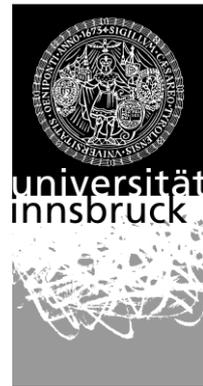


**Bachelorarbeit**



Zoller Florian

1315593

Name der/des Studierenden

Matrikelnummer

Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Bezeichnung des Bachelorstudiums

**Titel der Bachelorarbeit:**

Holzkonstruktion für Slackline Parks

**Titel der Lehrveranstaltung** (im Rahmen welcher die Bachelorarbeit verfasst worden ist):

Holzbau 1

Titel der Lehrveranstaltung

846703

8.

Lehrveranstaltungsnummer

Semester

Dipl.- Ing. Roland Maderebner

Name der Lehrveranstaltungsleiterin / des Lehrveranstaltungsleiters

Innsbruck, am TT.MM.JJ

11.4.2017

# 1) Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es, eine passende Lösung für die Bedürfnisse der mittlerweile weit verbreiteten Sportart „Slacklines“ zu finden.

Im Laufe der letzten Jahre hat sich diese Trendsportart „Slacklines“ besonders im Raum Innsbruck schnell weiterentwickelt. Hierbei wird versucht, über ein schmales dynamisches Band zu balancieren, das üblicherweise an Bäumen angebracht wird. Durch die schnelle Entwicklung dieses Freizeitsports wurden längere Distanzen immer attraktiver, was auch zu höherer Belastung der angespannten Bäume führte.

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es, eine wirtschaftliche, nachhaltige, sichere und benutzerfreundliche Lösung für dieses Problem zu finden.

Durch die Planung und Berechnung einer Holzkonstruktion, die sowohl größere Kräfte, als auch höhere Anspannmöglichkeiten zulässt, können Bäume geschützt und bestehende Parks entlastet werden.

Zur Ermittlung der tatsächlichen Belastungen wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit mehrere Bemessungstests durchgeführt und alle aufgezeichneten Daten ausgewertet. Aufbauend darauf wurden verschiedene Holzpfostensysteme verglichen, um eine optimale Befestigungsmöglichkeit zu finden.

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| 1) Zusammenfassung .....   | 1  |
| 2) Einleitung.....   | 3  |
| 2.1) Problemstellung .....   | 3  |
| 2.2) Zielsetzung der Arbeit.....   | 3  |
| 2.3) Gliederung und Vorgehensweise der Arbeit .....                                  | 3  |
| 3) Grundlagen zur Bemessung .....  | 4  |
| 3.1) Berechnungsmethoden ohne Berücksichtigung der dynamischen Komponenten .....     | 4  |
| 3.1.1) Erste Methode: .....  | 6  |
| 3.1.2) Zweite Methode:.....  | 7  |
| 3.2) Testvergleiche mit Berücksichtigung der dynamischen Komponenten: .....          | 8  |
| 3.2.1) Erster Testvergleich mit verschiedenen Längen und gleicher Vorspannung .....  | 8  |
| 3.2.2) Zweiter Testvergleich mit gleichen Längen und verschiedener Vorspannung ..... | 11 |
| 4) Testergebnisse.....   | 14 |
| 4.1) Ungünstigster Belastungspunkt.....  | 18 |
| 4.2) Belastungsspitzen während Spannvorgängen .....                                  | 20 |
| 4.3) Verhältnisdarstellungen – mit und ohne Belastung durch Slackliner .....         | 23 |
| 4.4) Ermittlung der Maximalbelastung.....  | 27 |
| 5) Statisches Grundsystem und daraus folgende Variantenvergleiche .....              | 31 |
| 5.1) Statisches Grundsystem .....  | 31 |
| 5.2) Variantenvergleiche .....   | 32 |
| 5.2.1) Variante 1 .....  | 33 |
| 5.2.2) Variante 2 .....  | 34 |
| 5.2.3) Variante 3 .....  | 35 |
| 6) Berechnung der gewählten Variante.....  | 38 |
| 7) Darstellung ideales Pfostensystem.....  | 42 |
| 8) Zusätzliche Variante für die Befestigung von zwei Slacklines .....                | 44 |
| 8.1) Maßgebender Lastfall für zusätzliche Variante.....                              | 44 |
| 8.2) Berechnung der zusätzlichen Variante.....                                       | 45 |
| 8.2.1) Berechnung.....   | 45 |
| 8.2.2) Erläuterung zur Berechnung.....   | 48 |
| 8.3) Darstellung der zusätzlichen Variante.....                                      | 52 |
| 9) Strukturierung und Lage des Longlineparks.....                                    | 53 |
| Literaturverzeichnis.....  | 55 |

## **2) Einleitung**

### **2.1) Problemstellung**

„Slacklines“ entwickelte sich bereits Anfang der 80er Jahre im amerikanischen Yosemite-Nationalpark. In Europa erfuhr der Sport aber erst ca. 2007 einen richtigen Boom. Seitdem werden Bäume in öffentliche Grün- und Parkanlagen immer öfter benutzt, um Slacklines zu spannen.

Durch die regelmäßige Beanspruchung von Bäumen in den städtischen Innsbrucker Parks wurde natürlich das dafür verantwortliche Grünanlagenamt darauf aufmerksam. Die traurigen Folgen sind Verbote in den betreffenden Park- und Grünflächen.

Um es den Slacklinern auch zukünftig zu ermöglichen ihren Sport in der Öffentlichkeit auszuüben, wurden bereits kleinere Slacklineparks im Raum Innsbruck errichtet. Besonders in den letzten Jahren wurden diese Parks immer mehr frequentiert, und sind meist nur mit Spannweiten unter 28m ausgestattet. Die Folge ist, dass Slackliner immer mehr diese überbelegten und kleinen Parks meiden und wieder an Bäumen spannen.

### **2.2) Zielsetzung der Arbeit**

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit einer nachhaltigen Lösung für den Schutz des städtischen Baumbestandes durch die Planung eines „Longline Parks“ mit Distanzen bis zu 75m. Dadurch werden die bereits bestehenden Parks entlastet, und die Bedürfnisse der heutigen und zukünftigen Slackliner in angemessener Weise berücksichtigt.

Berücksichtigt wird hierbei neben der Sicherheit, der Benutzerfreundlichkeit und der Nachhaltigkeit auch ein möglichst geringer finanzieller und baulicher Aufwand. Sowohl beim Errichten als auch beim Warten und Austauschen der Pfostensysteme.

### **2.3) Gliederung und Vorgehensweise der Arbeit**

Für die Bearbeitung der vorliegenden Bachelorarbeit wurde zunächst auf die Grundlagen der Bemessung eingegangen. Auf Basis dieser Grundlagen wurde der ideale Parkaufbau ermittelt, um mehrere passende Pfostenvarianten vergleichen zu können.

Für eine exakte Ermittlung der Belastungen der Pfosten wurden im weiteren Verlauf der Arbeit Bemessungstests durchgeführt. Dazu wurden auf eine passende Distanz verschiedene Slacklinematerialien getestet und alle Daten mit Hilfe eines leistungsfähigen Messgerätes der Universität Innsbruck aufgezeichnet.

Durch Vergleiche dieser Testdaten konnte die maximale Belastung gefunden werden, wodurch eine exakte Berechnung des idealen Pfostensystems ermöglicht wurde.

## 3) Grundlagen zur Bemessung

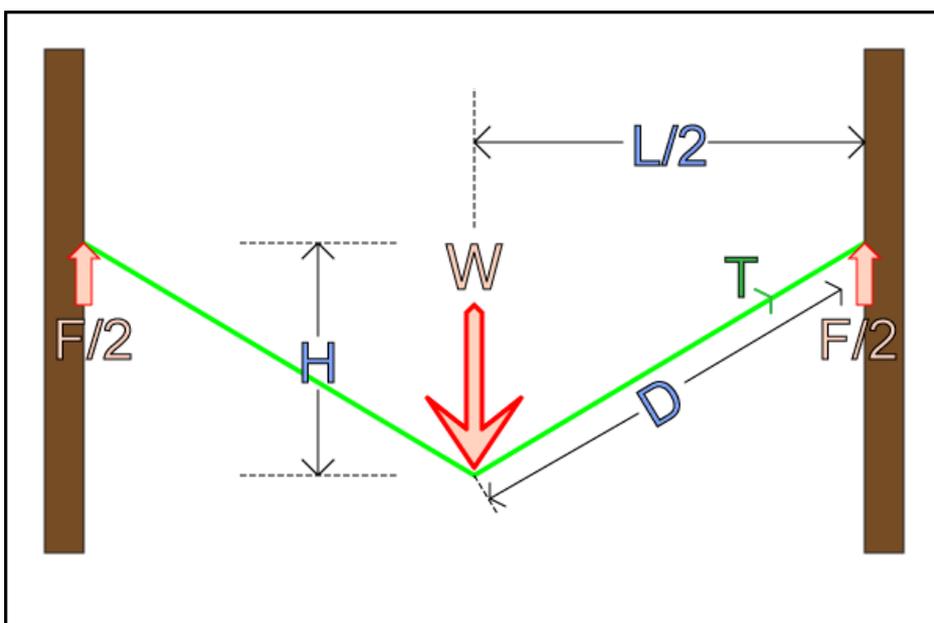
### 3.1) Berechnungsmethoden ohne Berücksichtigung der dynamischen Komponenten

Da es sich bei einem gespannten Slacklineband um ein einfach zu berechnendes statisches System handelt, gibt es mehrere Methoden, die wirkende Spannung im Band zu ermitteln. Auf zwei der üblichsten wird in diesem Kapitel noch näher eingegangen.

In erster Instanz müssen jedoch ein paar vereinfachende Annahmen zur Berechnung getroffen werden:

- Dynamische Komponenten werden nicht berücksichtigt
- Der Slackliner steht starr und punktuell in der Mitte der Slackline
- Die Länge der Slackline ist der lichte Abstand der Pfosten
- Die Slackline ist ideal auf gleicher Höhe auf beiden Pfosten befestigt

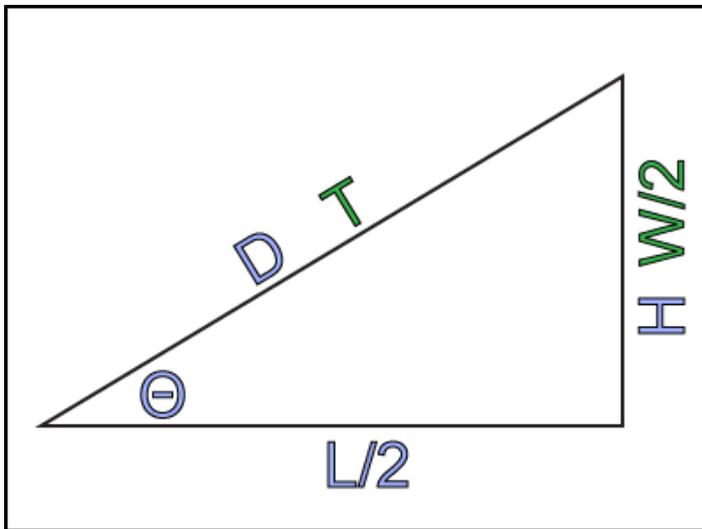
Folgende Darstellung zeigt die ideale Slackline. Der horizontale Abstand ist als Länge  $L$  angegeben, der Durchhang als Höhe  $H$  und die Belastung durch das Gewicht des Slackliners als Kraft  $W$ .



(Resources, 2008)

Die vertikalen Kraftkomponenten an den Enden sind gleich der Hälfte der vertikalen durch den Slackliner ausgelösten Kraft.

Das nächste Diagramm zeigt das entstandene Kraftdreieck mit den verschiedenen Kräften, Distanzen und Winkel.



(Resources, 2008)

Kräfte sind in grün, und Längen bzw. Winkel in blau dargestellt. Obwohl sie nicht die gleichen Einheiten haben, stehen sie doch proportional zueinander.

$$\frac{D}{H} = \frac{T}{\frac{W}{2}}$$

(Resources, 2008)

### 3.1.1) Erste Methode

Als erste Methode zur Bestimmung der Kraft in der Slackline wird der Pythagoräische Lehrsatz angewendet.

Angefangen wird mit einem simplen Verhältnis:

Das Verhältnis von der (bereits gedehnten) Line zum vertikalen Durchhang, ist gleich dem Verhältnis von der wirkenden Zugkraft im Band zur vertikalen Kraftkomponente am Ankerpunkt.

Als nächstes wird der Pythagoräische Lehrsatz zur Hilfe genommen. Da der Durchhang  $H$  und die halbe Länge  $L/2$  bereits bekannt sind, kann die Länge der gedehnten Line  $D$  berechnet werden.

$$D = \sqrt{H^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}$$

(Resources, 2008)

Somit erhält man alles Nötige, um die in der Slackline wirkende Kraft  $T$  zu bestimmen. Einfaches Umformen und einsetzen in die erste Formel ergibt:

$$T = \frac{WD}{2H} = \frac{W \sqrt{H^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{2H}$$

(Resources, 2008)

### 3.1.2) Zweite Methode

Als zweite Methode zur Bestimmung der wirkenden Zugkraft in der Slackline macht man von den trigonometrischen Funktionen Gebrauch.

