnis nur aufgrund der Seildehnung ändern. Unter Vernachlässigung des Seils, das durch die Dehnung über die Spaltenlippe rutscht, gilt damit

$$F_{S,m2} = e^{-\mu(\frac{\pi}{2}-\alpha)} F_{S,m1} \quad (43)$$

Näherungsweise wird daher für die Seilkräfte, denen das haltende Seilschaftsmitglied widerstehen muss, angenommen

$$e^{-\mu(\frac{\pi}{2}-\alpha)}(cx_{12,1} + k\dot{x}_{12,1}) > m_2g K_{kip}(t) \quad (44)$$

Es handelt sich hierbei um eine konservative Schätzung. Da das haltende Seilschaftsmitglied nicht statisch ist werden die auftretenden Kräfte überschätzt.

4.4.4 Phase der Beschleunigung des haltenden Seilschaftsmitglieds

Für die Phase der Beschleunigung des haltenden Seilschaftsmitglieds ist eine Fallunterscheidung vorzunehmen:

1.) Reiner Sturz auf einem Hang

Es gilt wieder Abbildung 48. Die Seilverbindung zwischen den Seilschaftsmitgliedern 1 und 2 wird dabei vernachlässigt, da sie unabhängig voneinander fallen. Die Annahme unabhängig voneinander fallender Seilschaftsmitglieder begründet sich darin, dass das zuerst gestürzte Seilschaftsmitglied früher mit dem Bremsen beginnen wird. Das gestürzte Seilschaftsmitglied wird dadurch langsamer als das Haltende, wodurch das Seil schlaff wird. Es wird daher nach dem Umreißen des haltenden Seilschaftsmitglieds keine Kraft mehr über das Seil übertragen.

2.) Spaltensturz

Das Seil bleibt auch nach dem Umreißen des haltenden Seilschaftsmitglieds unter Zug. Kann der maximalen Kraft des Fangstoßes nicht widerstanden werden, so kippt das haltende Seilschaftsmitglied und beschleunigt. Für diese Beschleunigung wird der Gesamtimpuls betrachtet, der durch den Fangstoß auf das haltende Seilschaftsmitglied übertragen wird. Wäre das haltende Seilschaftsmitglied ein starrer Punkt, so hätte die Seilkraft einen Verlauf wie in Kapitel 4.2.5. Das haltende Seilschaftsmitglied bewegt sich jedoch auf die Spalte zu. Der Gesamtimpuls bleibt dabei näherungsweise gleich.

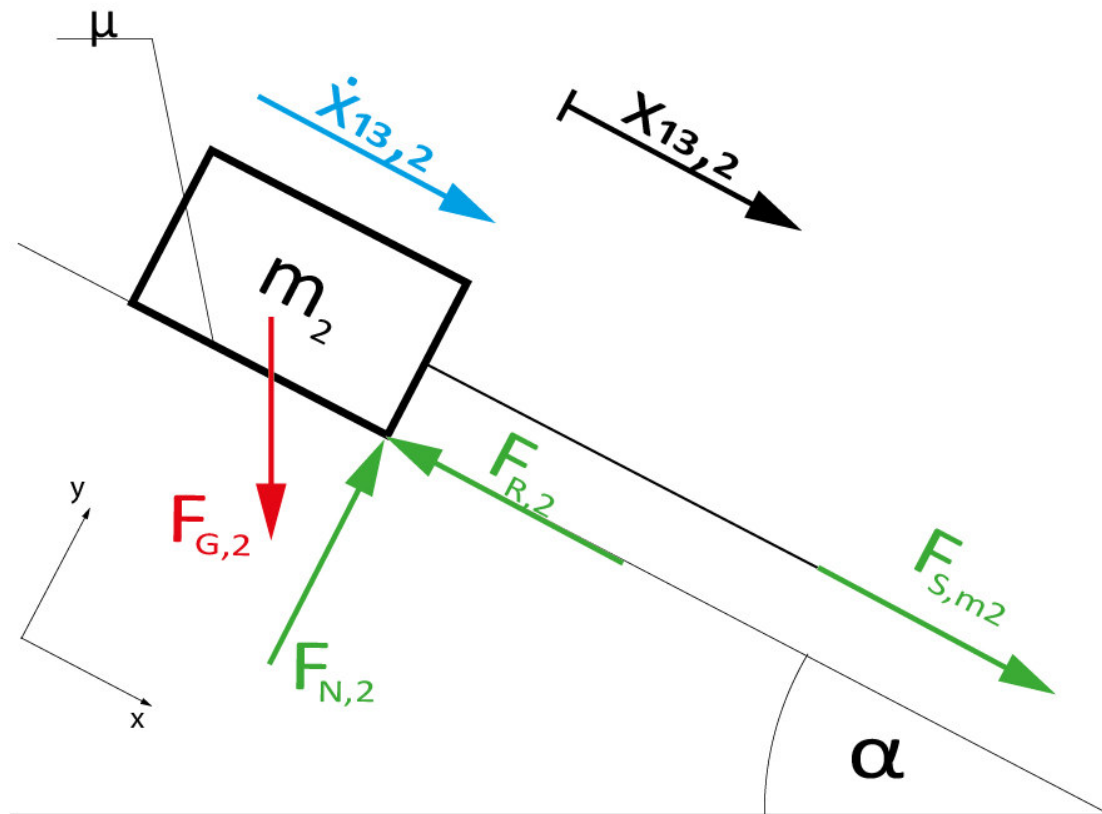


Abbildung 51: Freigemachtes System der Phase der Beschleunigung des haltenden Seilschaftsmitglieds

Für die Seilkraft $F_{S,m2}$ gilt während des Fangstoßes Gleichung (43). Nach dessen Ende gilt $F_{S,m2} = e^{-\mu(\frac{\pi}{2}-\alpha)} m_1 g$. Damit gilt für die Beschleunigung des haltenden Seilschaftsmitglieds während des Fangstoßes

$$m_2 \ddot{x}_{13,2} = m_2 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) + e^{-\mu(\frac{\pi}{2}-\alpha)} (c x_{13,1} + k \dot{x}_{13,1}) \quad (45)$$

und nach dem Fangstoß

$$m_2 \ddot{x}_{13,2} = m_2 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) + e^{-\mu(\frac{\pi}{2}-\alpha)} m_1 g \quad (46)$$

Das weitere Federn des Dynamikseils im Fall eines gehaltenen Sturzes – wie bei Popall (Popall, 2014) beschrieben – wird im Rahmen dieses Modells vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass nur der erste Fangstoß kritisch ist.

Bei zweimaliger Integration bis zum Ende der Reaktionszeit ergibt sich der zurückgelegte Reaktionsweg zu

$$x_{13} = \frac{1}{m_2} \left(\iint_0^{t_{\text{Reaktion}}} (m_2 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)) dt \right. \quad (47)$$

$$\left. + \iint_0^{t_{\text{Fang}}} e^{-\mu(\frac{\pi}{2}-\alpha)} (c x_{13,1} + k \dot{x}_{13,1}) dt + \iint_{t_{\text{Fang}}}^{t_{\text{Reaktion}}} (e^{-\mu(\frac{\pi}{2}-\alpha)} m_1 g) dt \right)$$

t_{Fang} bezeichnet dabei den Zeitpunkt, an dem der Fangstoß endet. x_{13} stellt die innerhalb der Reaktionszeit zurückgelegte Distanz und damit die Ausgangsgröße dieser Phase dar.

4.4.5 Phase der Bremsung

In der Phase der Bremsung wird nach Ablauf der individuellen Reaktionszeit durch die Seilschaftsmitglieder aktiv gebremst. Diese Bremsung erfolgt in der in Kapitel 2.3 dargestellten Weise. Da keine Daten zum Einfluss der Bremsung auf die Verzögerung vorliegen wird für diese Arbeit folgendes angenommen:

Der Reibwert durch die Bremsung muss groß genug sein, um für den Fall eines sich in korrekter Bremsposition auf den Gletscher legenden Seilschaftsmitglieds haften sicher zu stellen. Nach persönlicher Erfahrung ist das für festen Schnee ($\mu = 0.3$) bis etwa 50° möglich, bei Blankeis ($\mu = 0.03$) bis etwa 30° . Damit ergeben sich durch die aktive Bremsung Reibwert von etwa $\mu_B = 1.2$ für festen Schnee (um den Faktor 4 höher) und $\mu_B = 0.57$ für Eis (um den Faktor 9 höher). Aufgrund fehlender Daten wird ein linearer Zusammenhang zwischen diesen Datenpunkten angenommen. Dieser lässt sich beschreiben durch

$$\mu_B = \frac{7}{3}\mu + \frac{1}{2} \quad (48)$$

Damit ergeben sich für die aktive Bremsung die in Tabelle 27 angegebenen Werte.

Untergrund	Reibwert μ ohne Bremsung	Reibwert μ_B mit Bremsung
Eis	0.03	0.57
Firn	0.1	0.73
Harter Schnee	0.2	0.97
Weicher Schnee	0.3	1.20

Tabelle 27: Reibwerte bei aktiver Bremsung

Die Werte wurden dabei auf zwei Nachkommastellen gerundet. Da es sich um Schätzwerte auf Basis der persönlichen Erfahrung handeln wären die Werte im Weiteren zu überprüfen und zu präzisieren. Diese Phase wird bei reinem Sturz für das stürzende Seilschaftsmitglied und bei Spaltensturz für das haltende Seilschaftsmitglied jeweils nach Ablauf der Reaktionszeit betrachtet.

5 Simulation

Es werden im Folgenden mehrere Sturzscenarien behandelt, die auf Gletschern auftreten können. Für alle Simulationen wurde Matlab R2018b verwendet.

Die im Rahmen dieser Simulation untersuchten Massen liegen bei 50 kg, 63.5 kg, 81 kg und 110 kg. 50 kg entspricht dem abgerundeten P5 Gewicht (50.6 kg) der in Österreich lebenden Frauen, 63.5 kg dem P50 Gewicht der in Österreich lebenden Frauen, 81 kg dem P50 Gewicht der in Österreich lebenden Männer und 110 kg dem aufgerundeten P95 Gewicht (108.8 kg) der in Österreich lebenden Männer. (Österreichischer Ernährungsbericht 2017, 2017, S. 93ff) Als Zusatzgewicht durch die Ausrüstung werden 8kg angenommen. Dabei handelt es sich um einen Schätzwert auf Basis von selbst abgewogener Ausrüstung inklusive Kleidung.

Die untersuchten Steigungswinkel liegen zwischen 0° und 60°. Auch wenn 60° außerhalb des vom Österreichischen Alpenverein empfohlenen Bereichs des Gehens in einer Seilschaft liegt, so werden doch immer wieder angeseilte Seilschaften in diesem Steigungsbereich angetroffen. Dieser Steigungsbereich wird daher der Vollständigkeit halber mit einbezogen.

Als Gleitreibungskoeffizienten werden

- $\mu = 0.03$ (Eis),
- $\mu = 0.1$ (weicher Firn),
- $\mu = 0.2$ (weicher Schnee mit glatter Kleidung) und
- $\mu = 0.3$ (weicher Schnee mit rauer Kleidung)

untersucht. Diese Werte entsprechen, mit Ausnahme von $\mu = 0.1$, den von Schubert bekannten Werten. Der Wert von $\mu = 0.1$ für weichen Firn ist eine Schätzung und basiert auf der Annahme, dass die Reibung für weichen Firn zwischen der Reibung von hartem Firn/Eis und der Reibung von weichem Schnee liegt.

Um die Seildisziplin und unterschiedliche Seilschaftsgrößen simulieren zu können werden für den normalen Sturz auf einem Hang Sturzdistanzen von

- $s = 0.5$ m (hohe Seildisziplin in einer Seilschaft mit 4 oder mehr Mitgliedern),
- $s = 8$ m (sehr schlechte Seildisziplin in einer Seilschaft mit weniger als 4 Mitgliedern, kann auch entstehen, wenn Seilschaftsmitglieder an einem Ort unmittelbar beieinanderstehen)

untersucht. Für den Spaltensturz werden Sturzdistanzen von

- $s = 1.5$ m (mittelmäßige Seildisziplin in einer Seilschaft mit 4 oder mehr Mitgliedern, oder gute Seildisziplin in einer Seilschaft mit 2 oder 3 Mitgliedern),
- $s = 5$ m (schlechte Seildisziplin in einer Seilschaft mit 2 oder 3 Mitgliedern).

untersucht.

Als haltende Seilschaftsmitglieder wird die P5-Frau als leichter Extremwert und der P50-Mann als günstigerer Durchschnitt herangezogen.

Bei den Sturzdistanzen handelt es sich um Schätzungen, die einen bestimmten Bereich repräsentieren sollen. Bei der Sturzdistanz ist zu beachten, dass diese die Distanz angibt, die ein stürzendes Seilschaftsmitglied hangabwärts zwischen dem Aufschlagen auf dem Gletscher und dem Spannen des Seils zurücklegt. Pendelstürze können daher eine andere Charakteristik besitzen als ein gerader Sturz. Weiters können Faktoren wie die Kipprichtung des stürzenden Seilschaftsmitglieds Einfluss auf die Sturzdistanz haben. Für die weiteren Simulationen werden diese Fälle nicht unterschieden.

5.1 Sturz auf einem Hang, ohne aktive Bremsung, ohne Spaltensturz

Wird davon ausgegangen, dass das fallende Seilschaftsmitglied – aus welchen Gründen auch immer – nicht in der Lage ist den Sturz zu bremsen, so setzt keine Erhöhung des Reibwerts ein.

Für die Geschwindigkeit am Ende der Phase der Beschleunigung folgt, unabhängig von der Masse des stürzenden Seilschaftsmitglieds, in Abhängigkeit von Hangneigung, Sturzdistanz und Reibkoeffizienten der Zusammenhang gemäß Abbildung 52.

Abbildung 53 zeigt einen Vergleich der theoretischen maximalen Kraft des Fangstoßes für eine Sturzlänge von $s = 5$ m für die vier getesteten Seile. Es wurde hier ausnahmsweise eine Sturzlänge von $s = 5$ m verwendet, da diese zwischen den gewählten $s = 0.5$ m und $s = 8$ m liegt und nur ein Vergleichsfall simuliert wurde. Die maximale Kraft des Fangstoßes wird im realen Fall nicht erreicht, da das haltende Seilschaftsmitglied keinen statischen Punkt darstellt und vor Erreichen des Maximums kippen würde. Es wurde dabei als Extremwerte die theoretische maximale Kraft des Fangstoßes für die P5-Frau und den P95-Mann simuliert. Wie sich zeigt sind die Unterschiede zwischen den Seilen vernachlässigbar. Es wird daher als Seil das Mammut Serenity Dry verwendet, da dieses und das Petzl die höchsten Maximalkräfte verursachen.

Die maximale Kraft des Fangstoßes am haltenden Seilschaftsmitglied ist Abbildung 54 und Abbildung 55 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass die auftretenden Kräfte die haltbaren Kräfte im Regelfall weit übersteigen. Nur bei einem Sturz über $s = 0.5$ m ist im Grenzfall ein Halten des Sturzes theoretisch möglich.

Zu beachten ist, dass alle gehaltenen Stürze nur knapp oberhalb der Steigung liegen, bei der das stürzende Seilschaftsmitglied schon aufgrund der Eigenreibung zum Stillstand kommt.

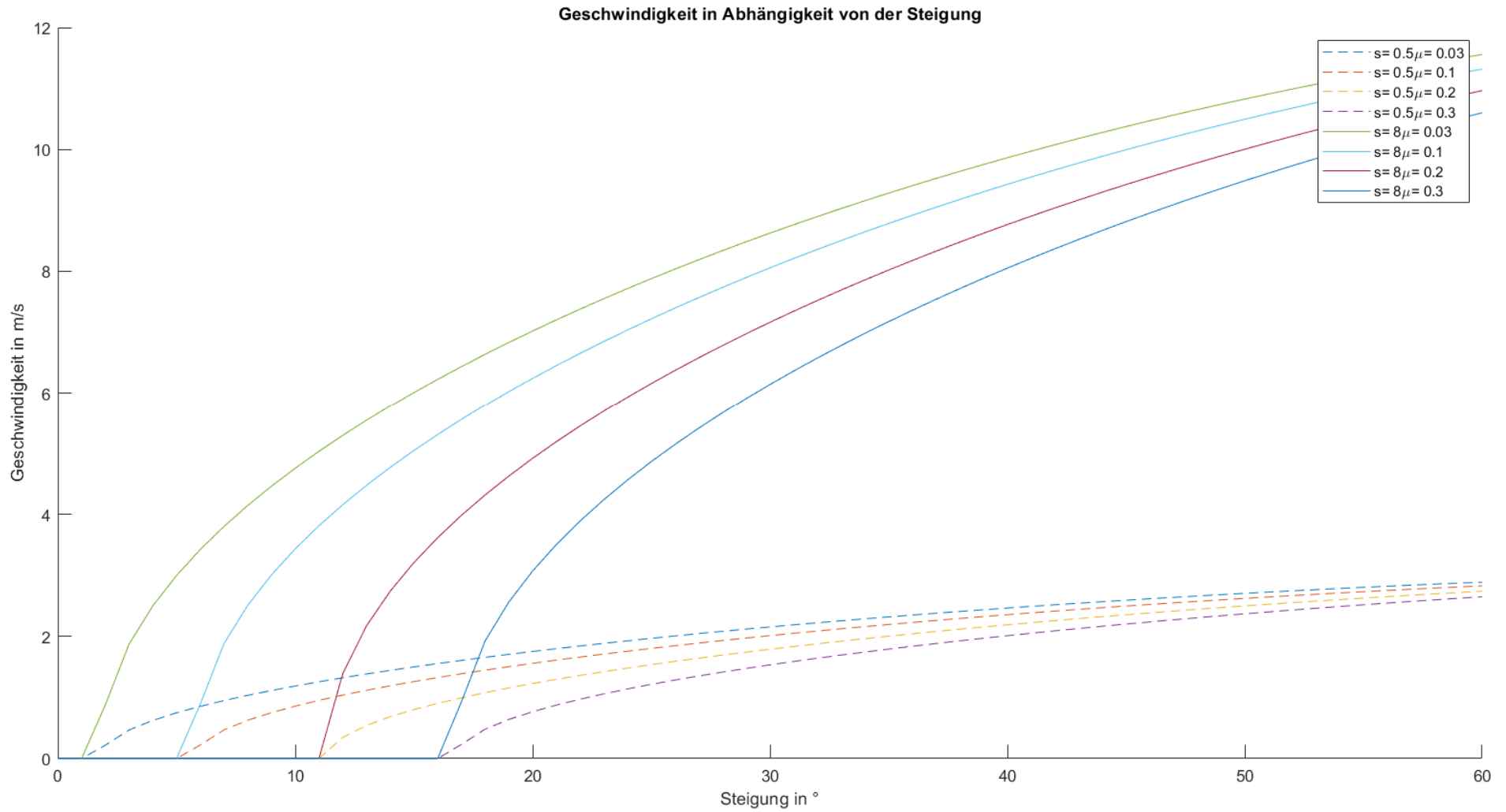
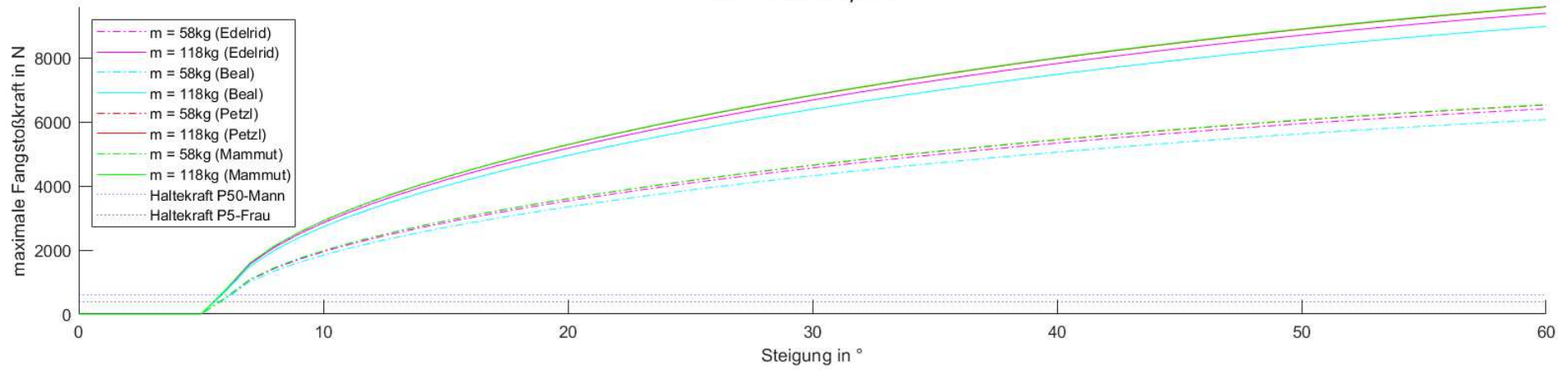


Abbildung 52: Fallgeschwindigkeit für den Sturz ohne aktive Bremsung

**Auftretende maximale Fangstoßkraft in Abhängigkeit von Masse und Steigung
 für $s = 5\text{ m}$ und $\mu = 0.1$**



**Auftretende maximale Fangstoßkraft in Abhängigkeit von Masse und Steigung
 für $s = 5\text{ m}$ und $\mu = 0.3$**

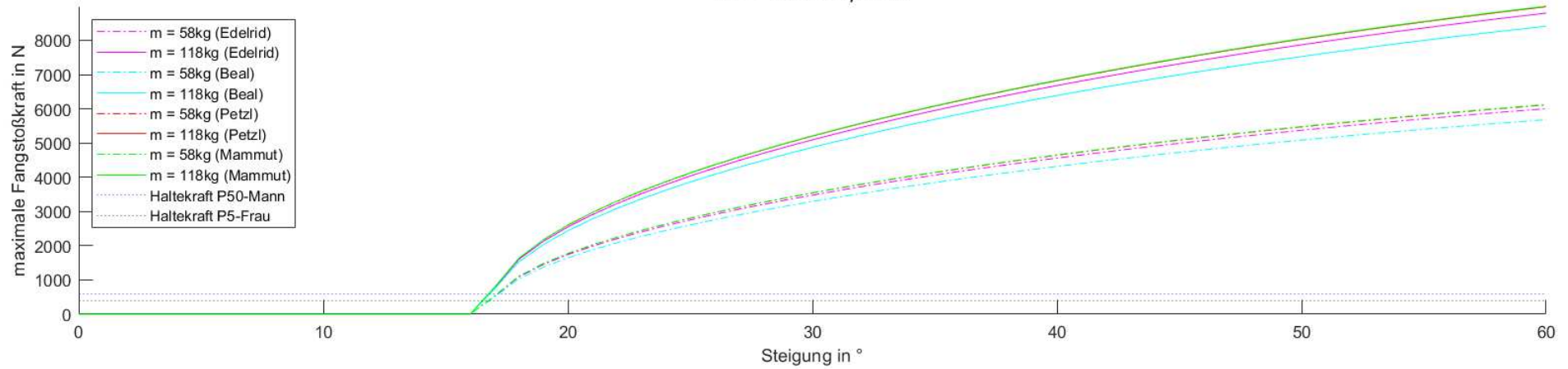


Abbildung 53: Vergleich der theoretischen maximalen Fangstoßkraft für die vier getesteten Seile für den Sturz ohne aktive Bremsung, $s = 5\text{ m}$