Ausgangspunkt ist wieder das Kraftdreieck, wobei hier zunächst der Winkel Theta  $\Theta$  berechnet wird. Durch die Winkelfunktion  $\Theta = \arctan(\text{Gegenkathete}/\text{Ankathete})$  kann dieser leicht bestimmt werden:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{2H}{L}\right)$$

(Resources, 2008)

Der Sinus eines Winkels ist äquivalent zum Verhältnis von der gegenüberliegenden Seite zur Hypotenuse. Daraus folgt, dass  $\sin(\Theta) = (\text{Gegenkathete}/\text{Hypotenuse}) = (W/2)/T$ . Setzt man dieses Verhältnis wieder in die erste Formel ein, und formt passend um, erhält man abermals die Kraft in der Slackline T :

$$T = \frac{\frac{W}{2}}{\sin(\Theta)} = \frac{W}{2 \sin(\Theta)} = \frac{W}{2 \sin\left(\arctan\left(\frac{2H}{L}\right)\right)}$$

(Resources, 2008)

Diese zwei Methoden ergeben exakt dasselbe Ergebnis.

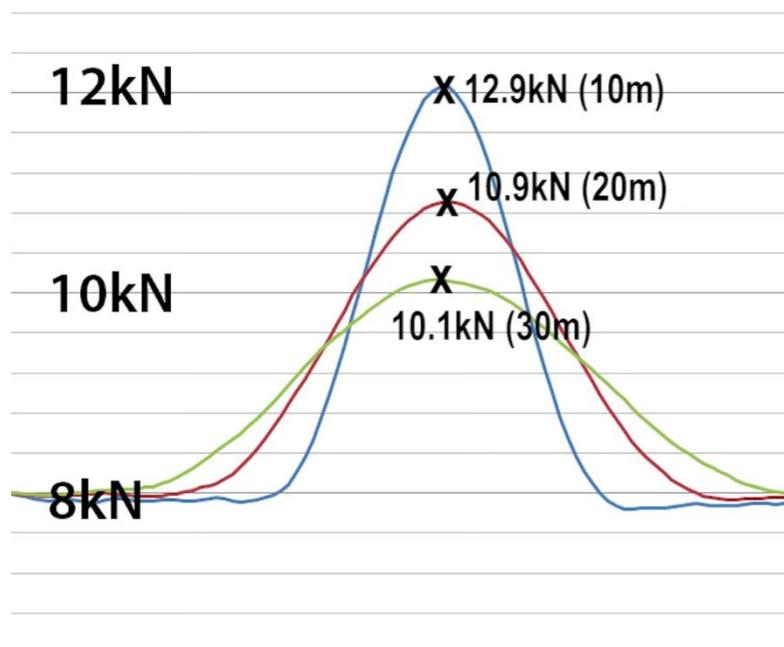
Wie bereits anfänglich erwähnt, wurden hier die dynamischen Einwirkungen auf das System nicht berücksichtigt.

## 3.2) Testvergleiche mit Berücksichtigung der dynamischen Komponenten

Bereits 2014 hatte die Schweizer Slacklinefirma „Slacktivity“ Vergleichstests durchgeführt, die besonders auf die Bestimmung des dynamischen Faktors ausgelegt waren. Die Testergebnisse dieser Vergleiche dienen im Rahmen dieser Bachelorarbeit rein als Referenzdaten, um das Verhalten des Slacklinebandes in Abhängigkeit von seiner Länge und Vorspannung zu veranschaulichen.

### 3.2.1) Erster Testvergleich mit verschiedenen Längen und gleicher Vorspannung

Im folgenden Diagramm wurden auf 3 unterschiedlich langen Slacklines (10m, 20m und 30m) gleiche Belastungen getestet. Die gleiche Last wurde bei jedem Test dynamisch – also mit Schwung – vertikal auf die Slackline gerichtet. Die Vorspannung betrug in allen Versuchen 8kN.



(Slacktivity, 2014) Kraftspitzen auf den verschiedenen dynamisch getestete Längen ( Blau: 10m Länge, Rot: 20m Länge, Grün: 30m Länge)

Aus diesen Tests geht hervor, dass die Belastungsspitzen für längere Slacklines um mehr als die Hälfte kleiner sind. Dafür wird die Belastung auf einen größeren Zeitraum verteilt.

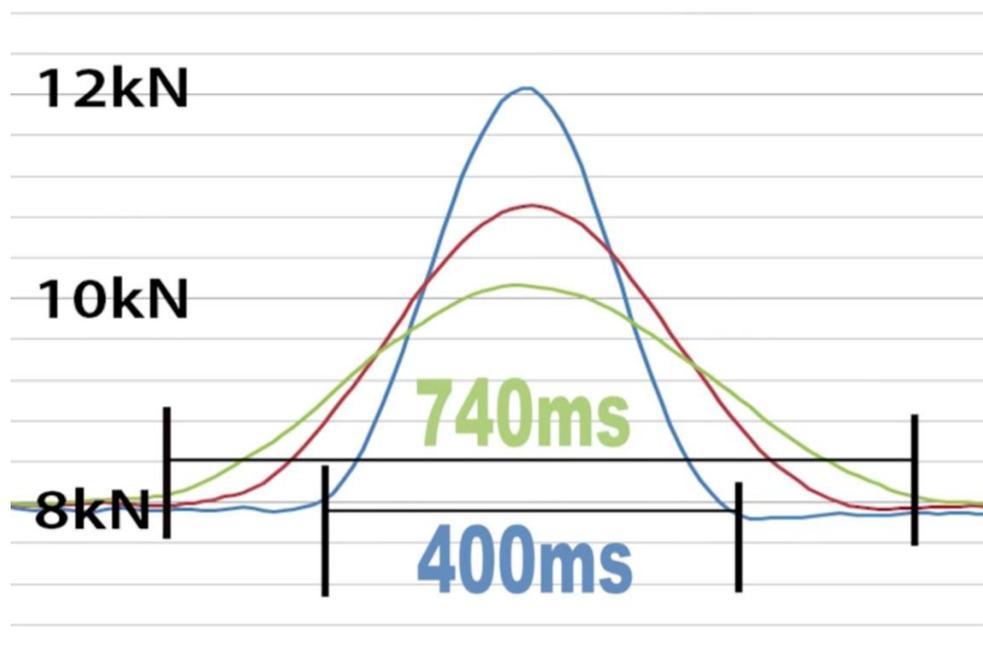
Grund dafür ist, dass bei längeren Slacklines mehr Band zum Dehnen zur Verfügung steht. Bei kürzeren Bändern erfahren deshalb die Anschlagpunkte größere Kraftspitzen bei gleichen dynamisch einwirkenden Belastungen.

Da der höchste Längenunterschied zwischen den Slacklines in diesen Tests nur 20m beträgt, ist anzunehmen, dass bei noch größeren Längen (Longlines) die Belastungsspitzen weiter sinken.

Einen großen Einfluss spielt hier auch das Material der Slackline. Je mehr sich das Band dehnen kann, desto geringer sind die auftretenden Kraftspitzen. In diesen Tests wurde ein verhältnismäßig sehr dehnsteifes Band von Slacktivity verwendet: SuperJumpline mit nur 4% Dehnung bei 10kN Zugbelastung.

Somit ist anzunehmen, dass bei Bändern mit größerer Dehnung bei gleicher Belastung die Kraftspitzen nur noch geringer werden. Diese Erkenntnis wirkt sich wiederholt positiv auf die Bemessung der Slacklinepfosten aus.

Wie bereits erwähnt, wird bei längeren Slacklines zwar die Kraftspitze verkleinert, jedoch breitet sich die Belastung auf einen längeren Zeitraum aus:



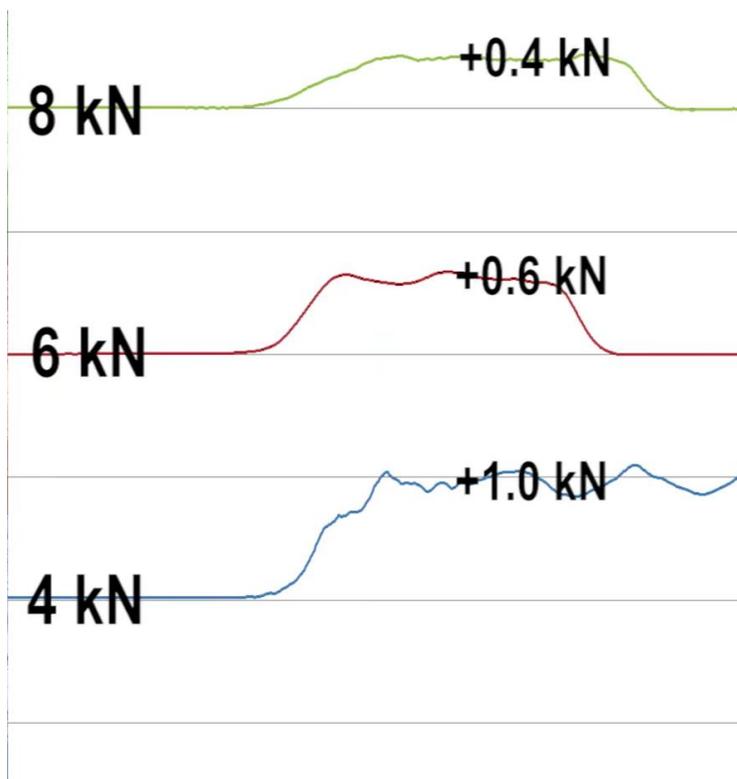
(Slacktivity, 2014) Belastungsdauer auf den verschiedenen getesteten Längen. (Blau: 10m Länge, Rot: 20m Länge, Grün: 30m Länge)

Auf Grund der längeren gespannten Distanzen „biegt“ sich das Band dadurch auch weiter nach unten. Vom Belastungsanfang bis zum Belastungsende konnte bei der längsten getesteten Slackline eine Dauer von 740 Millisekunden festgestellt werden. Bei der kürzesten jedoch nur 400 Millisekunden.

Daraus ist zu schließen, dass die gesamte einwirkende Energie auf das System nicht kleiner wird, sondern sich nur auf einen längeren Zeitraum verteilt. Je länger das System, desto länger die Belastungsdauer und umso kleiner die Kraftspitzen.

### 3.2.2) Zweiter Testvergleich mit gleichen Längen und verschiedener Vorspannung

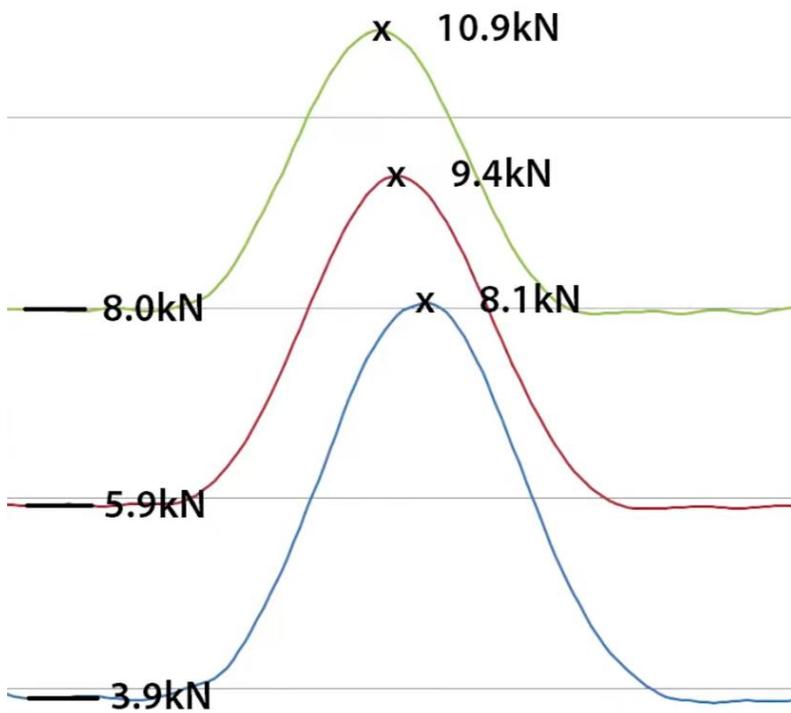
Eine gleich lange Slackline wurde bei drei verschiedenen Vorspannungen (4kN, 6kN und 8kN) den gleichen Belastungen ausgesetzt. Getestet wurde wieder die Kraftspitze durch eine dynamische Belastung und zusätzlich die Kraftzunahme hervorgerufen durch eine statische Belastung.



*(Slacktivity, 2014) Kraftzunahme auf verschiedenen Vorspannungen durch eine hängende statische Last in der Mitte des Systems. (Test bei 4kN, 6kN und 8kN Vorspannung)*

Im diesem ersten Versuch werden nur die Daten bei gleichbleibender statischer Belastung miteinander verglichen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass bei niedrigerer Vorspannung eine höhere Kraftzunahme während der Belastung eintritt, als bei höherer Vorspannung. Bei 4kN konnte eine Zunahme von 1,0kN ermittelt werden, wobei bei 8kN Vorspannung nur noch ein Anstieg von 0,4kN messbar war.