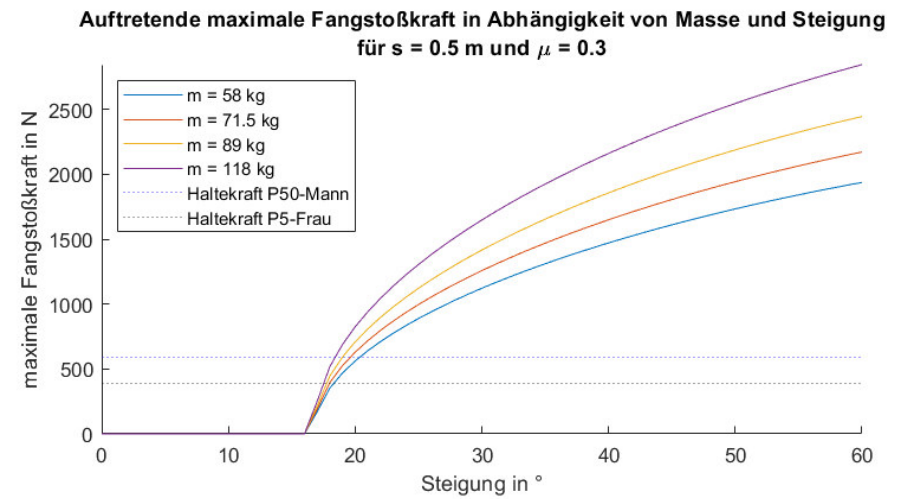
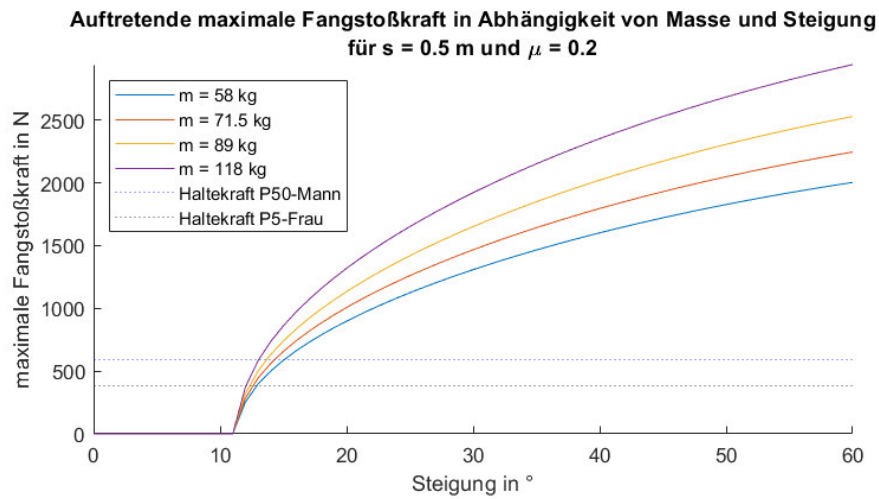
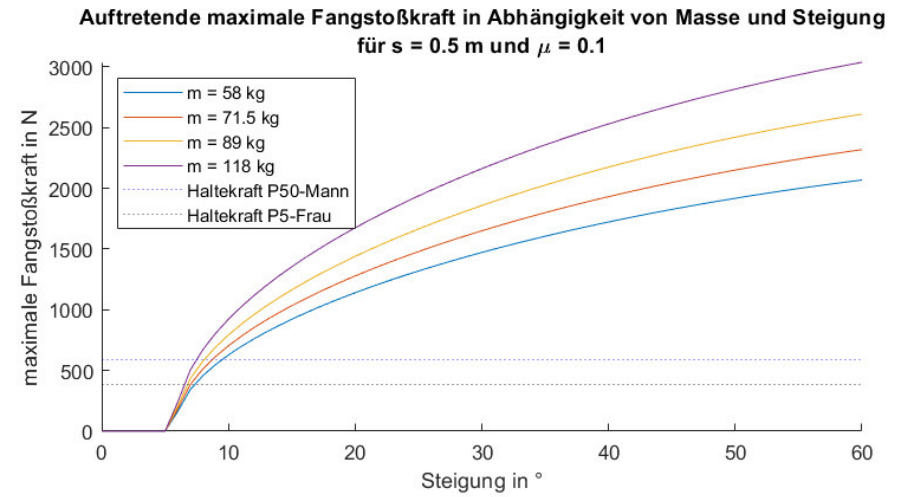
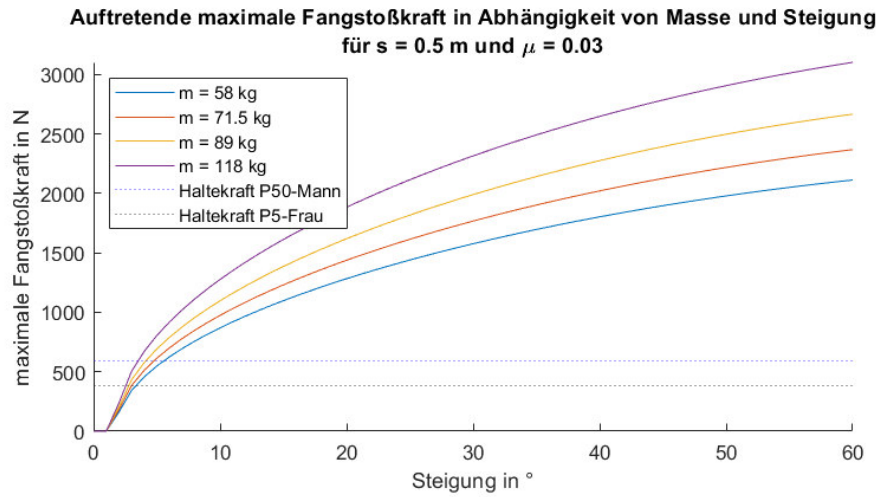


Abbildung 54: Theoretische maximale Fangstoßkraft für den Sturz ohne aktive Bremsung, Falllänge $s = 0.5 \text{ m}$

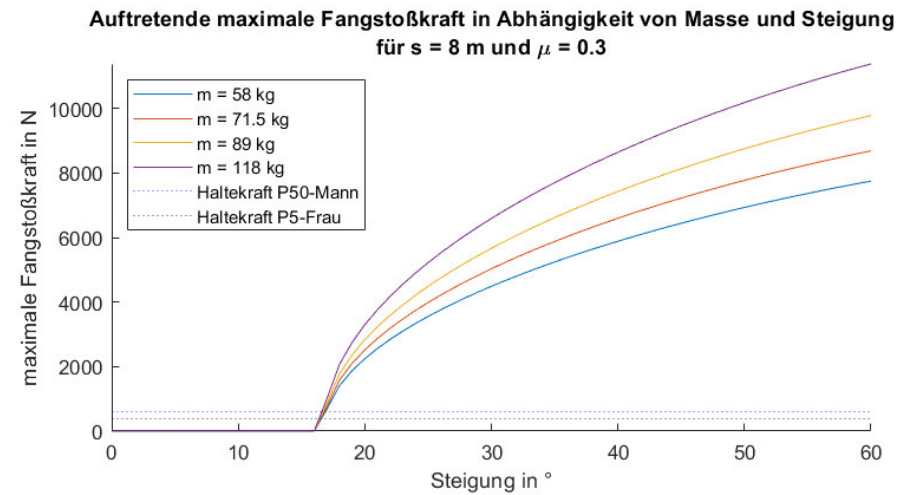
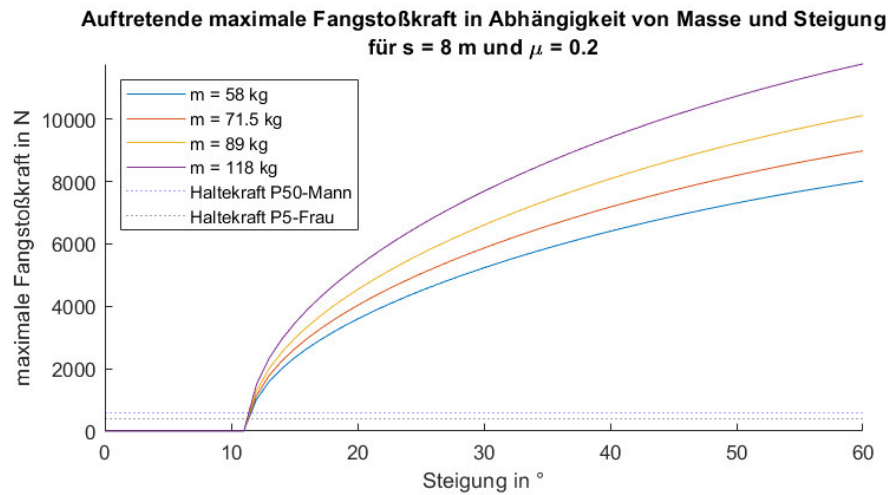
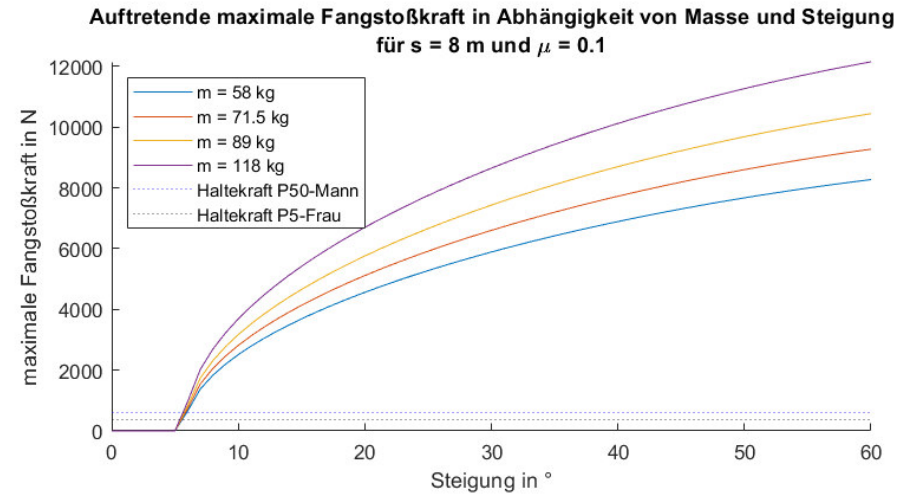
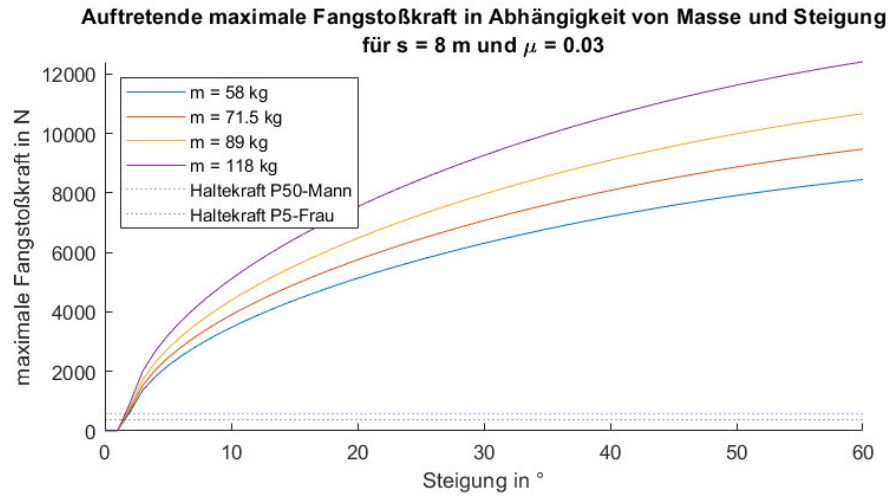


Abbildung 55: Theoretische maximale Fangstoßkraft für den Sturz ohne aktive Bremsung, Falllänge $s = 8\text{ m}$

5.2 Sturz auf einem Hang, mit aktiver Bremsung, ohne Spaltensturz

Der Fall eines gebremsten Sturzes tritt ein, wenn die Dauer des Sturzes die Reaktionszeit überschreitet. In diesem Fall ist das stürzende Seilschaftsmitglied in der Lage durch aktives Bremsen den eigenen Reibwert zu erhöhen.

Die Geschwindigkeit am Ende der Phase der Beschleunigung ist wieder unabhängig von der Masse des stürzenden Seilschaftsmitglieds und ist in Abbildung 56 dargestellt. Folgendes fällt dabei auf

1. Es tritt ein Knick in Höhe von etwa $v = 8 \text{ m/s}$ auf. Der Onset der Geschwindigkeit ist zu höheren Hangneigungen verschoben, was sich aus dem Umstand ergibt, dass es dem gestürzten Seilschaftsmitglied durch die Erhöhung des Reibwertes möglich war, wieder zum Stillstand zu kommen. Reicht der erhöhte Reibwert dafür nicht aus, so ist zumindest eine Reduktion der Geschwindigkeit bei Eintreten der Straffung des Seiles möglich. Dies allerdings nur so lange, als die Sturzdistanz nicht schon während der Reaktionszeit aufgebraucht wurde. Diese Grenze ist als der Knick der Kurve sichtbar.
2. Knicke in den niedrigen Geschwindigkeiten. Diese liegen an einer zu niedrigen Auflösung des Diagramms. Es wurde, um Rechenzeit zu sparen, pro Grad Steigung nur ein Datenpunkt verwendet.

Bei Vergleich von Abbildung 52 mit Abbildung 56 zeigt sich, dass Bremsen bei der gewählten Reaktionszeit nur für niedrige Steigungen merkbare Auswirkungen hat.

Die theoretische maximale Fangstoßkraft ist Abbildung 57 und Abbildung 58 zu entnehmen. Dabei treten in den Daten dieselben oben beschriebenen Effekte auf.

Es zeigt sich, dass ein Sturz durch die Bremsung nur unwesentlich haltbarer wird. Wird der Sturz nicht vom gestürzten Seilschaftsmitglied selbst gehalten, so ist ein Absturz der Seilschaft wahrscheinlich.

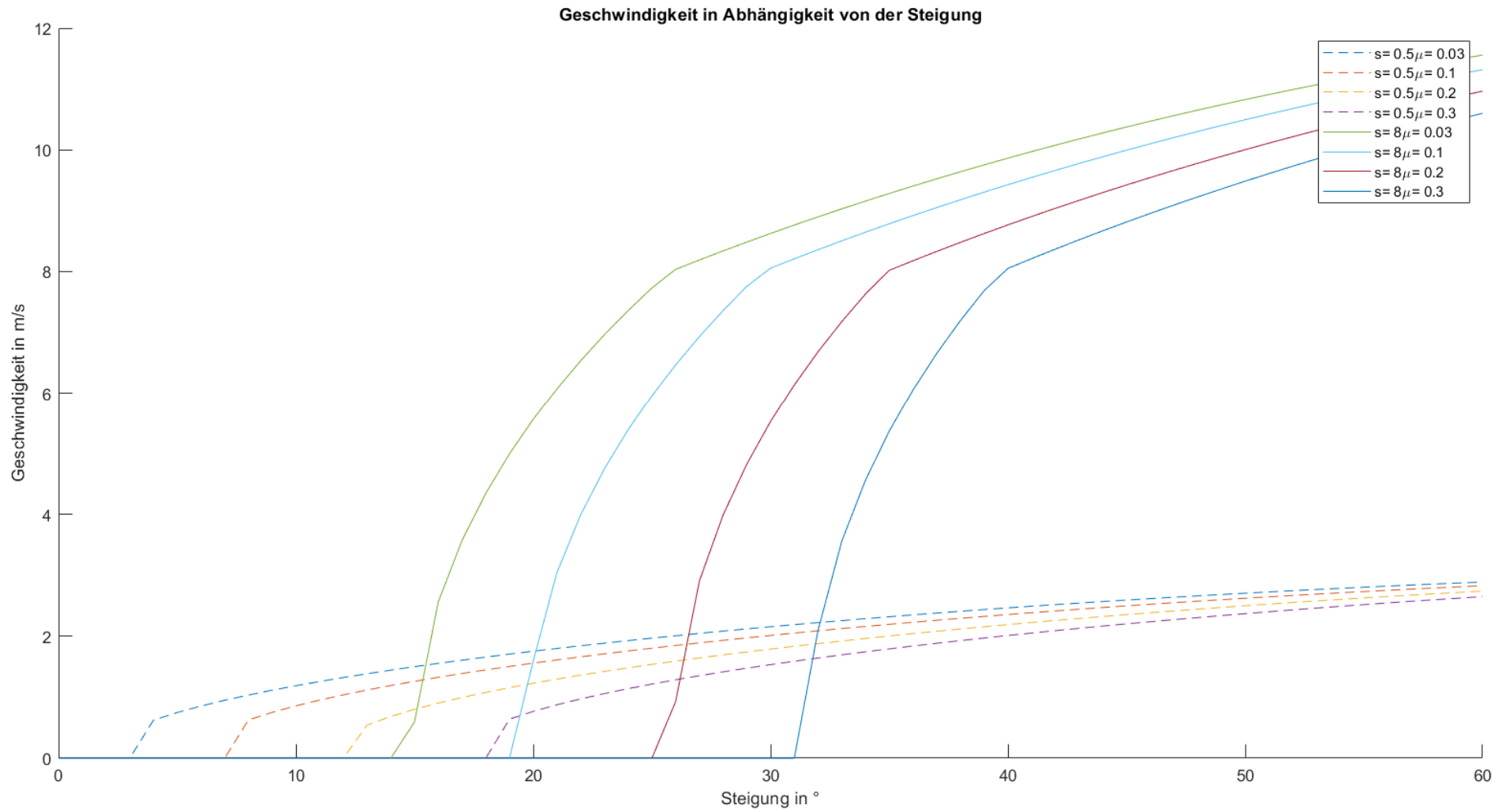


Abbildung 56: Fallgeschwindigkeit für den Sturz mit aktiver Bremsung ab $t = 2$ s

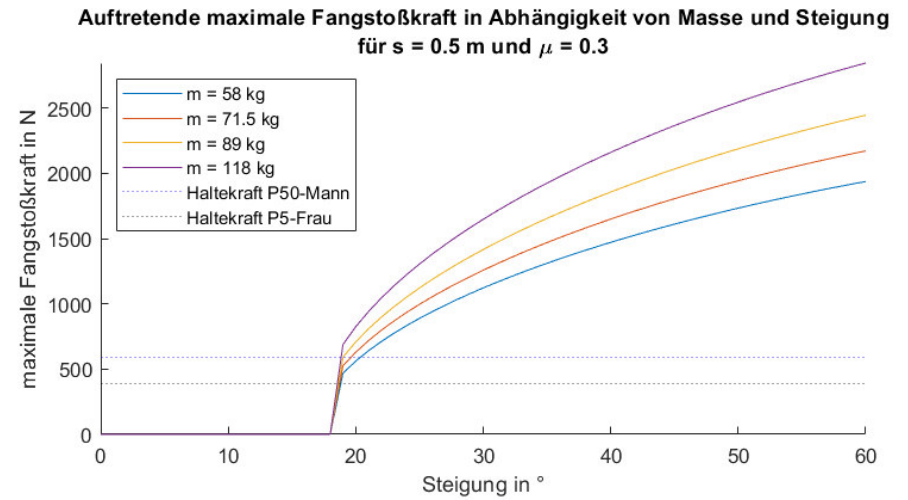
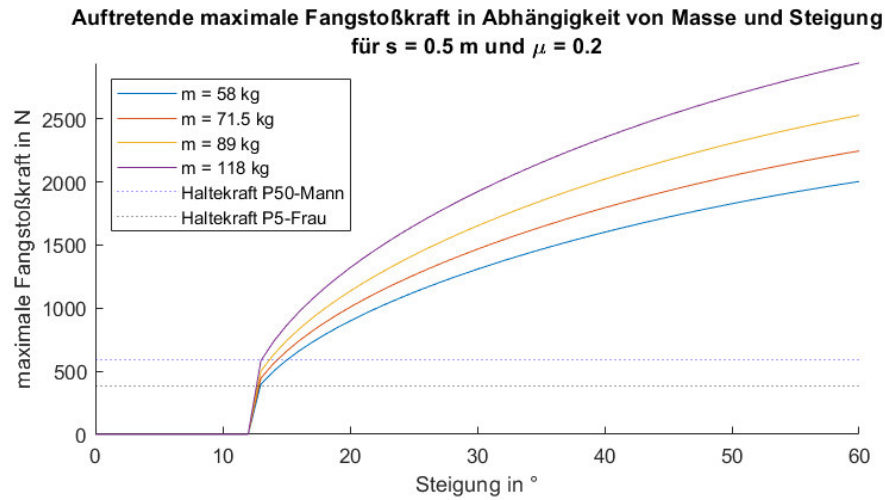
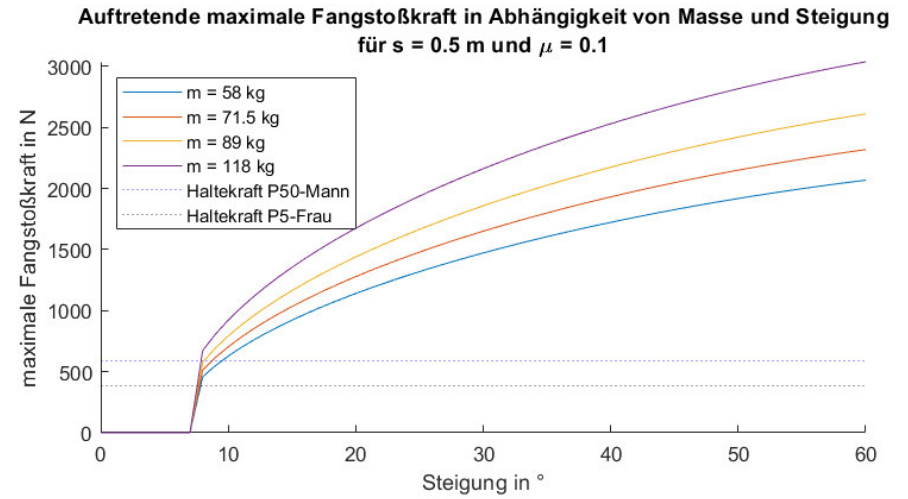
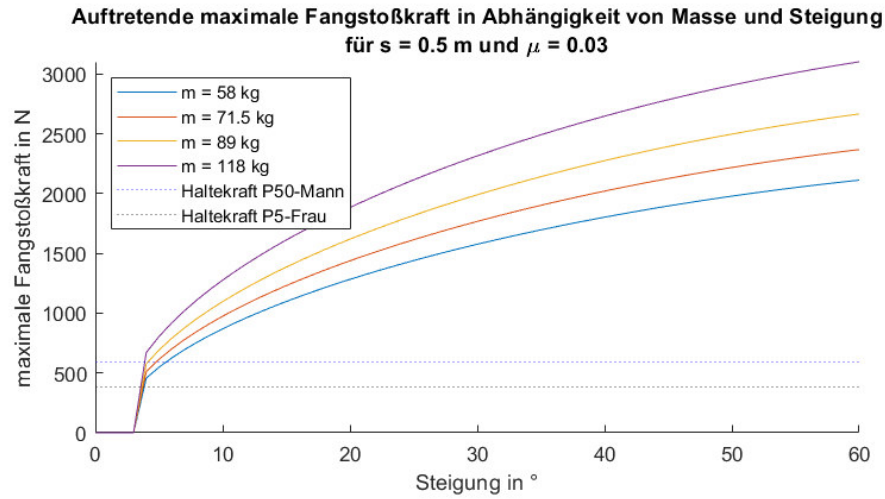