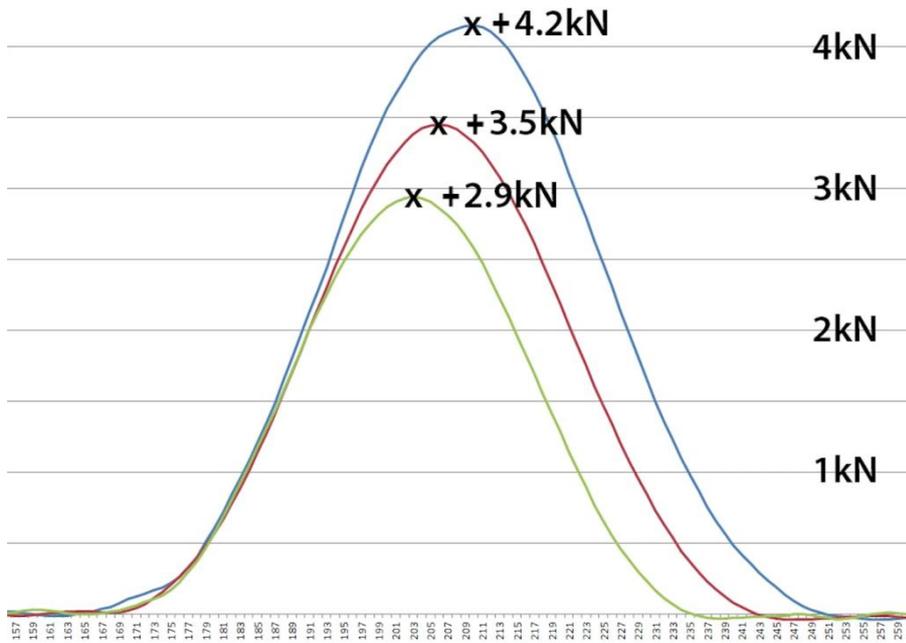
Im zweiten Versuch wurde die Slackline wieder dynamisch bei jeder Vorspannung durch eine fallende Last (Person mit 58kg Gewicht) belastet.



(Slacktivity, 2014) Kraftzunahme auf verschiedenen Vorspannungen (Test bei ca. 4kN, 6kN und 8kN) durch eine dynamisch fallende Last in der Mitte des Systems.

Hier ist wieder das gleich Muster zu erkennen: Je höher die Vorspannung, desto kleiner die Belastungsspitze. So wurde bei der Vorspannung mit 4kN eine Belastungszunahme von 4,2kN gemessen, aber bei 8kN nur noch eine Zunahme von 2,9kN.

Eine anschaulichere Darstellung der Kraftspitzen ist im folgenden Diagramm gegeben.



(Slackivity, 2014) Vorspannungen: Blau mit 4kN, Rot mit 6kN und Grün mit 8kN.

Wiederum ist hier anzunehmen, dass bei noch höheren Vorspannungen die Belastungsspitzen weiter sinken werden. Diese Erkenntnis wirkt sich ein weiteres Mal positiv auf die Bemessung der Slacklinepfosten aus.

## 4) Testergebnisse

Bis dato gab es im Slacklinesport noch keine dynamischen Bemessungstests auf Distanzen dieser Größenordnung. Auf Grund dessen wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit auf eine Distanz von 74 Meter und einer Anschlagshöhe von 2,5 Meter verschiedene Slacklinematerialien durchgetestet und verglichen.

Um mögliche Verfälschungen der Testergebnisse zu vermeiden wurden alle Tests am gleichen Ort und unter den gleichen Bedingungen durchgeführt. Zwischen den Tests traten keine Temperatur- oder Feuchtigkeitsschwankungen auf, die die Ergebnisse beeinflusst hätten.

Als Ankerpunkte für die getesteten Slacklines wurden zwei starke, starre Bäume gewählt. Durch ihren Umfang von 2,5 bis 3m konnte sichergestellt werden, dass sie während der hohen Testlasten keinen Verformungen (bzw. nur vernachlässigbar kleinen Verformungen) unterstehen.

Mit einem Abstand von 74m haben sie auch die ideale Länge für die gewünschten Testergebnisse.

Als Spannsystem kam ein kugelgelagerter Flaschenzug mit einem theoretischen Übersetzungsverhältnis von 1:15 zum Einsatz. In den meisten Tests wurde der Flaschenzug hingegen mit einem sogenannten LineGrip versehen. Dies brachte den Vorteil, dass die Line auf die gewünschte Spannung gebracht wurde und der gesamte Flaschenzug dabei trotzdem aus dem System entfernt werden konnte. Somit wurde fast die gesamte „Lichte Länge“ der Bäume mit dem verwendeten Slacklineband gefüllt, um keine Verfälschungen durch Fremdmaterialien (Flaschenzugseil mit allen eingebauten Stahlteilen) zu erhalten.



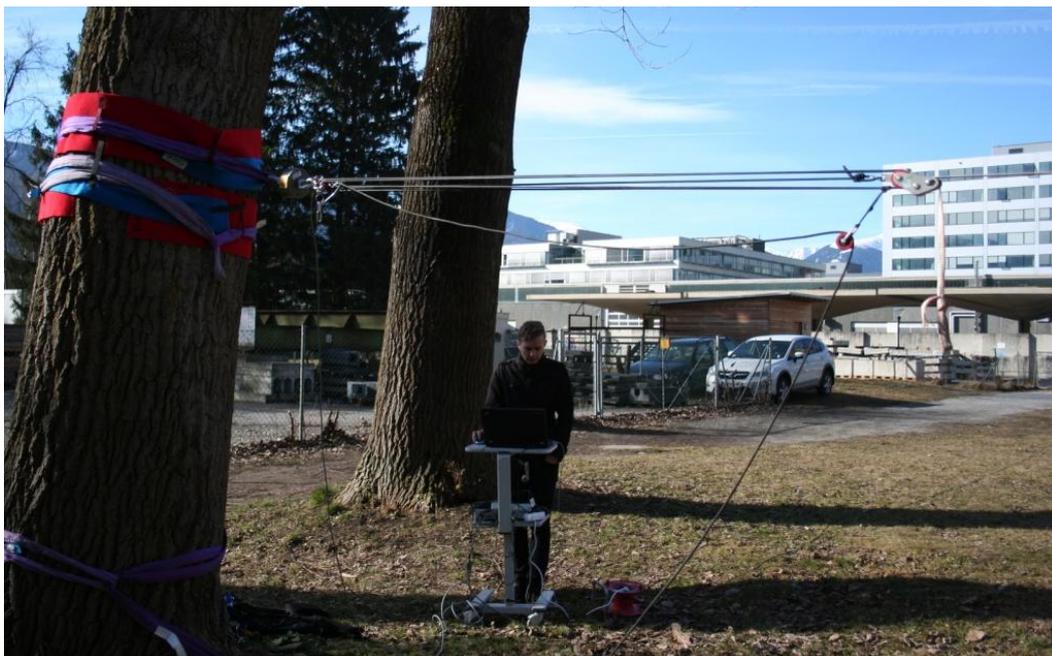
*Einbau der Kraftmessdose nach entfernen des Spannsystems bei Polyester und Polyamid*

Diese Methode der Testdurchführung war jedoch nicht immer möglich. Zum Beispiel musste beim Aufzeichnen der Spannungsgeschichte während der Spannvorgänge der Flaschenzug im System bleiben.

Ebenso konnte das oberflächlich sehr glatte Dyneema Material nicht gleichzeitig mit dem LineGrip verwendet werden (Durchrutschen hätte bei bereits 6kN stattgefunden). Dadurch blieb auch bei jeglichen Tests mit Dyneema der Flaschenzug im System.



*Tests mit Dyneema: Flaschenzug mit Dyneemaseil bleibt mit Kraftmessdose im System*



*Tests mit Dyneema: Flaschenzug mit Dyneemaseil bleibt mit Kraftmessdose im System*

Um eine Verfälschung der Ergebnisse auf ein vernachlässigbar kleines Maß zu minimieren, wurde der Flaschenzug mit einem 6mm Dyneema Seil ausgestattet. Dieses sorgte durch seine hohe Dehnsteifigkeit dafür, die Flaschenzuglänge bei Spannungsveränderungen nicht zu verlängern beziehungsweise zu verkürzen.

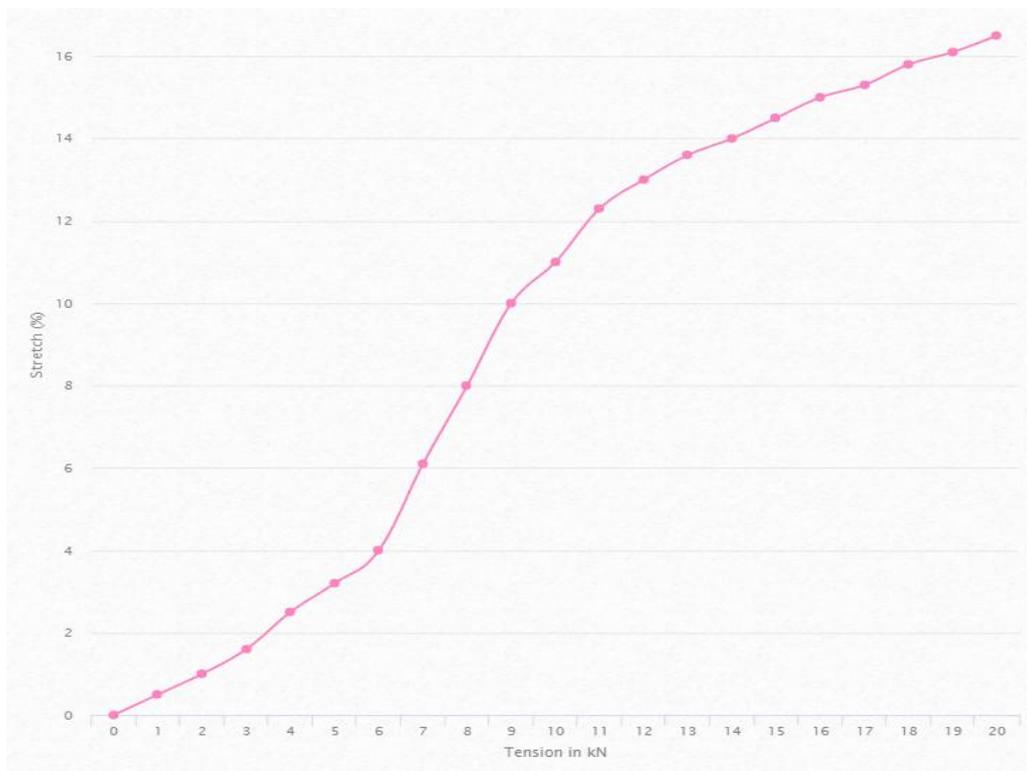
Um sicherzustellen, dass die äußeren Rinden der Bäume keine Schäden durch Scherreibungen erfahren, wurden extra vom österreichischen Slacklineverband dafür angefertigte Baumschützer, auch „TreeFriends“ genannt, verwendet.

Es wurden bei allen Tests zur Befestigung an den Bäumen Rundschlingen verwendet. Damit diese zwischen den Tests beim Austauschen der Slacklinebänder nicht verrutschten, wurden sie mit Hilfe der Ankerstichmethode befestigt.

Insgesamt wurden die 3 gängigen Slacklinematerialien Polyester, Polyamid und Dyneema getestet:

- Polyester

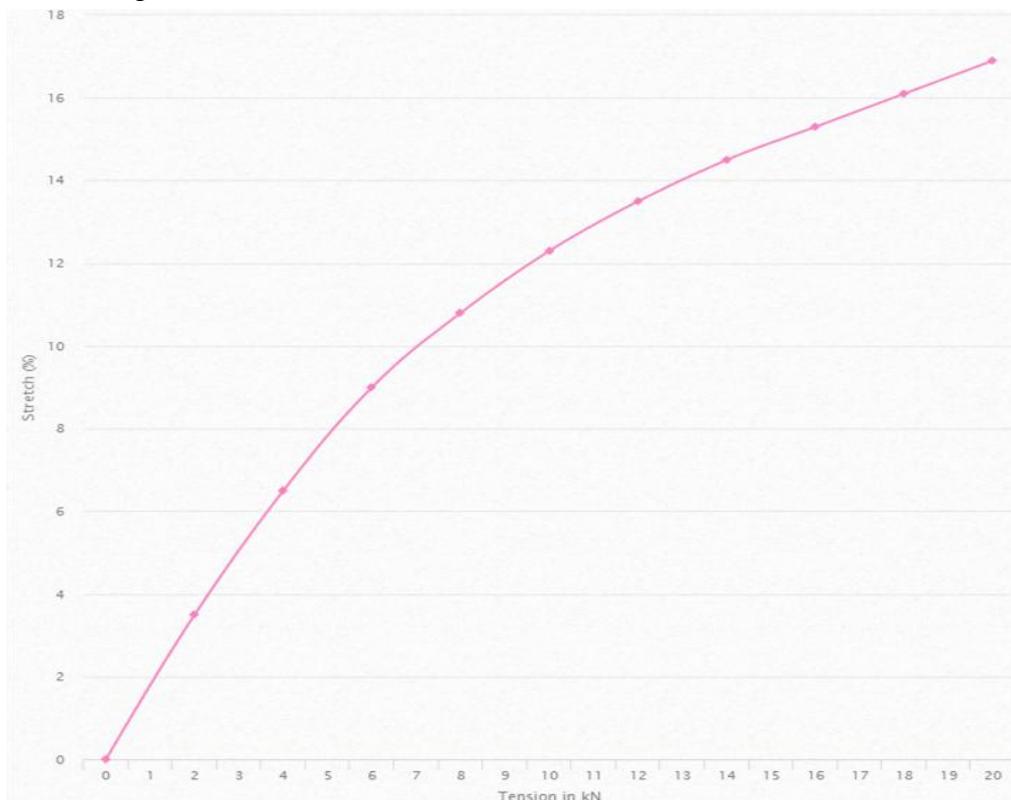
Für Polyester kam das vom deutschen Hersteller „Elephant Slacklines“ weit verbreitete Band „BlueWing“ zum Einsatz. Mit einer Dehnung von 7,2% bei 7kN stellt diese Slackline einen guten Mittelwert im Bereich der üblich verwendeten Bänder dar.



(Slacklineverband, 2017), Slackline Webbing Stretch Chart“ für Polyester

- Polyamid

Für Polyamid wurde das ebenfalls von der deutschen Firma „Elephant Slacklines“ hergestellte Band „Passion“ verwendet. Durch seine sehr hohe Dehnung von 11% bei 7kN bewegt es sich unter den dehnbarsten Slacklines auf den Markt.



(Slacklineverband, 2017), *Slackline Webbing Stretch Chart*“ für Polyamid

- Dyneema

Dyneema ist eine Marke des niederländischen Konzerns „Koninklijke DSM N.V.“. Unter allen verwendeten Materialien für Slacklines ist Dyneema mit nur ca. 1% Dehnung bei 7kN das mit Abstand dehnsteifste Band.

Auf Grund dieser hohen Dehnsteifigkeit werden hier auch die größten Kraftspitzen während der Tests erwartet.

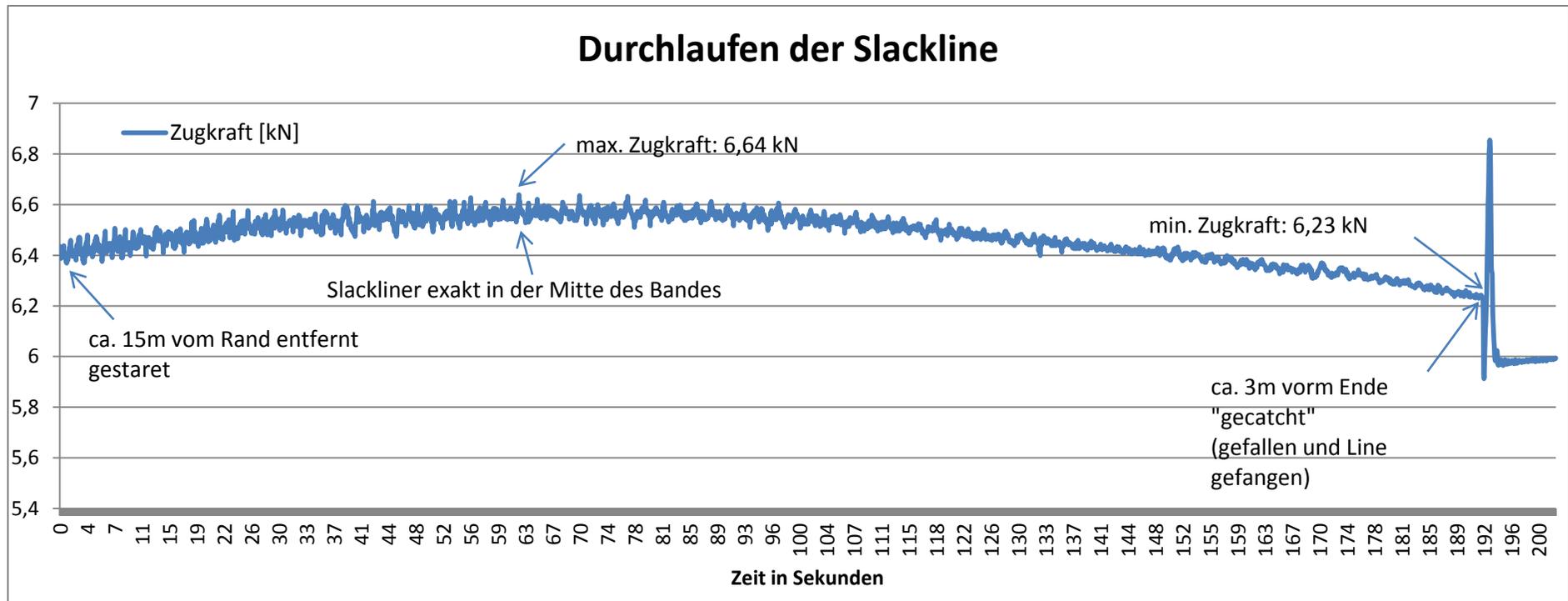
Das Spannungs-Dehnungs Diagramm gleicht - ähnlich dem Verhalten von Stahl - einer Geraden.

## 4.1) Ungünstigster Belastungspunkt

Theoretische Überlegungen bezüglich der ungünstigsten Belastung des Systems ergeben, dass die maximale Zugkraft im Slacklineband exakt bei Belastung in der Mitte stattfindet.

Dies rührt daher, dass in der Mitte des Systems die ungünstigsten Winkel und Kraftverteilungen auftreten.

Um dies jedoch auch zu beweisen, wurde ein eigener Lastfall getestet: „Durchlaufen der Slackline“. Dabei startete eine Person ca. 15 Meter vom Rand entfernt und balancierte bis ca. 3 Meter vor dem Ende. Das folgende Diagramm zeigt anschaulich den Verlauf der Zugkraft beim Durchgehen.



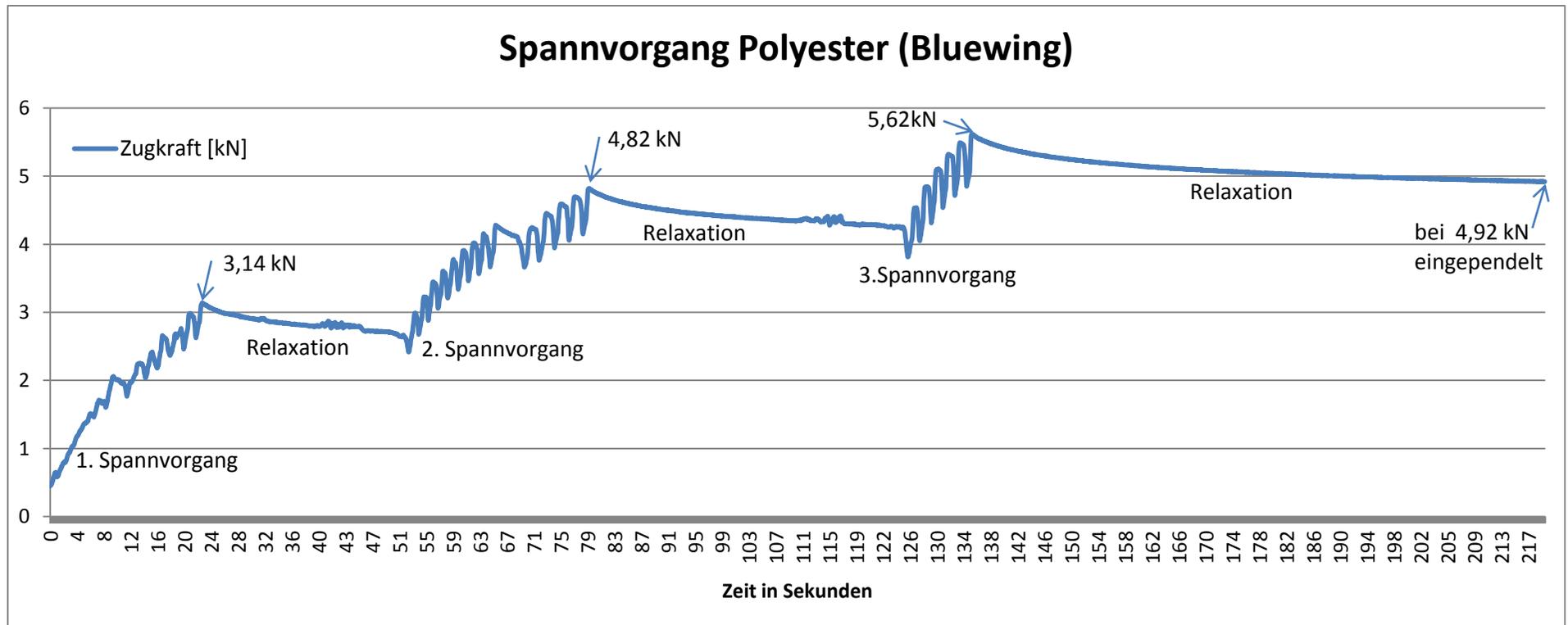
Die Laststeigerung in Richtung Mitte der Slackline kann anhand dieses Versuches gut veranschaulicht werden. Die Testergebnisse bei Durchlaufen des Bandes gehen von mindestens 6,23kN auf maximal 6,64kN. Das ergibt eine Laststeigerung in der Mitte des Bandes um 0,41kN bzw. um 6,58%.

Am Ende des Durchlaufvorganges fiel der Slackliner und fing dabei das Slacklineband – dies erklärt den starken Ausschlag am Ende des Diagramms. Nachdem er die Slackline verlassen hatte, pendelte sich die Zugkraft im Band wieder auf knapp 6kN ein.

Auf Grund dieser Ergebnisse konnte bewiesen werden, dass die maximale Belastung der Slackline in der Mitte stattfindet. Somit wurden alle folgenden Tests stets in der Mitte der Line durchgeführt.

## **4.2) Belastungsspitzen während Spannvorgängen**

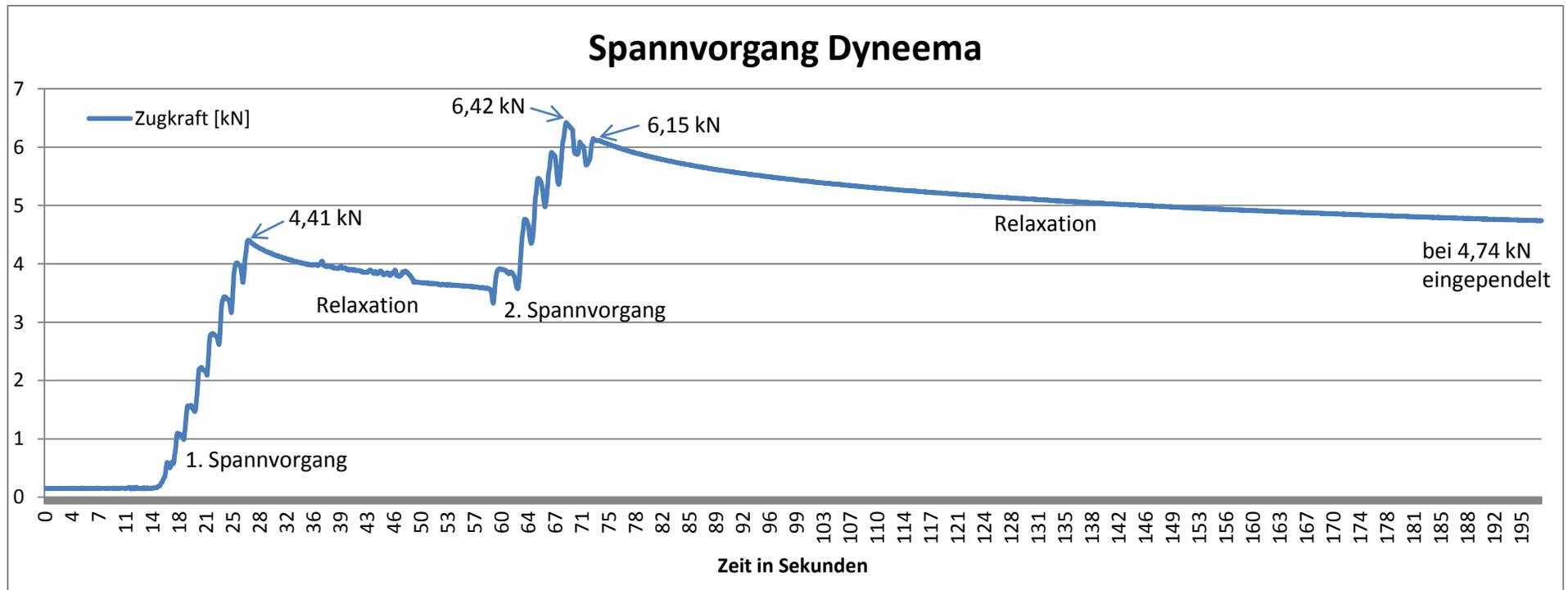
Da schon während der Spannvorgänge Belastungsspitzen zu erwarten sind, wurden auch diese Abläufe aufgezeichnet. Verglichen werden hier jedoch nur die Unterschiede zwischen Polyester und Dyneema. Polyamid wurde weggelassen, da der Spannvorgang durch die hohe Dehnung so lange dauerte, dass eine zu hohe Anzahl an Messwerten entstanden wäre. Ebenso bewegt sich Polyamid nicht im maßgebenden Bereich, wodurch eine eigene Darstellung der Ergebnisse vernachlässigt werden kann.



Es ist deutlich zu erkennen, dass die größten Kraftspitzen direkt am Ende der Spannvorgänge eintraten. Diese befanden sich nach dem ersten Spannvorgang bei 3,14kN, nach dem zweiten bei 4,82kN und nach dem dritten Spannvorgang bei 5,62kN.

Ebenfalls traten unmittelbar nach den Spannvorgängen sofortige Spannungsabnahmen ein. Diese Abnahmen kommen durch die Relaxation des Slacklinebandes. Eine Relaxation ist allgemein definiert als die zeitabhängige Spannungsabnahme bei gleichbleibender Länge. Das heißt, dass sich die einzelnen Fasern im Band mit fortschreitender Zeit immer enger „zusammenschmiegen“ und dadurch das Band weiter an Spannung verliert obwohl sich die Länge nicht verändert.