Abbildung 57: Theoretische maximale Fangstoßkraft für den Sturz mit aktiver Bremsung ab $t = 2$ s, Falllänge $s = 0.5$ m

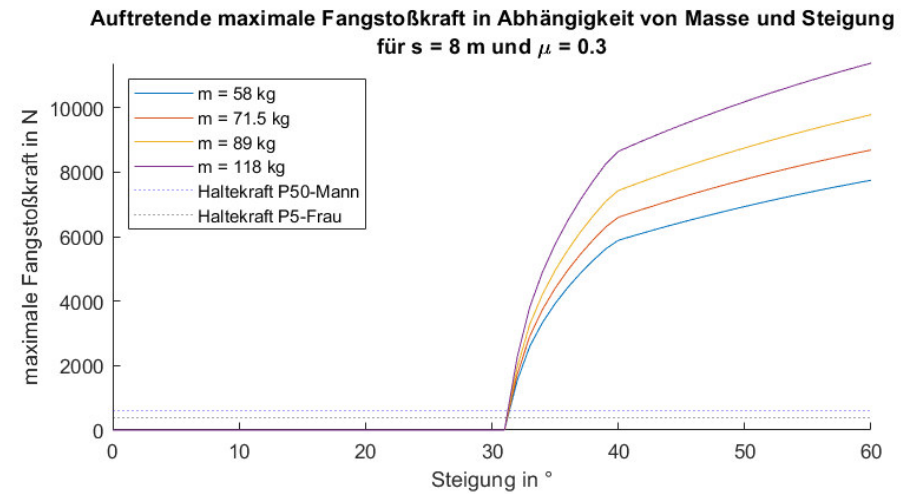
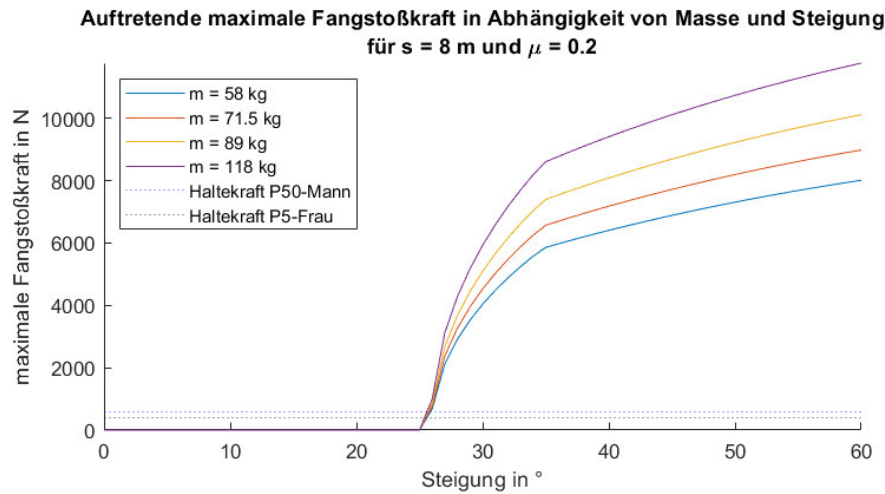
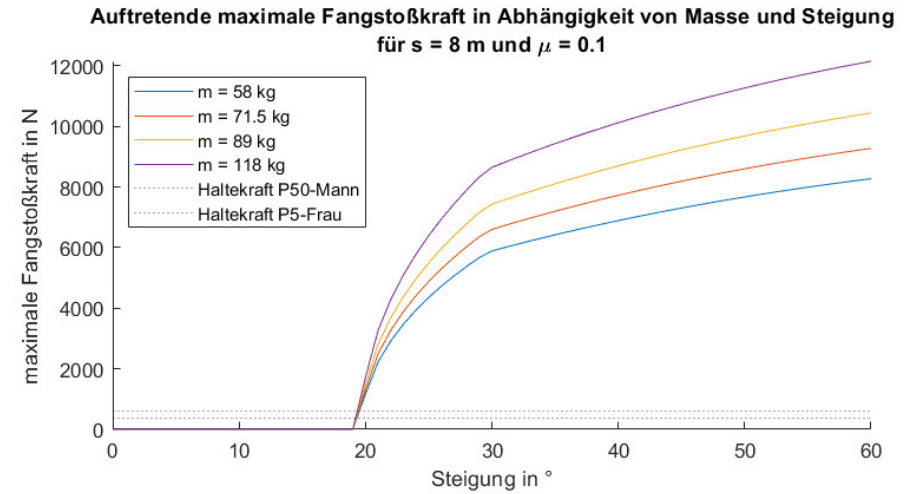
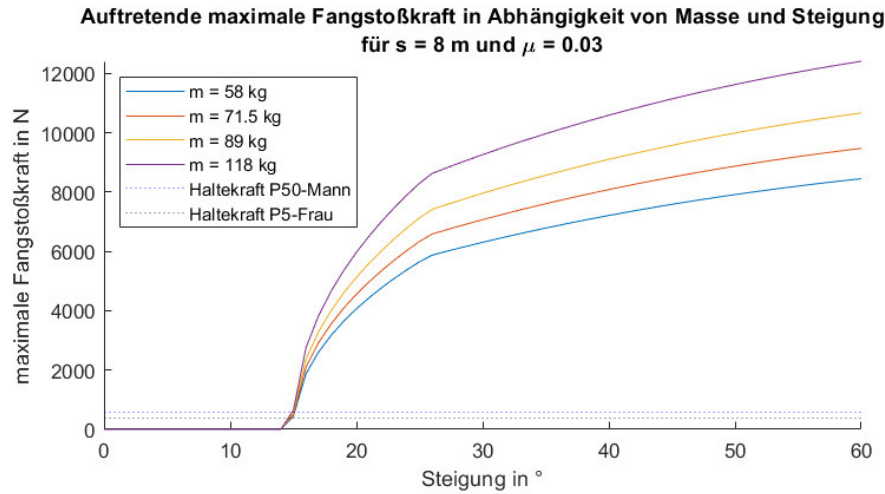


Abbildung 58: Theoretische maximale Fangstoßkraft für den Sturz mit aktiver Bremsung ab $t = 2\text{ s}$, Falllänge $s = 8\text{ m}$

5.3 Sturz auf einem Hang, mit Spaltensturz

Bei einem Sturz in eine Gletscherspalte erfolgt zuerst eine kurze Phase des freien Falls. Erst zu Beginn des Fangstoßes, wenn das Seil sich in die Spaltenlippe einschneidet, beginnt die Reibung zu wirken.

Abbildung 59 und Abbildung 60 zeigen die simulierten maximalen Kräfte des Fangstoßes für einen Spaltensturz ohne Bremsknoten. Bei Vergleich mit den Versuchen von Semmel (siehe Tabelle 11, Kapitel 3.4.3) zeigt sich Folgendes:

Im ungünstigeren Fall war eine Firnauflage vorhanden, diese jedoch dünn. Damit wird als Grundgleitreibungskoeffizient $\mu = 0.2$ angenommen. Diese Annahme erscheint plausibel, da Seile zumeist einen recht rauen Mantel besitzen. Aufgrund der Bilder, die von Semmel veröffentlicht wurden, wird eine Fallhöhe von 1.5 m und eine Steigung von 20° angenommen. (Semmel, 2017) Auf Basis dieser Annahmen werden im Rahmen dieser Simulation die Kräfte um den Faktor 3.5 überschätzt. Damit ergibt sich, dass die einfache Annahme einer Umlenkung für dieses Modell unzureichend ist. Die in Kapitel 3.3.5 getroffenen Vereinfachungen gehen daher zu weit.

Da bereits dieses Simulationsergebnis unplausibel ist, wird auf die Darstellung weiterer Simulationsergebnisse verzichtet.