84 Sekunden nach dem dritten Spannvorgang pendelte sich die Zugkraft in der Slackline bei 4,92kN ein. Dies bedeutet eine gesamte Spannungsabnahme von 12,55%.



Durch die vielfach geringere Dehnung von Dyneema konnte der Spannvorgang wie erwartet in kürzerer Zeit durchgeführt werden. Um Messungenauigkeiten zu vermeiden, wurde stets darauf geachtet, dass weder das Dyneema Band durch die Bandklemmen, noch das Flaschenzugseil durch die Bremse rutscht. Dies wurde kontrolliert mit Markierungen an den betreffenden Stellen und durch die sogenannte „Double Wrap“ Methode (Dyneema Band wurde zweimal durch die Bandklemme gewickelt).

Sowohl nach dem ersten Spannvorgang, als auch nach dem zweiten, konnte eine viel schnellere Belastungsabnahme festgestellt werden als bei Polyester. Jedoch wird angenommen, dass diese Abnahme nicht nur von der Relaxation des Dyneema Bandes abhängt, sondern auch vom „Setzen“ der Verbindungen der Einzelteile des Systems.

Nach dem zweiten Spannvorgang trat eine Kraftspitze von 6,15kN ein. Diese nahm aber ebenfalls schnell ab und pendelte sich nach 123 Sekunden bei 4,74kN ein, was einem Spannungsverlust von 15,66% entspricht.

### **4.3) Verhältnisdarstellungen – mit und ohne Belastung durch Slackliner**

Jedes der verwendeten Materialien benötigt verschiedene Vorspannungen, damit es als Slackline mit einer passenden Höhe über dem Boden verwendet werden kann. Dies rührt aus den unterschiedlichen Dehnverhalten der Bänder.

Um ein möglichst gutes Verständnis für diese stark differierenden Eigenschaften der Materialien zu bekommen, wurden alle in einem gesonderten Test betrachtet.

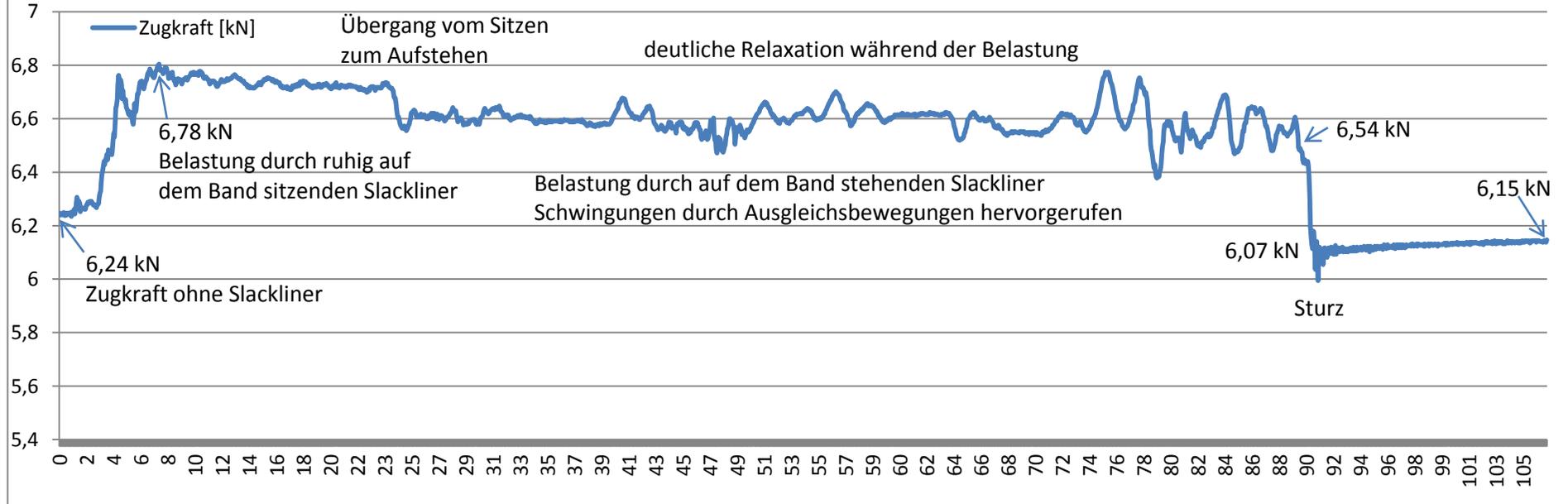
Hierzu brachte man als ersten Schritt jedes Band auf eine zum Slacklinen passende Spannung. Diese Spannung wurde erreicht, als sich der Slackliner in der Mitte des Bandes 50 bis 80cm über dem Boden befand. Üblich sind Höhen von unter 50cm, jedoch sind dann Versuche zum „Bouncen“ – also dem vertikalen nach oben und unten Federn - nur noch sehr eingeschränkt möglich.

Im zweiten Schritt setzte sich eine Person mit 74kg Eigengewicht möglichst ruhig auf das Band. Die daraus folgende Kraftsteigerung im Slacklineband wurde aufgezeichnet und mit Hilfe von Diagrammen anschaulich dargestellt.

Ebenso traten unterschiedliche Relaxationen – also Spannungsverluste – während der Belastungsphasen auf. Die Größen dieser Relaxationen sind abhängig vom eingesetzten Material, der Belastungsdauer und der im Band wirkenden Kraft.

Auf den folgenden Seiten befinden sich die Ergebnisse dieser Verhältnisdarstellungen für alle verwendeten Slacklinematerialien.

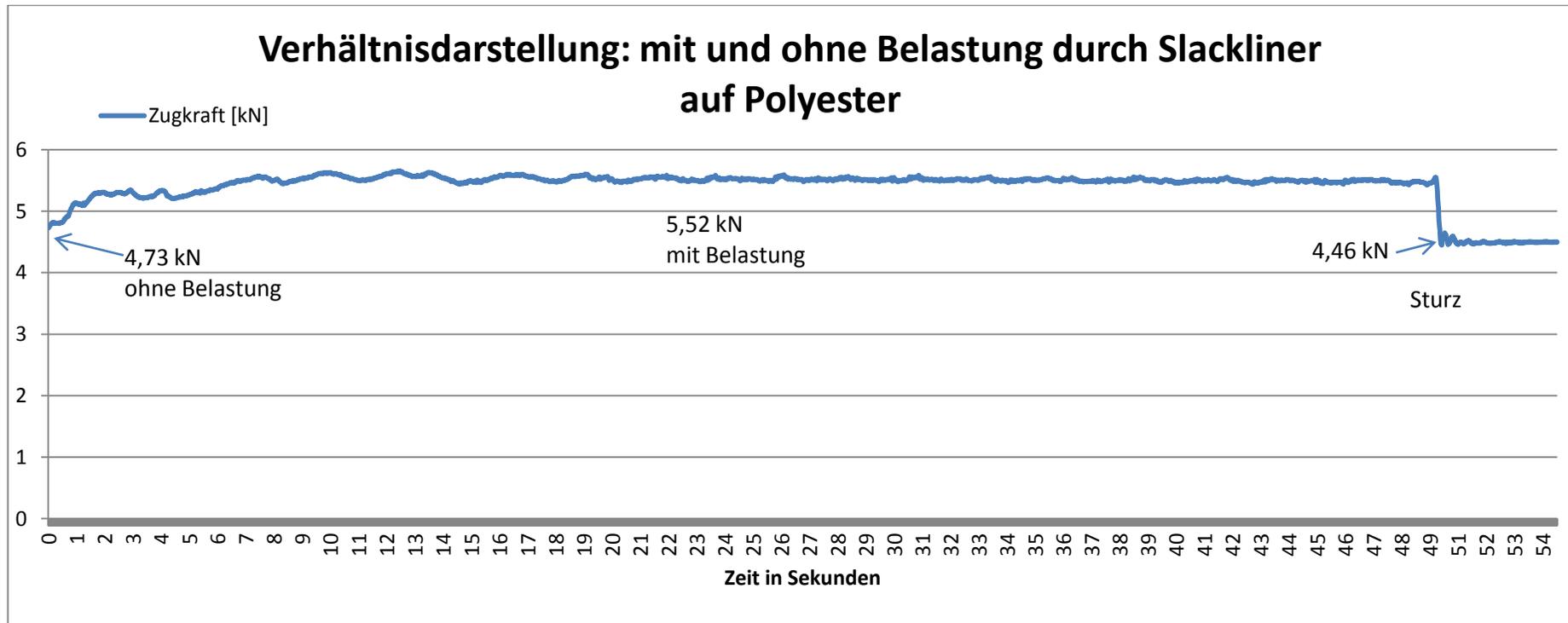
## Verhältnisdarstellung: mit und ohne Belastung durch Slackliner auf Polyamid



Im Rahmen dieses Tests wurde das Slacklineband vorerst auf eine zum Balancieren übliche Vorspannung gebracht. Dabei wurde eine Zugkraft von 6,24kN erreicht. Anschließend setzte sich eine Person mit 74kg auf das Band. Hierbei stieg die Zugkraft um 8,65% auf 6,78kN. Ebenfalls trat unmittelbar nach der Belastung eine merkbare Relaxation ein.

Im Anschluss daran stellte die Person sich auf die Slackline. Durch Ausgleichsbewegungen versetzte sie das Band in Schwingungen, wodurch die Zugkraft im kleinen Bereich unregelmäßig schwankte. Nach einem Belastungszeitraum von 85 Sekunden stürzte der Slackliner. Während dieser Belastungsphase relaxierte sich das Band insgesamt um 3,54% auf 6,54kN. Dem Sturz folgend fiel die Spannung auf nur 6,07kN. Im Vergleich zur Vorspannung von 6,24kN bedeutet dies eine Senkung von 7,37%.

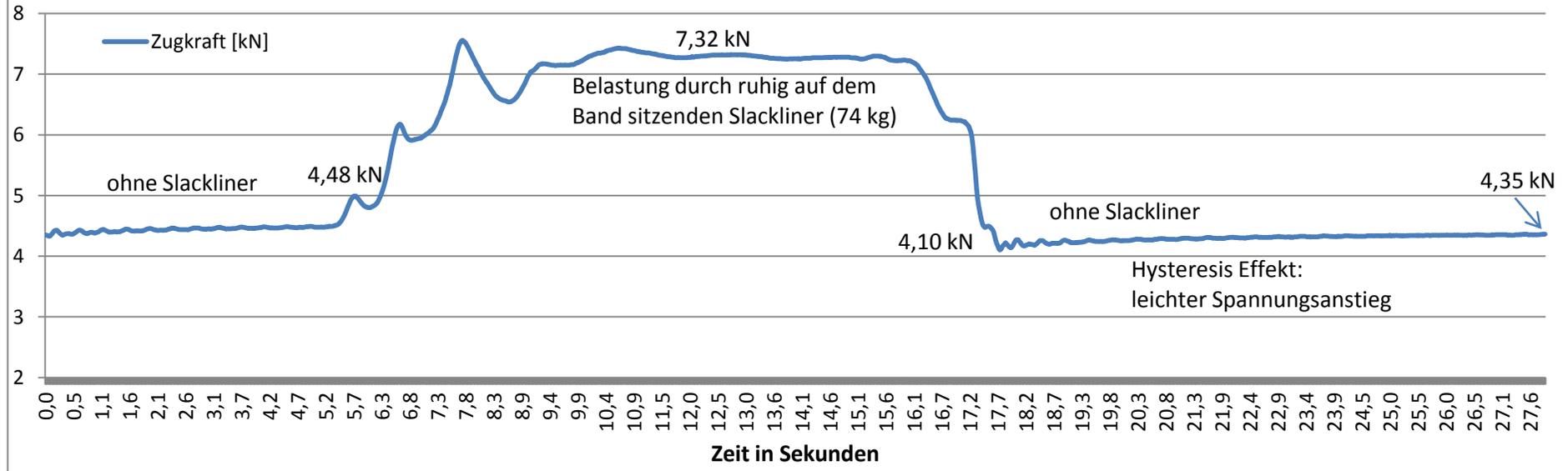
Zuletzt trat durch den Hysteresis Effekt noch eine kleine Spannungssteigerung ein, durch die ein Kraftanstieg von 0,08kN zu beobachten war.



Wie bereits bei Polyamid wurde auch das Polyesterband in diesem Versuch auf eine zum Balancieren übliche Spannung gebracht. Die reine Vorspannung (also ohne Belastung durch Slackliner) brachte eine Zugkraft von 4,73kN auf das System. Durch das ruhige Hinsetzen des Slackliners auf das Band stieg diese Kraft um 16,70% auf 5,52kN. Somit befindet sich der verhältnismäßige Kraftzuwachs bei Polyester zwischen dem von Polyamid und Dyneema.

Nach dem Sturz fiel die Zugkraft im Slacklineband auf 4,46kN. Daraus ist ermittelbar, dass das Band durch den Belastungsvorgang insgesamt 5,71% an Spannung verloren hat.

## Verhältnisdarstellung: mit und ohne Belastung durch Slackliner auf Dyneema



Derselbe Test wurde ebenso auf Dyneema durchgeführt. Nachdem das Band auf eine angemessene Spannung zum Balancieren gebracht wurde, trat eine Zugkraft von 4,48kN ein. Als die 74kg schwere Person sich wieder auf das Band setzte, stieg diese Kraft um unerwartete 63,39% auf 7,32kN. Durch die hohe Dehnsteifigkeit vom Dyneema-Gewebe, konnte keine merkliche Relaxation festgestellt werden. Erst als die Belastung durch die Person beendet wurde, fiel die Spannung wieder.

Im Vergleich zur Zugkraft von 4,48kN vor der Belastung, trat nach der Belastung nur noch eine Kraft von 4,10kN ein. Daraus lässt sich eine Relaxation von 8,48% ermitteln.

Während der folgenden 10 Sekunden stieg die Spannung durch den Hysteresis Effekt wieder auf 4,35kN an. Der Hysteresis Effekt besagt allgemein, dass die Größe der wirkenden Kräfte nicht nur von der momentanen Belastung abhängt, sondern auch von der Vorgeschichte (Belastungspfad).

## 4.4) Ermittlung der Maximalbelastung

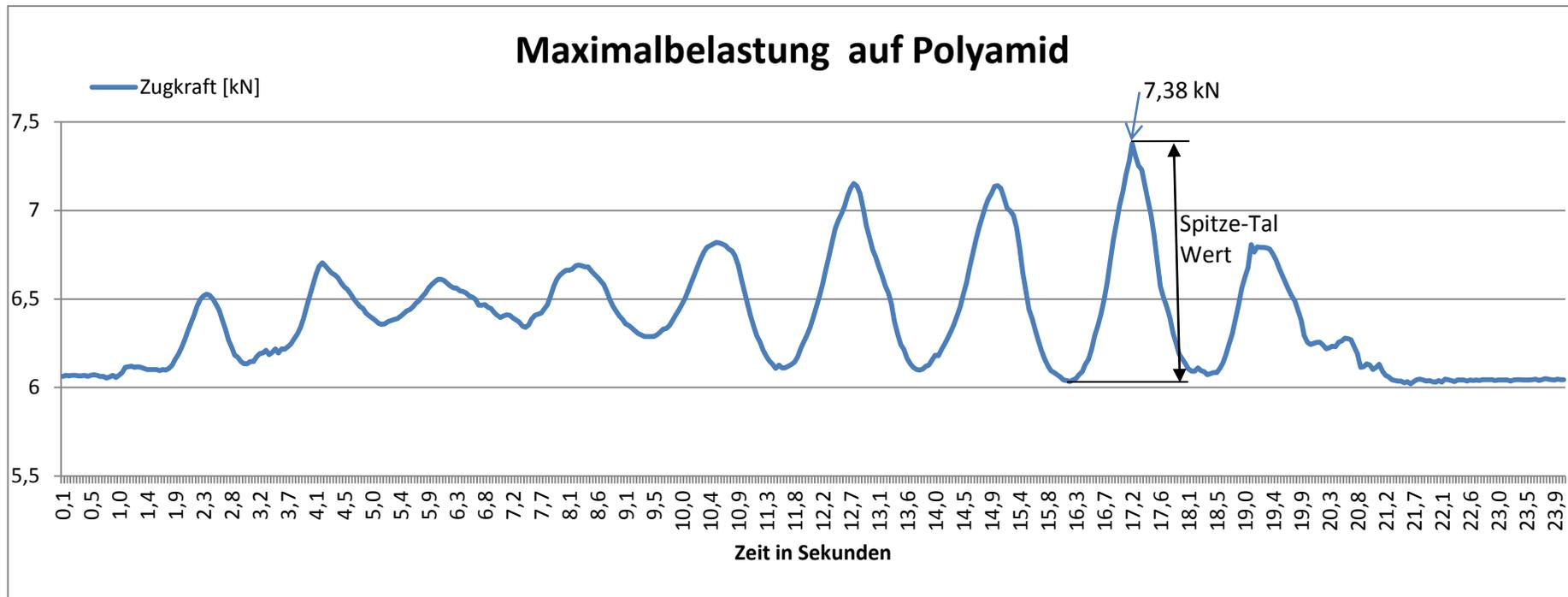
Zur Ermittlung der maximal möglichen Belastung beim Slacklinen wurden 2 verschiedene Möglichkeiten geprüft, um diese zu erreichen.

Zum ersten war dies das „Bouncen“. Dabei drückt der Slackliner ruckartig mit den Knien in das Band, um sich in eine vertikale Schwingung zu versetzen. Dieses vertikale Federn ist ähnlich vorzustellen wie kleine Schwingungen auf einem Trampolin bzw. einem Sprungbrett.

Zum zweiten wurde das „Surf-Bouncen“ ausgiebig getestet. In dieser Variation des „bouncens“ versucht der Slackliner, zuzüglich zur vertikalen Bewegung, eine horizontale Auslenkung im passenden Rhythmus zu erreichen. Umso größer die dabei gewonnene Amplitude, umso größer die wirkende Belastung im Band.

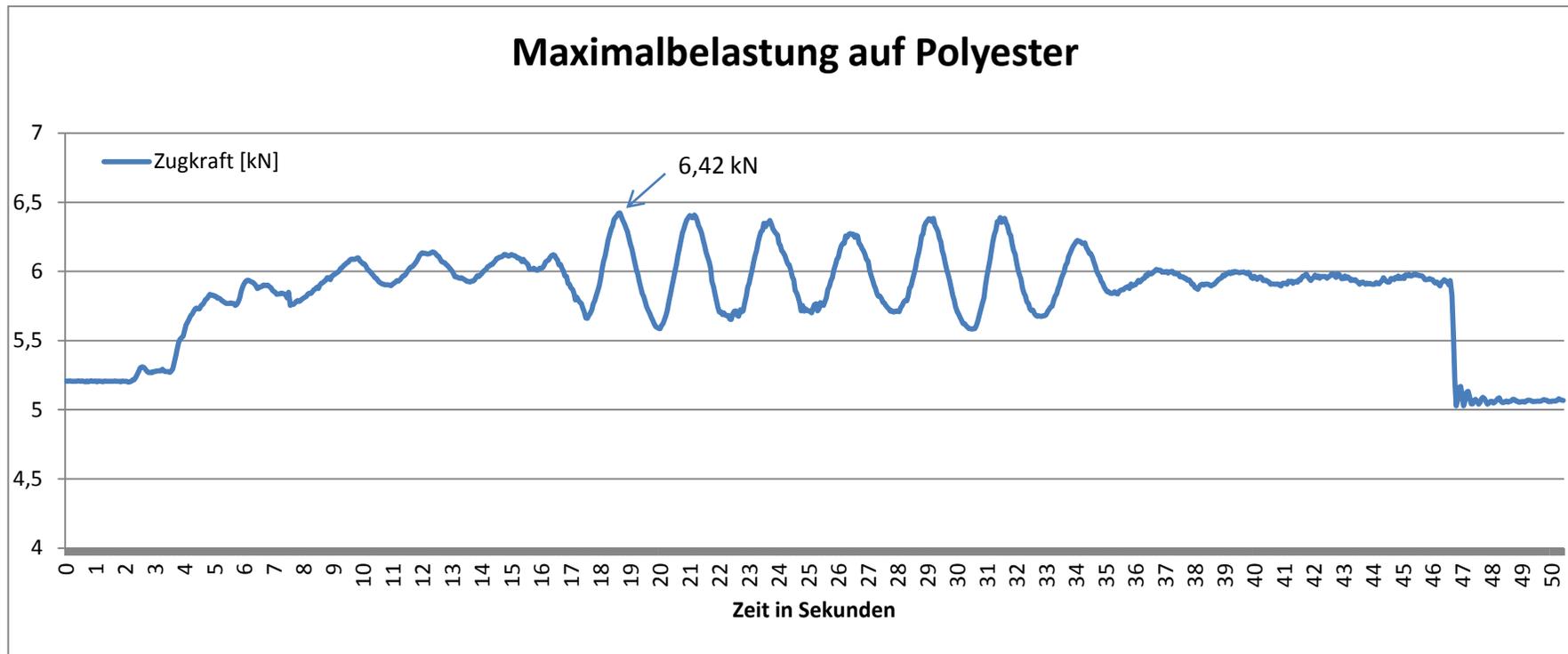
Im Laufe dieser Schwingungsersuche wurde jedoch schnell klar, dass die höchste Belastung nur durch eine höhere Vorspannung erreicht werden kann. Dadurch stand der Slackliner in ruhiger Haltung bei den Tests 50 bis 80cm über dem Boden. Im Zuge der eingebrachten Schwingungen federte er bei jedem Bandmaterial bis zum Boden und nützte somit die komplette Höhe aus.

Durch solch große Schwingungen wirkten sehr starke Kräfte auf den Körper des Slackliners. Diese führten regelmäßig zum Sturz. Bei jedem getesteten Material wurden mehrere solcher Versuche durchgeführt, bis die für den Slackliner maximal möglichen Kraftspitzen erreicht wurden.



Auf Grund der hohen Dehnbarkeit von Polyamid wirkten sich die Schwingungsversuche verhältnismäßig schwach und in die Länge gezogen aus. Die dabei maximal erreichte Belastung betrug 7,38kN, basierend auf einer verhältnismäßig hohen Vorspannung.

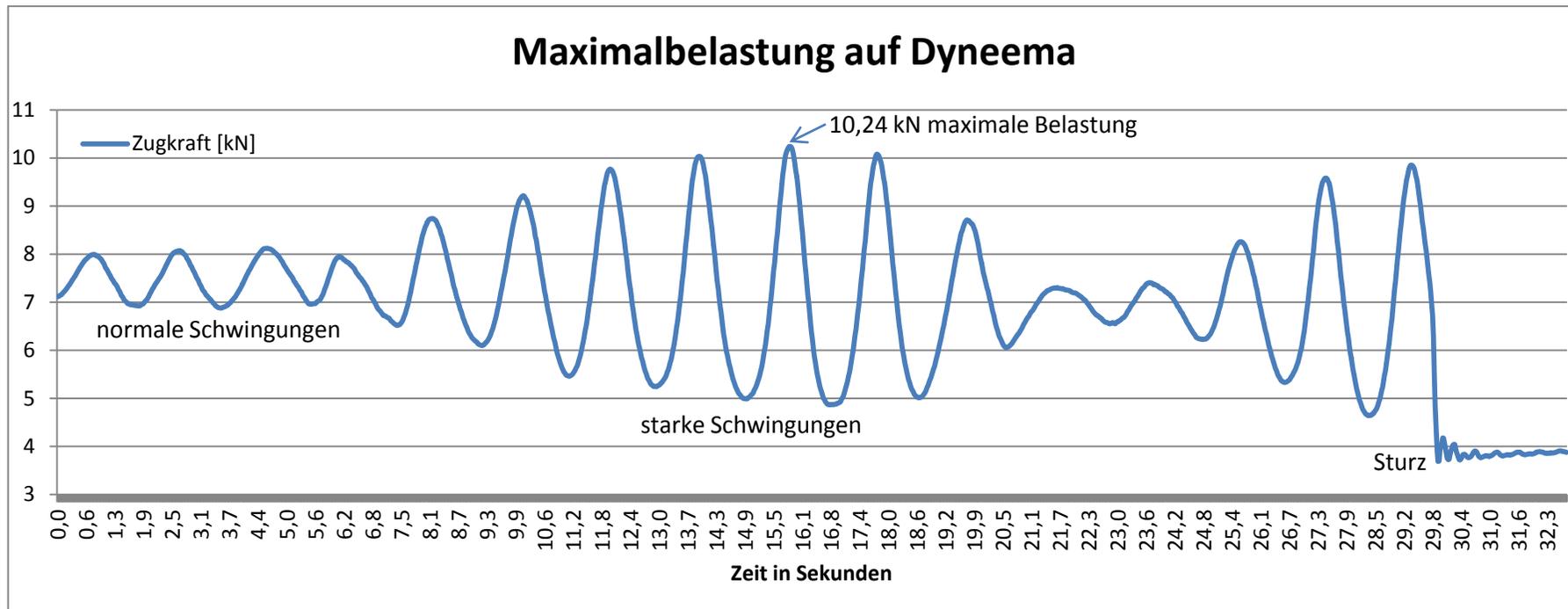
Der dabei größte gemessene Spitze-Tal Wert liegt hier bei 1,35kN.



Schwingungsversuche bei Polyester wirkten sich verglichen mit Polyamid weitaus kraftintensiver aus. Durch die höhere Dehnsteifigkeit steigt der Widerstand bei jeder Auslenkung schneller an.

Die dabei gemessenen Spitze-Tal Werte erreichten bei Polyester maximale Größen von 0,84kN. Größere Werte gegenüber Polyamid wären plausibel und zu erwarten, jedoch konnte beim Test mit Polyester keine so hohe Schwingamplitude erreicht werden, woraus die geringeren Kraftamplituden resultierten.

Die bei Polyester maximale Belastung erreichte 6,42kN. Diese baut auf einer verhältnismäßig niedrigeren Vorspannung auf als bei den Versuchen mit Polyamid und Dyneema.



Da Dyneema das mit Abstand dehnsteifste Slacklineband ist, konnten auch erwartungsgemäß hier die größten Kraftspitzen erreicht werden.

Spitze-Tal Werte von bis zu 5,33kN heben sich deutlich von den anderen getesteten Materialien ab. Unter anderem resultiert dies nicht nur aus der niedrigeren Dehnbarkeit, sondern ebenfalls von der unüblich hohen Vorspannung bei den Tests.

Der Slackliner befand sich im ruhigen Zustand auf dem Band ca. 80cm über dem Boden. Bei seinen Schwingungsversuchen bewerkstelligte er nach mehreren Anläufen eine Kraftspitze von 10,24kN.