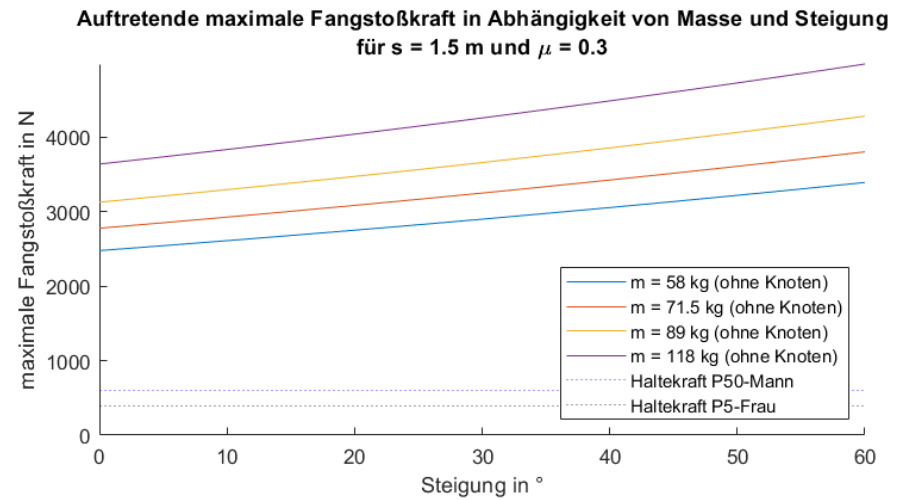
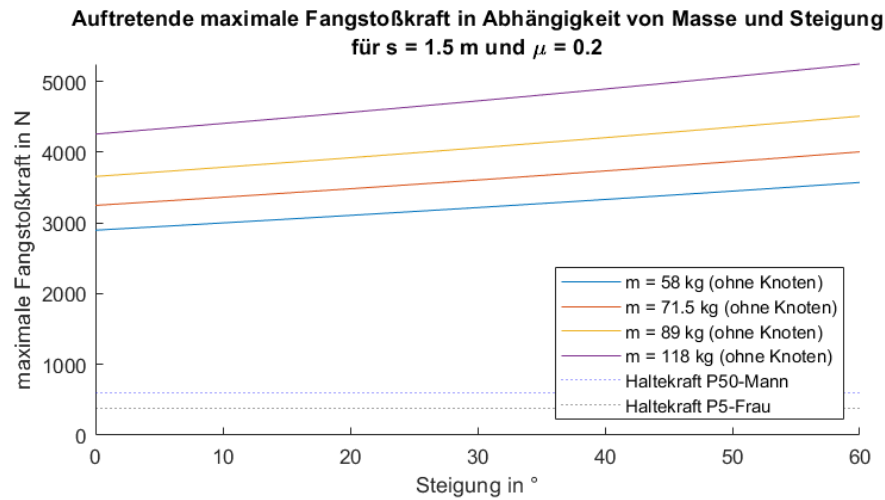
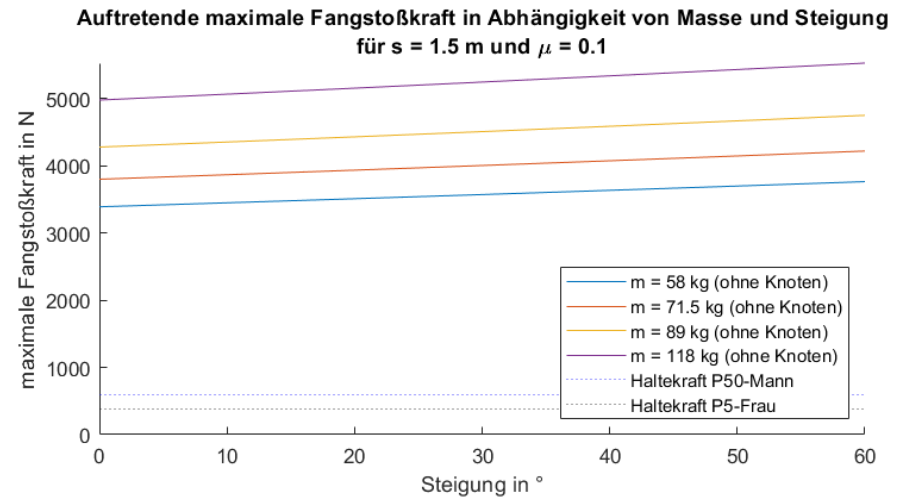
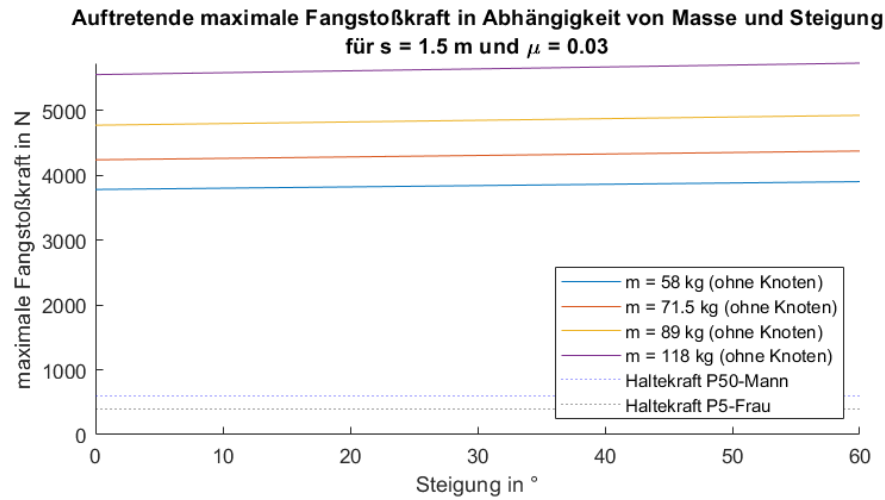


Abbildung 59: Theoretische maximale Fangstoßkraft für einen Spaltensturz mit einer Falllänge von $s = 1.5 \text{ m}$, talseitiger Sturzzug

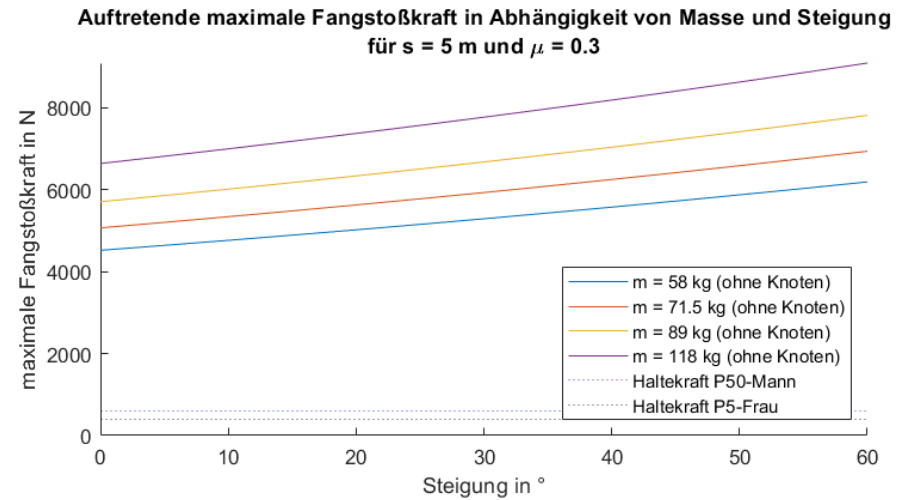
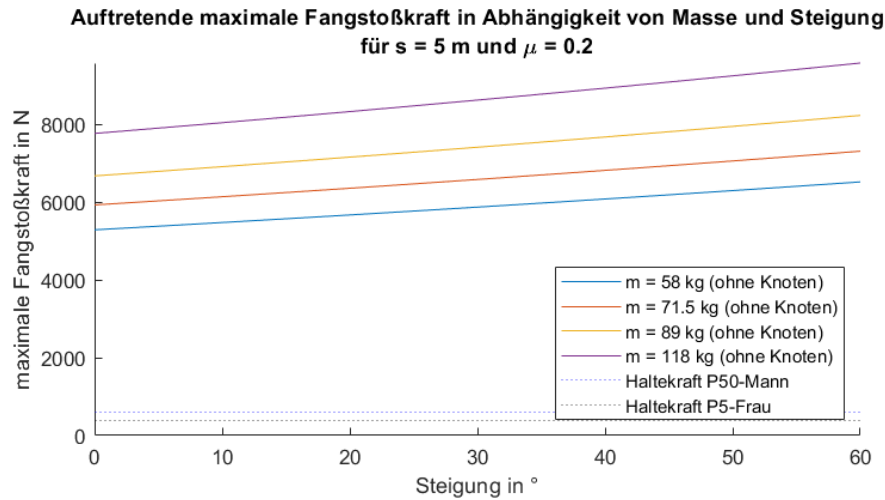
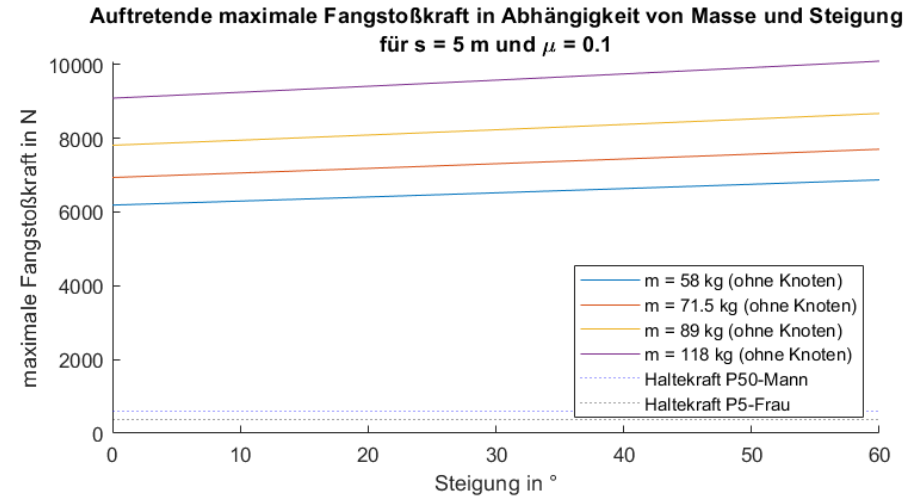
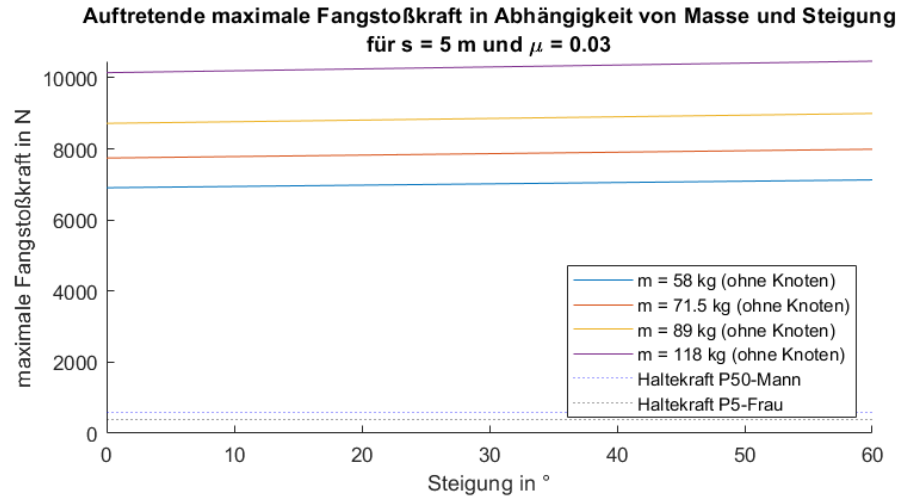


Abbildung 60: Theoretische maximale Fangstoßkraft für einen Spaltensturz mit einer Falllänge von $s = 5\text{ m}$, talseitiger Sturzzug

6 Diskussion

Zu Beginn der Diskussion sei festgehalten, dass die angenommenen Bremswerte und die Bremsverstärkungen durch aktive Bremsung auf wenigen Versuchen und persönlicher Erfahrung basieren. Weiters wurden nur vier Seile untersucht, die alle einem bestimmten Typ von Seilen – nämlich dreifach zertifizierten High-End-Seilen – zuzuordnen sind. Die Untersuchungen erstrecken sich insbesondere nicht auf statische Bergseile, die, wie die Versuche von Semmel zeigen (siehe Kapitel 3.3.5) eine wesentlich höhere maximale Kraft des Fangstoßes verursachen. Eine weitere Einschränkung stellt der Umstand dar, dass die Seilparameter immer für den jeweils ersten Fangstoß eines neuen Seils bestimmt wurden. Wie die Seilversuche gezeigt haben, sind diese Seilparameter aber starken Änderungen durch den ersten Fangstoß unterworfen. Die Ergebnisse sind daher nur auf relativ neue und wenig gebrauchte Seile anwendbar.