Damit konnte die maximal auf das Band und auf die Ankerpunkte wirkende Belastung ermittelt werden. Dieser Wert wird somit bei der Berechnung des Pfostensystems als maßgebende charakteristische Last angesetzt.

## 5) Statisches Grundsystem und daraus folgende Variantenvergleiche

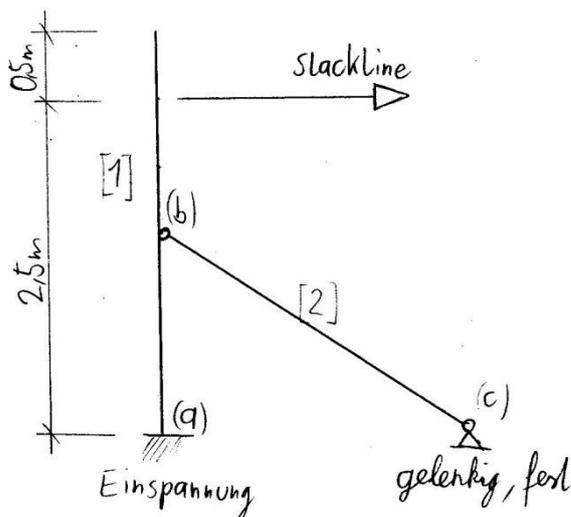
### 5.1) Statisches Grundsystem

Das statische Grundsystem ist bis auf die Maße bei allen berechneten Varianten gleich und besteht aus 2 Stäben, die gelenkig miteinander verbunden sind. Der erste, vertikale Stab (Gurt) ist durch eine Kiesbettung innerhalb von Beton-Schachtringen biegesteif im Boden befestigt. Diese Verbindung zur Kiesbettung wird in der Berechnung auch als biegesteif angesetzt. Der zweite, diagonale Stab (Srebe) wird mit Hilfe der Stegsan© RV Verbindungsplatte von Sihga© am Boden mit einem Betonfundament verbunden. Dieser Knotenpunkt wird in der Berechnung als gelenkig angenommen.

Bei der Wahl der optimalen Pfostenvariante wurde auf mehrere Aspekte Rücksicht genommen. Dazu zählt neben der statisch günstigen Ausnutzung des Systems auch die Nachhaltigkeit, Sicherheit, Benutzerfreundlichkeit und die Wirtschaftlichkeit.

Die Belastungsgröße wurde bereits in den Bemessungstests ermittelt, und wird bei allen Varianten auf einer Höhe von 2,5m angebracht. Da es sich bei der Belastung durch die Slackline um eine „veränderliche, ungünstig wirkende“ Last handelt, wird sie mit dem Faktor 1,5 multipliziert. Anstatt die Belastungsrichtung exakt in der Neigung der Slackline anzusetzen, wurde sie als horizontal angenommen. Hierdurch befindet man sich bei der Ausnutzung des Systems auf der sicheren Seite.

Zur Ermittlung des optimalen Pfostensystems wurden verschiedene Varianten mit Hilfe des Stabwerksprogrammes „RSTAB“ berechnet. Auf den folgenden Seiten werden ein paar dieser Varianten anschaulich mit den dabei auftretenden Schnittgrößen und Lagerreaktionen dargestellt.



Skizze des statischen Grundsystems

## 5.2) Variantenvergleiche

Hauptsächlich unterscheiden sich die im Rahmen dieser Arbeit befindlichen Varianten nur durch ihre Maße. Hierbei wurde versucht, durch Vergleiche, sowohl die dabei auftretenden Schnittgrößen, als auch die Lagerreaktionen, möglichst klein zu halten.

Als Holzart wird, wie im Spielplatzbau üblich, Robinie verwendet. Hierdurch ist standardmäßig ein Austausch nur alle 10 Jahre angebracht. Um die Holzpfosten schnell und unkompliziert auswechseln zu können, wird der vertikale, eingespannte Stab - wie bereits erwähnt - in eine Kiesbettung eingebracht. Durch Entfernen des Kieskorns kann der Holzpfosten herausgezogen werden, ohne das umringende Betonfundament zu beschädigen.

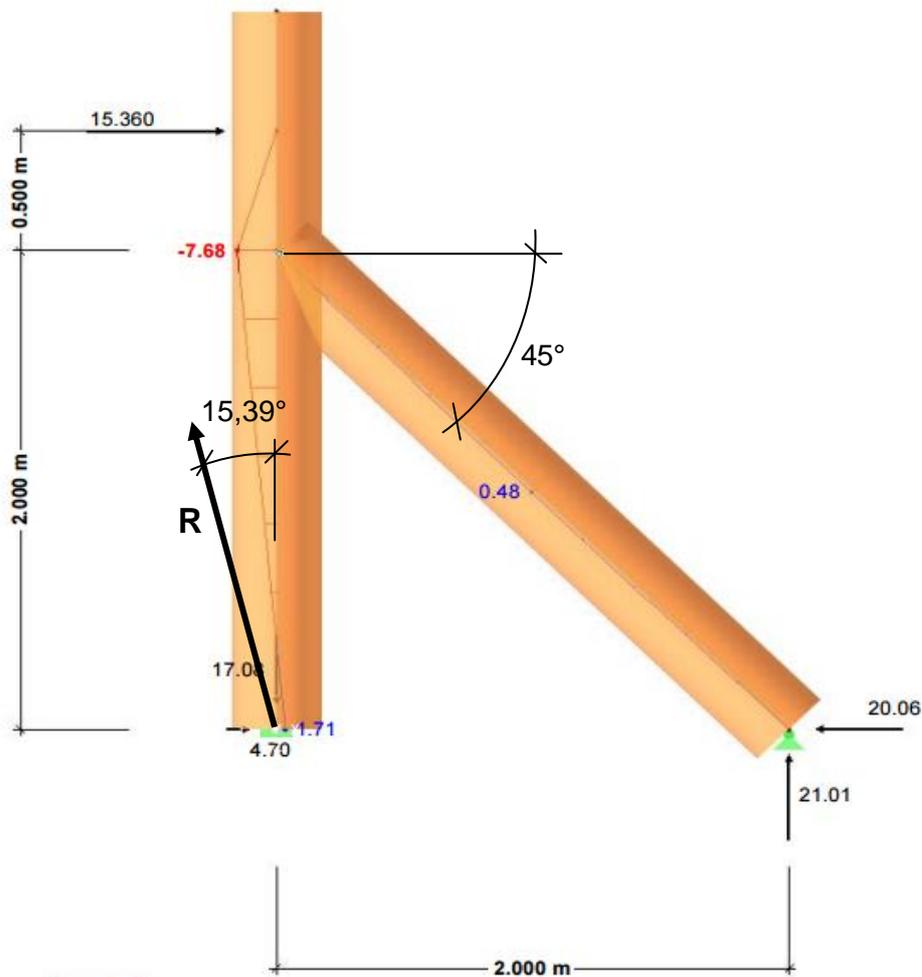
Auf Grund der „gelenkigen“ Verankerung des zweiten, diagonalen Stabes durch die Sihga© Verbindungsplatte, kann auch hier ein müheloser und schneller Austausch erfolgen.

In den folgenden Abbildungen werden die Schnittgrößenverläufe für die Normalkräfte und Verformungen dieser gewählten Variante dargestellt.

Bei den ersten Vergleichen wurde bereits klar, dass die Zugkraft im Fundament des ersten, vertikalen Stabes maßgebend sein wird. Um die Größe dieser Lagerreaktion so klein als möglich zu halten, erwies sich ein flach abstehender diagonaler Stab als hilfreich. Je flacher der Winkel vom zweiten, diagonalen Stab, desto kleiner die Zugkraft im linken Fundament.

Hierbei ist darauf zu achten, dass mit fallendem Winkel des zweiten Stabes sich auch zwangsweise dessen Länge erheblich vergrößert.

## 5.2.1) Variante 1



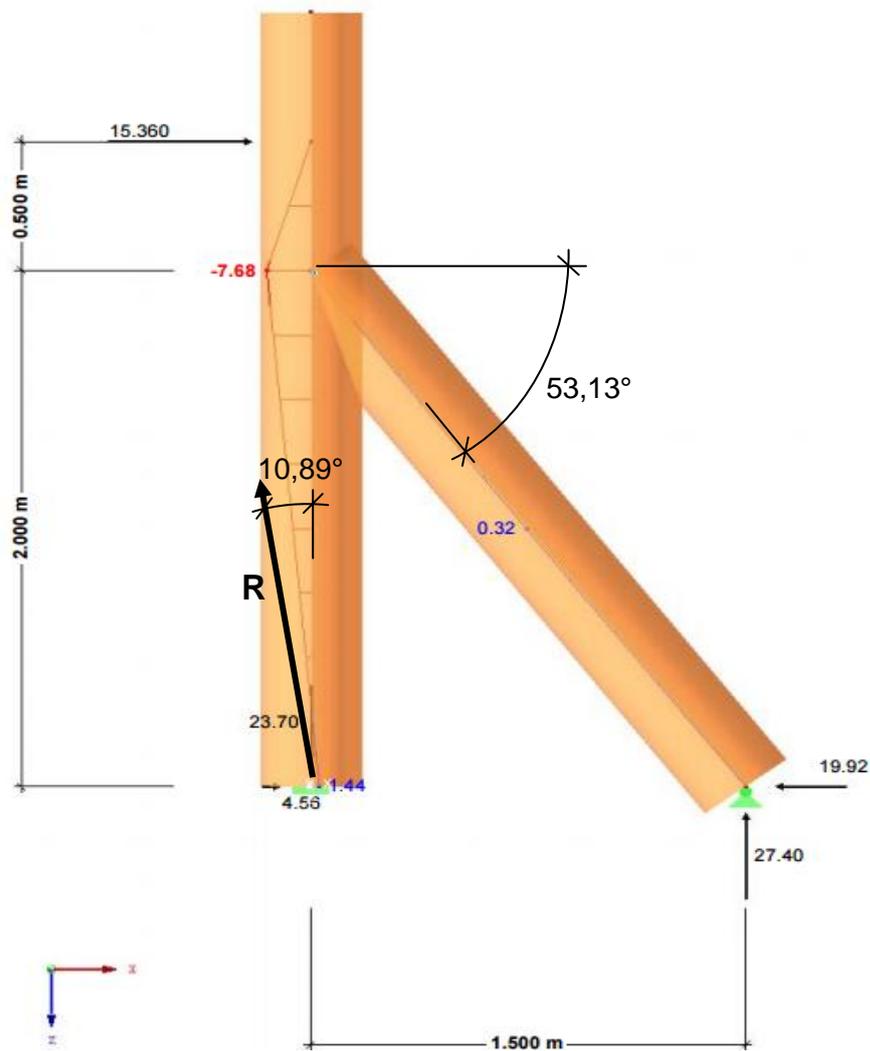
Variante 1, Momentenverläufe [kNm] und Auflagerreaktionen [kN]

Der aussteifende, diagonale Stab wurde in einer Höhe von 2m über dem Boden angesetzt und reicht bis zum Fundament 2m entfernt vom ersten Stab. Die dabei auftretende vertikale Zugkraft im linken Fundament ist groß im Verhältnis zu den anderen Varianten und beträgt 17,08kN.

Durch die geringe horizontale Auflagerkraft im linken Fundament (nur 4,7kN) wirkt die Richtung der resultierenden Kraft „R“ mit einem Winkel von 15,39° sehr steil nach oben. Da dieses Fundament durch die Kiesbettung nur bedingt Zugkräfte aufnehmen kann, wird versucht die Auflagerreaktionen in diesen Punkt möglichst klein zu halten.

Das maximal auftretende Moment ist hingegen relativ klein mit nur 7,68kN.

## 5.2.2) Variante 2



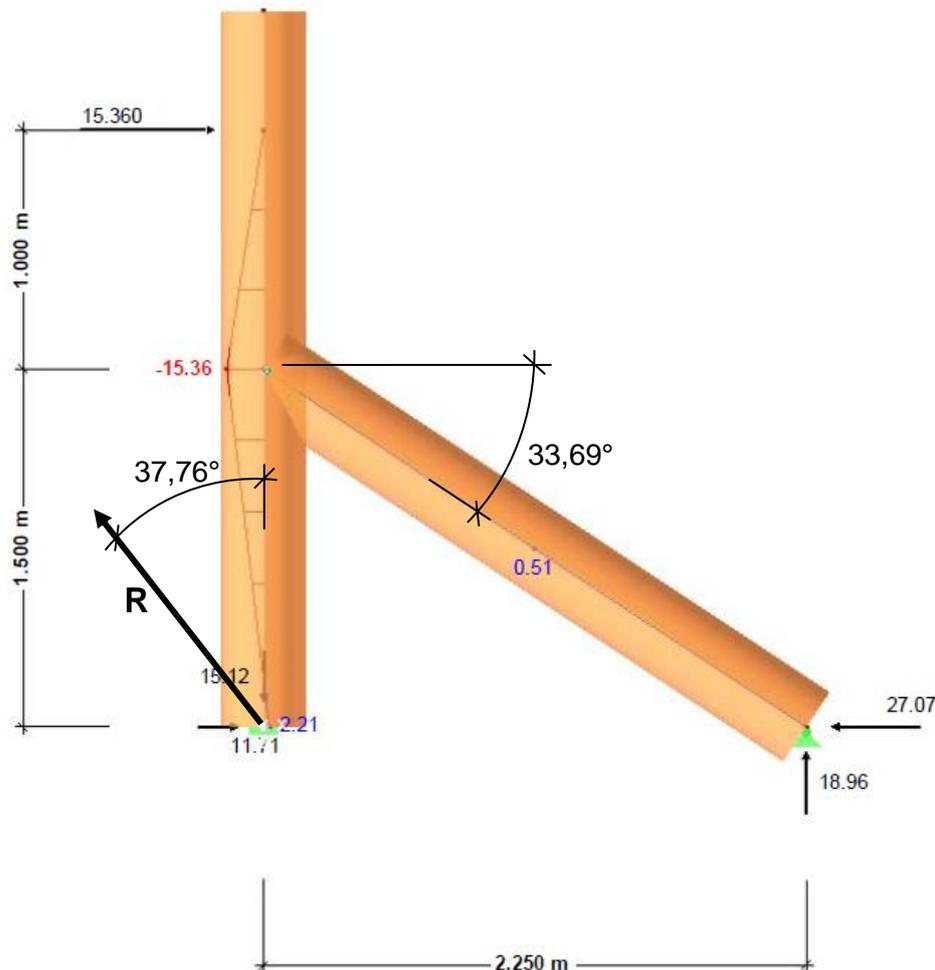
Variante 2, Momentenverläufe [kNm] und Auflagerreaktionen [kN]

Durch eine Steigerung des Winkels vom aussteifenden, diagonalen Stab vergrößert sich dementsprechend auch die vertikale Auflagerreaktion im linken Fundament.