Bei Vergleich der Auswirkungen zur Verwendung unterschiedlicher Seile zeigt sich, dass die Unterschiede, für die untersuchten Seile, vernachlässigbar sind (siehe Abbildung 53). Bezogen auf die Gletscherseilschaft lässt sich damit sagen, dass die Dämpfungs- und Dehnungseigenschaften nicht den Ausschlag bei der Seilwahl geben sollten, da diese in der Praxis vernachlässigbar sind. Einen viel größeren Einfluss haben dort der Seildurchmesser (Schnittfestigkeit) und die Haptik (Handhabbarkeit). Der Gewichtsunterschied zwischen dem leichtesten Seil (Beal Opera Unicore) und dem schwersten untersuchten Seil (Petzl Volta Guide) beträgt lediglich $\rho = 4 \text{ g/m}$ (siehe Tabelle 13). Bei einem 50 m Seil, wie es in 6er Seilschaften verwendet wird, beträgt der Unterschied damit lediglich 200 g. Eine Differenz die, wie sich durch die Messungen gezeigt hat, schon dadurch bedeutungslos wird, dass die Seile häufig nicht genau die Länge aufweisen, die auf der Packung angegeben ist. So ist ein Beal Opera Unicore bereits ab einer Länge von 33 m schwerer als ein Petzl Volta Guide mit einer Länge von 30 m.

Bezogen auf die Seile haben die Versuche gezeigt, dass die Ergebnisse der dynamischen Normversuche nur sehr beschränkt Rückschlüsse auf die Seileigenschaften zulassen.

Interessant ist ein Vergleich von Tabelle 8 mit Abbildung 53, Abbildung 54, Abbildung 55, Abbildung 57 und Abbildung 58. Die Versuche von Sulser lieferten offenbar

niedrigere Maximalkräfte als das Modell. Es wird vermutet, dass das mehrere Gründe hat:

1. Es wurde von Sulser ein einfach zertifiziertes Einfachseil verwendet (Sulser, 2012). Wird Tabelle 11 betrachtet, so ist die Vermutung naheliegend, dass dieses ein weicheres Fangstoßverhalten besaß.
2. Sulser verwendet zwar einen Fixpunkt für seine Versuche, das untersuchte Seil wurde aber nicht direkt in den Fixpunkt eingebunden, sondern es wurde ein Sicherungsgerät verwendet (HMS oder Plate) (Sulser, 2012). Dieses Setup ist praxisnah, es ist aber der Schluss naheliegend, dass dadurch Energie dissipiert wurde.
3. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Teilnehmer der Versuche bei Sulser (Sulser, 2012) mehr oder weniger stark gebremst haben und das schon vor Ablauf der hier angenommenen Reaktionszeit.

Wird die Lehrmeinung des Alpenvereins herangezogen, so kommt das angeseilte Gehen nicht für Blankeis und harten Firn in Frage. Das Modell bestätigt diese Lehrmeinung in vollem Umfang (siehe Abbildung 54, Abbildung 55, Abbildung 57 und Abbildung 58). Weiters bestätigen sich die Beobachtungen von Schubert (Schubert, 2016), dass ein Anseilen bei einem Sturz auf einem Hang nahezu keinen Sicherheitsgewinn bringt. Es bestätigt sich damit auch die Alpenvereinsmeinung, dass bei Fehlen einer Spaltensturzgefahr auf das angeseilte Gehen in einer Seilschaft verzichtet werden sollte. In der Praxis muss immer eine Abschätzung getroffen werden, ob das steigende Risiko mitgerissen zu werden von dem Sicherheitsgewinn einen Spaltensturz zu verhindern aufgewogen wird. Dafür lassen sich keine allgemeinen Regeln aufstellen. Die Beurteilung der Lage vor Ort durch die Seilschaft lässt sich hier nicht ersetzen.

Aufgrund der geringen Anzahl an getesteten Seilen und der teilweisen Schätzung der Reibungsparameter wäre es nötig weitere Versuche durchzuführen. Dadurch ließen sich die Modellparameter und in weiterer Folge die Ergebnisse präzisieren.

Für den Spaltensturz lassen sich aus dem entwickelten Modell keine Rückschlüsse auf die Praxis ziehen. Hier wäre es nötig ein Modell zu entwickeln, dass einerseits

den geometrischen Effekt durch das Durchrutschen des Seils am Spaltenrand, andererseits die Kompression des Schnees und die damit verbundene Änderung des Radius berücksichtigt. Dafür wäre es wichtig gezielt Versuche durchzuführen.

Ein weiteres Problem ist die Berücksichtigung von Bremsknoten. Diese fressen sich in die Spaltenlippe und verkürzen dadurch die Sturzdistanz des in die Spalte stürzenden Seilschaftsmitglieds. Bei einer bestimmten, vom Schnee abhängigen, Kraft brechen die Bremsknoten aus. Dadurch wird einerseits mechanische Energie dissipiert, andererseits schneidet sich das Seil vermutlich bei ausreichender Schneelage tiefer in die Spaltenlippe. Das Seil kann sich anschließend beim nächsten Bremsknoten wieder festfressen. Dafür, dass die Abläufe bei Bremsknoten über einen einfachen Reibungseffekt hinausgehen spricht unter anderem, dass gemäß Tabelle 11 unabhängig vom Seiltyp ähnliche Kräfte auftreten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zwar die Simulationen für Spaltenstürze keine plausiblen Ergebnisse lieferten, Abbildung 54, Abbildung 55, Abbildung 57 und Abbildung 58 aber einen deutlichen Einfluss des Gewichts und des Untergrundes auf die maximale Kraft des Fangstoßes zeigen. Damit lässt sich zusammenfassen

1. Auf Eis und hartem Firn sollte in jedem Fall auf ein Seil verzichtet werden.
2. Sofern die Absturzgefahr größer als die Spaltensturzgefahr ist, sollte auf ein Seil verzichtet werden.
3. Bei Seilschaften mit großem Gewichtsunterschied zwischen den Mitgliedern sollte das leichtere Seilschaftsmitglied immer talseitig gehen, da ein bergseitiger Sturzzug für das leichtere Seilschaftsmitglied eher zu halten ist. Gleichzeitig ist ein möglicher talseitiger Sturzzug, der durch das leichtere Seilschaftsmitglied ausgelöst wird, für das schwerere Seilschaftsmitglied eher zu halten als umgekehrt.

7 Literaturverzeichnis

- APA. (2017). *diepresse.com*. Abgerufen am 29. Dezember 2017 von https://diepresse.com/home/panorama/oesterreich/5276091/Todessturz-einer-Seilschaft-in-Krimml_Polizei-ermittelt
- Beal. (2019). *Beal Iceline 8.1mm Golden Dry*. Abgerufen am 29. Mai 2019 von https://sport.beal-planet.com/index.php?id_product=1615&controller=product&id_lang=1#/305-diameter-8_1mm/340-technology-unicore/345-treatments-golden_dry/386-half_ropes-oui/337-color-anis/288-length-60m
- Böge, A. (2009). *Technische Mechanik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH.
- Braun-Elwert, G. (2008). Verbunden bis in den Tod. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(2/08), S. 54-61.
- Burg, H., & al., e. (2017). *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*. (H. Burg, & A. Moser, Hrsg.) Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Deutscher Alpenverein. (2019). *Update Bandschlingen und Reepschnüre, Neues aus dem Schlingenschungel*. Abgerufen am 26. August 2019 von https://www.alpenverein.de/chameleon/public/e318ce0e-2562-d028-d728-5284258c85ac/Panorama-5-2014-Sicherheitsforschung-Bandscho%CC%88ingen-Schnu%CC%88re_24264.pdf
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2014). DIN EN 564. *Bergsteigerausrüstung – Reepschnur – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2016). DIN EN 892. *Bergsteigerausrüstung – Dynamische Bergseile – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Edelrid. (2019). *Seilfiabel*. Abgerufen am 26. August 2019 von https://www.edelrid.de/de/sports/wissen/bilder/2018/Seilfiabel_dynamisch_2015_DE_ANSICHT.pdf?m=1534851514
- Ehrenstein, G. W. (2011). *Polymer Werkstoffe*. München: Carl Hanser Verlag.
- Ernst, B. (2017). Dialog. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(101), S. 14-21.

- Fellin, W. (2013). *Einführung in Eis-, Schnee- und Lawinenmechanik*. Innsbruck: Springer Vieweg.
- Fritz, L., Larcher, M., & Mössmer, G. (2016). *Sicher am Berg* (1. Auflage Ausg., Bd. Hochtouren). (Ö. Alpenverein, Hrsg.) Innsbruck: Österreichischer Alpenverein.
- Geiger, S. (2017). *FAZ*. Abgerufen am 29. Dezember 2017 von <http://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/ungluecke/bergsteiger-uli-steck-toedlich-am-mount-everest-verunglueckt-14994367.html>
- Grupp, P. (2008). *Faszination Berg, Die Geschichte des Alpinismus*. Köln: Böhlau Verlag GmbH & Cie.
- Hanavan, E. P. (1964). *A mathematical model of the human body*. Dayton, Ohio: AMRL.
- Hasler, B., & Winkler, K. (2016). Gehen am kurzen Seil ist heikel. Die Alternativen auch. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(#96), S. 56-60.
- Heute. (2019). *Heute*. Abgerufen am 09. September 2019 von <https://www.heute.at/s/bergretter-toben-uber-turnschuh-tourist-am-breithorn-massiv-46090619>
- Hoi, K. (2016). Gehen am kurzen Seil. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(#96), S. 42-49.
- Klose, B. (2008). *Meteorologie, Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- Kuningham, K. (2016). spannende seile (3), Festigkeitsreduzierung durch Knoten. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(03/06).
- Larcher, M., & Zak, H. (2017). *Seiltechnik* (7. überarbeitete Auflage Ausg.). Innsbruck: Österreichischer Alpenverein.
- Lieb, G. K., & Kellerer-Pirklbauer, A. (Februar 2018). *Gletscherbericht des OeAV*. Von https://www.alpenverein.at/portal_wAssets/docs/service/presse/2018/gletscherbericht/Gletscherbericht-im-Mitgliedermagazin-Bergauf-zum-Download-PDF-.pdf abgerufen
- Meussen, B. (1998). *Verformungsverhalten von Schnee unter mehrachsiger Belastung*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- ORF. (2019). *ORF Chronik*. Abgerufen am 09. September 2019 von Viele Kletterer überschätzen sich: <https://ooe.orf.at/stories/3010252/>

- ORTOVOX SPORTARTIKEL GMBH. (2019). *PEAK LIGHT 32*. Abgerufen am 18. November 2019 von <https://www.ortovox.com/de/shop/rucksaecke/high-alpine/peak-light-32/>
- Österreichischer Alpenverein. (9. September 2019). *Mitgliederstatistik*. Von <https://www.alpenverein-austria.at/austria/wir-ueber-uns/vereinsstruktur/statistiken.php> abgerufen
- (2017). *Österreichischer Ernährungsbericht 2017*. Universität Wien, Department für Ernährungswissenschaften. Wien: Bundesministerium für Gesundheit und Frauen. Von <https://broschuerenservice.sozialministerium.at/Home/Download?publicationId=528> abgerufen
- Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit / BM.I Alpinpolizei. (kein Datum). Abfrage der Datenbank für Alpinunfälle vom 29.05.2019 (Disziplin: Kombinierte Tour/Hochtour, Hochtouren) bzw. 05.06.2019 (Disziplin: (Schi-)Tour).
- Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit. (2016). Alpinunfallbericht 2015. In *Ö. K. Sicherheit, Jahrbuch:2016 Sicherheit im Bergland* (S. 84-97). Innsbruck: Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit.
- Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit. (2018). Hochtour - Statistik. *analyse:berg jahrbuch, Sommer 2018* (15), 50-54.
- Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit. (2019). Hochtour - Statistik. *analyse:berg jahrbuch, Sommer 2019* (17), S. 38-41.
- Petzl Distribution SAS. (2019). *Petzl RAD LINE 6mm*. Abgerufen am 29. Mai 2019 von <https://www.petzl.com/DE/de/Sport/Seile/RAD-LINE-6-mm>
- Popall, P. (2014). Statisches Dyneema vs dynamisches Seil. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(3/14), S. 60-65.
- Rösler, J., Harders, H., & Bäker, M. (2006). *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Mörlenbach: Teubner Verlag.
- Schröder, V. (2019). *Übungsaufgaben zur Strömungsmechanik 2*. Königsbrunn: Springer-Verlag GmbH.
- Schubert, P. (2007). halbseilbruch. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(03/07), S. 42-46.
- Schubert, P. (2016). *Sicherheit und Risiko in Fels und Eis* (Bd. 1). München: Bergverlag Rother GmbH.

- Semmel, C. (2012). FAQs-Dyneema. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(3/12), S. 62-67.
- Semmel, C. (2017). Kurze Leine. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(#100), S. 34-36.
- Sulser, K. (2012). Haltekräfte von Fixpunkten in Firn & Schnee. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(01/12), S. 64-73.
- TEUFELBERGER Fiber Rope Corporation. (2019). *Maxim Climbing Ropes*. Abgerufen am 29. August 2019 von https://www.maximropes.com/home/tech_info/rope_constructions/
- Winkler, K., Hasler, B., & Mosimann, U. (2017). Unfälle auf Hochtouren. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(01/17), S. 78-82.
- Winkler, S. (2009). *Gletscher und ihre Landschaften*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Würtl, W. (2005). baustelle standplatz firn. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(1/05), 38-43.
- Würtl, W., & Plattner, P. (2017). Hochfeste Faserwerkstoffe als Bergseile. *bergundsteigen, Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport*(100), S. 38-43.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unfallstatistik entsprechend den Rohdaten des Kuratoriums für Alpine Sicherheit für Kombinierte Tour/Hochtour, Hochtouren, (Schi-)Tour, auf die die Kriterien „Absturz, Spaltensturz, Sturz/Stolpern/Ausgleiten“ als Unfallursache zutrafen.....	6
Abbildung 2: Erfasste Unfälle auf Hochtouren 2006-2017	6
Abbildung 3: Erfasste Hochtourenunfälle auf Gletschern nach Unfallursache.....	7
Abbildung 4: Seilnutzung auf Gletschern bei Hochtouren	8
Abbildung 5: Unfallursachen bei Skitouren auf Gletschern.....	9
Abbildung 6: Höhenverteilung der Unfälle auf Skitouren	10
Abbildung 7: Lehrmeinung zum korrekten Anseilen einer Gletscherseilschaft in Abhängigkeit von deren Größe (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 176).....	13
Abbildung 8: Bremsen eines Sturzes ohne Pickel und Steigeisen.....	14
Abbildung 9: Endposition beim Bremsen mit Pickel, aber ohne Steigeisen.....	15
Abbildung 10: Bremsen mit Pickel und Steigeisen	15
Abbildung 11: Tetraederförmig verbundene Wassermoleküle (Fellin, 2013, S. 1)....	19
Abbildung 12: Aufbau eines Eiskristalls auf molekularer Ebene (Meussen, 1998, S. 24)	19
Abbildung 13: Burger-Modell (Fellin, 2013, S. 76).....	22
Abbildung 14: Arten von Gletscherspalten (Fritz, Larcher, & Mössmer, 2016, S. 18)26	
Abbildung 15: Benutzung eines Halbseils	31
Abbildung 16: Benutzung eines Zwillingsseils	31
Abbildung 17: Anordnung für die Einzelstrangprüfung bei Einfach- und Halbseilen .	33
Abbildung 18: Anordnung für die Doppelstrangprüfung bei Zwillingsseilen	34
Abbildung 19: Seil in Kernmantelkonstruktion	39
Abbildung 20: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Haltekräfte am kurzen Seil (Braun-Elwert, 2008)	46
Abbildung 21: Grafische Darstellung des mechanischen Ersatzmodells einer zweier Gletscherseilschaft	53
Abbildung 22: Kräftesystem eines allgemeinen Sturzes in der schiefen Ebene	55
Abbildung 23: Kräftesystem für den Spaltensturz eines Seilschaftsmitglieds bei Steigung	56
Abbildung 24: Kräftesystem bei einem Sturzzug von hinten.....	57
Abbildung 25: Gangphasen mit schematischer Darstellung der haltbaren Kräfte (rote Kurve).....	59
Abbildung 26: Versuchsaufbau Seiltests	62
Abbildung 27: Fallführung des Seiltests bei 120kg	63
Abbildung 28: Fallführung des Seiltests bei 30kg	64
Abbildung 29: Vergrößerung des oberen Teils der Fallführung	65

Abbildung 30: Vergrößerung der Fallmasse	67
Abbildung 31: Abspanneinheit.....	67
Abbildung 32: Rückseite des Versuchsaufbaus.....	68
Abbildung 33: Tisch mit zugeschnittenen Seilproben	70
Abbildung 34: Aufgerissener Mantel des Testseils	73
Abbildung 35: Testseil mit oberflächlicher Schmelzverbrennung.....	73
Abbildung 36: Werte Messung der statischen Seildehnung	81
Abbildung 37: Schematische Skizze des dynamischen Seilversuchs.....	82
Abbildung 38: Lineare Änderung des Beschleunigungssignals während des freien Falls, Versuch 1	83
Abbildung 39: Beschleunigungs-Zeit Diagramm des ungefilterten Signals von Versuch 1	84
Abbildung 40: Kraft-Weg Diagramm von Versuch 1	86
Abbildung 41: Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg über die Zeit, Versuch 1	89
Abbildung 42: Vergleich der Beschleunigungsverläufe der drei Versuche der 1. Seilprobe Edelrid	93
Abbildung 43: Vergleich der Beschleunigungsverläufe der drei Versuche der 1. Seilprobe Beal	94
Abbildung 44: Vergleich der Beschleunigungsverläufe der drei Versuche der 1. Seilprobe Petzl	95
Abbildung 45: Vergleich der Beschleunigungsverläufe der drei Versuche der 1. Seilprobe Mammut	96
Abbildung 46: Federkonstante in Abhängigkeit von der auftretenden Kraft.....	100
Abbildung 47: Dämpfungskonstante in Abhängigkeit von der auftretenden Kraft...	101
Abbildung 48: Freigemachtes System der Phase der Beschleunigung	105
Abbildung 49: Freigemachtes System der Phase der Spannung des Seils.....	107
Abbildung 50: Freigemachtes System der Phase des Fangstoßes	110
Abbildung 51: Freigemachtes System der Phase der Beschleunigung des haltenden Seilschaftsmitglieds	114
Abbildung 52: Fallgeschwindigkeit für den Sturz ohne aktive Bremsung.....	120
Abbildung 53: Vergleich der theoretischen maximalen Fangstoßkraft für die vier getesteten Seile für den Sturz ohne aktive Bremsung, $s = 5 \text{ m}$	121
Abbildung 54: Theoretische maximale Fangstoßkraft für den Sturz ohne aktive Bremsung, Falllänge $s = 0.5 \text{ m}$	122
Abbildung 55: Theoretische maximale Fangstoßkraft für den Sturz ohne aktive Bremsung, Falllänge $s = 8 \text{ m}$	123
Abbildung 56: Fallgeschwindigkeit für den Sturz mit aktiver Bremsung ab $t = 2 \text{ s}$..	125
Abbildung 57: Theoretische maximale Fangstoßkraft für den Sturz mit aktiver Bremsung ab $t = 2 \text{ s}$, Falllänge $s = 0.5 \text{ m}$	126
Abbildung 58: Theoretische maximale Fangstoßkraft für den Sturz mit aktiver Bremsung ab $t = 2 \text{ s}$, Falllänge $s = 8 \text{ m}$	127

Abbildung 59: Theoretische maximale Fangstoßkraft für einen Spaltensturz mit einer Falllänge von $s = 1.5$ m, talseitiger Sturzzug.....	129
Abbildung 60: Theoretische maximale Fangstoßkraft für einen Spaltensturz mit einer Falllänge von $s = 5$ m, talseitiger Sturzzug	130

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Dichten von Schnee, Firn und Eis (Fellin, 2013, S. 3 und S. 57)	18
Tabelle 2: Einflussfaktoren auf die Festigkeit von Schnee und Eis.....	23
Tabelle 3: Einteilung der Schneehärte mittels Handtest (Sulser, 2012).....	23
Tabelle 4: Typische Materialien von Bergsportseilen mit Handelsnamen und Materialeigenschaften	28
Tabelle 5: Zusammenfassung der Anforderungen der EN 892 (2016) an dynamische Bergseile.....	32
Tabelle 6: Mitreißkräfte für unterschiedliche Belastungsrichtungen während des Stehens und Gehens.....	42
Tabelle 7: Reibungskoeffizient zwischen stürzendem Seilschaftsmitglied und Gletscher (Würtl, 2005).....	42
Tabelle 8: Kräfte am Standplatz bei Sturz des untersten nachsteigenden Seilschaftsmitglieds	44
Tabelle 9: Kräfte am Standplatz bei Pendelsturz (Sulser, 2012)	44
Tabelle 10: Kräfte am Standplatz bei Sturz des untersten Nachsteigers (Sulser, 2012)	45
Tabelle 11: Am haltenden Seilschaftsmitglied bei Spaltensturz auftretende Kräfte (Semmel, 2017).....	47
Tabelle 12: Phasen der Reaktionszeit	49
Tabelle 13: Daten der Seilproben	74
Tabelle 14: Ergebnisse der statischen Messung 123,05kg	76
Tabelle 15: Ergebnisse der statischen Messung 93,20kg	77
Tabelle 16: Ergebnisse der statischen Messung 62,45kg	77
Tabelle 17: Ergebnisse der statischen Messung 32,15kg	78
Tabelle 18: Statische Dehnung der Seilproben	79
Tabelle 19: Ergebnisse der dynamischen Versuche mit 123,05kg Fallmasse.....	90
Tabelle 20: Ergebnisse der dynamischen Versuche mit 93,20 kg Fallmasse.....	91
Tabelle 21: Ergebnisse der dynamischen Versuche mit 62,45 kg Fallmasse.....	92
Tabelle 22: Prozentuelle Steigerungen der Fangstöße	97
Tabelle 23: Gemittelte Federkonstanten aus den statischen Versuchen.....	98
Tabelle 24: Gemittelte Feder- und Dämpfungskonstanten aus den dynamischen Versuchen	99
Tabelle 25: Mittelwerte der Feder- und Dämpfungskonstanten	99
Tabelle 26: Kippkonstanten	112
Tabelle 27: Reibwerte bei aktiver Bremsung	116