Auf Grund der ungünstigen Auswirkung auf das System, werden Varianten mit solch steilen Aussteifungen nicht weiter behandelt

### 5.2.3) Variante 3

Schlussendlich wurde folgende Variante mit einem flachen Abstehwinkel von  $33,69^\circ$  festgelegt.



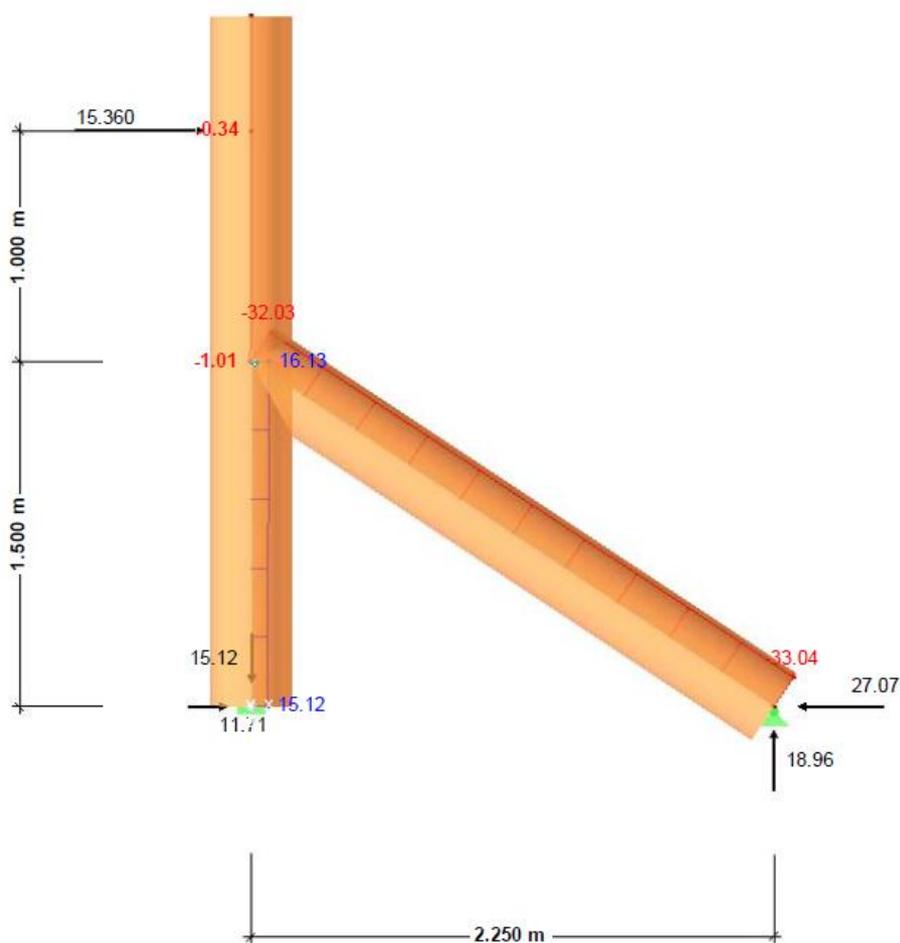
Variante 3, Momentenverteilung [kNm] und Auflagerreaktionen [kN]

Sowohl die maßgebende Auflagerreaktion im linken Fundament, als auch die Länge des diagonal liegenden Stabes wird hierbei im guten Verhältnis klein gehalten.

Die Richtung der resultierenden wirkenden Kraft „R“ im linken Auflager wirkt mit einem Abstehwinkel von  $37,76^\circ$  verhältnismäßig flach. Daraus resultiert eine günstigere Kraftaufnehmbarkeit der Lagerreaktionen im Kiesbettungsfundament.

Das Anbringen der Slackline ist in einer Höhe von 1,5 bis 2,5m über dem Boden möglich, womit auch die Benutzerfreundlichkeit gegeben ist.

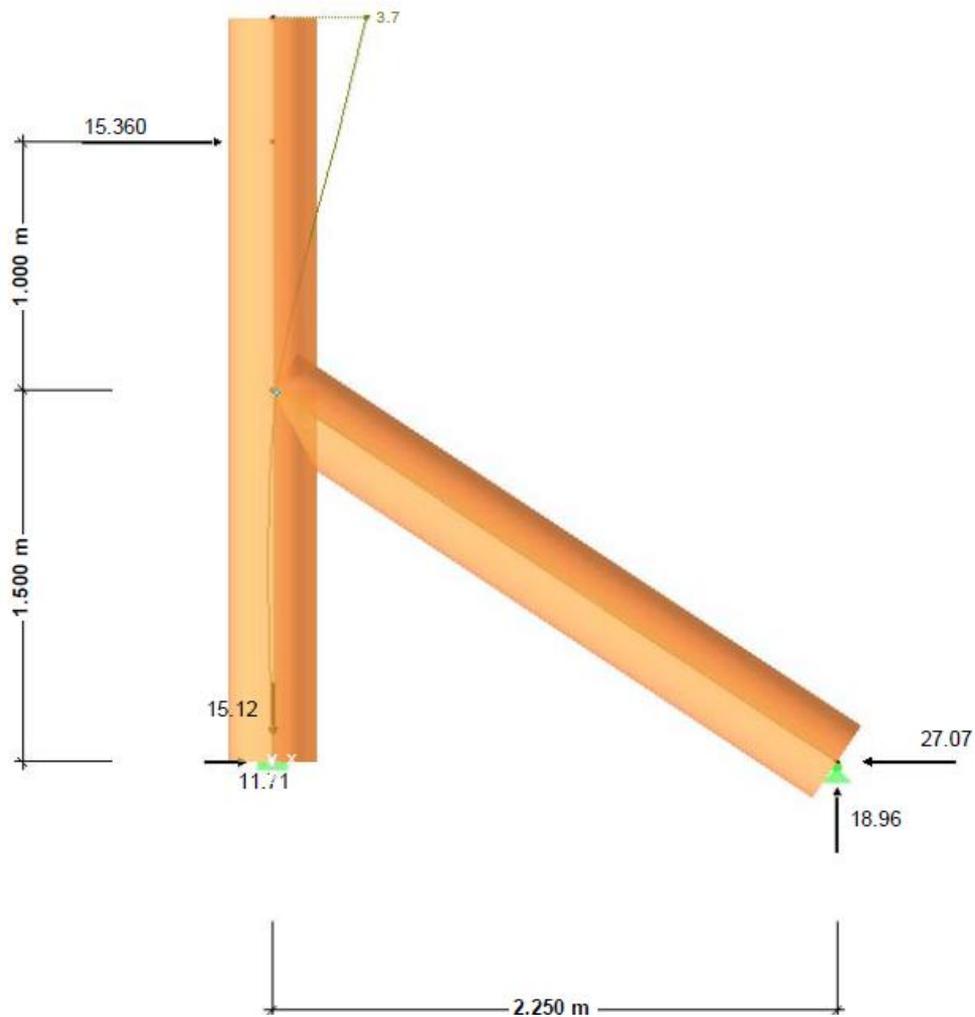
Das maximale Moment ist mit -15,36kNm relativ groß, kann aber durch die hohen Biegefestigkeitswerte von Robinie leicht aufgenommen werden (siehe Berechnung).



*Variante 3, Normalkräfte [kN]*

Die größten Druckkräfte werden im zweiten, diagonalen Pfosten am rechten Auflager erreicht und betragen -33,04kN.

Die größten Zugkräfte hingegen erfährt der erste, vertikale Pfosten am Verbindungspunkt zum zweiten Stab. Mit maximal 16,13kN können auch diese Kräfte sicher in die Fundamente übertragen werden.



*Variante 3, globale Verformungen [mm]*

Die maximale Verformung wird erwartungsgemäß am höchsten Punkt des vertikalen Pfostens erreicht, und beträgt nur 3,7mm.

## 6) Berechnung der gewählten Variante

Alle Berechnungen wurden per Hand nach dem Normenpaket „Eurocode 5 – Holzbau“ durchgeführt. Sie werden auf den folgenden Seiten ausführlich dargestellt.

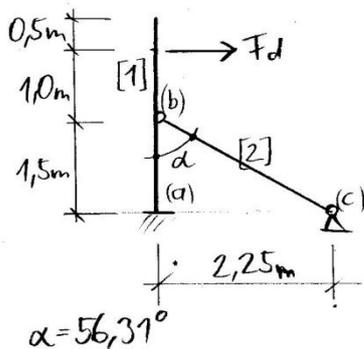
### Berechnung der ausgewählten Variante per Hand

#### Testigkeitswerte von Roburie:

Druckfestigkeit:  $f_{c,0,k} = 65 \text{ N/mm}^2$       Querdruclfestigkeit:  $f_{c,90,k} = 7,2 \text{ N/mm}^2$   
 Zugfestigkeit:  $f_{t,0,k} = 131,5 \text{ N/mm}^2$       Scherfestigkeit:  $f_{v,k} = 14,25 \text{ N/mm}^2$   
 Biegefestigkeit:  $f_{m,k} = 132,0 \text{ N/mm}^2$       Elastizitätsmodul:  $E_{mean} = 13350 \text{ N/mm}^2$   
 $E_{905} = 8900 \text{ N/mm}^2$

- Quellen der Testigkeitswerte:
- Eidgenössische Hochschule Zürich, Institut für Baustoffe, "Physik des Holzes"
  - Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie

#### Statisches Grundsystem:



Charakteristische Last:  $F_k = 10,24 \text{ kN}$

Bemessungslast:  $F_d = 1,5 \cdot F_k = 15,36 \text{ kN}$

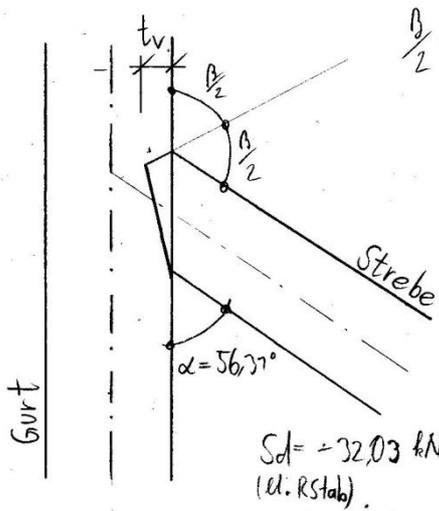
(veränderliche, ungünstige Einwirkung  $\Rightarrow \gamma_Q = 1,5$ )

Einwirkungsduer: "mittel" bis "lang"

Um auf der sicheren Seite zu liegen, wird "lang" gewählt.

Verbindungen:  $\gamma_M = 1,3$

$\alpha \geq 50^\circ \Rightarrow t_v \leq \frac{b}{6} \Rightarrow$  gewähl:  $t_v = 5,83 \text{ cm} \hat{=} 58,3 \text{ mm}$   
 ( $\alpha < 60^\circ$ )



$$\frac{\beta}{2} = 90 - \frac{\alpha}{2} = 61,85^\circ$$

$$t_s = \frac{t_v}{\cos \frac{\alpha}{2}} = 6,61 \text{ cm} \hat{=} 66,1 \text{ mm}$$

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod}}{f_m} \cdot f_{c0,k} = \frac{0,55}{1,3} \cdot 65 = 27,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{c,90,d} = \frac{0,55}{1,3} \cdot 7,2 = 3,05 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$k_{c,90} = 1,0$$

$$f_{c,\frac{\alpha}{2},d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = 4,20 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$t_{v,erf} = \frac{S_d \cdot \cos^2(\frac{\alpha}{2})}{b \cdot f_{c,\frac{\alpha}{2},d}} = 20,00 \text{ mm}$$

$$t_{v,gew} \hat{=} t_{v,erf} \quad \checkmark$$

$$\underline{58,3 \geq 20,0 \text{ mm}}$$

$$N_d = S_d \cos(\frac{\alpha}{2}) = 28,24 \text{ kN}$$

Fläche in Richtung der wirkenden Kraft  $N_d$ :

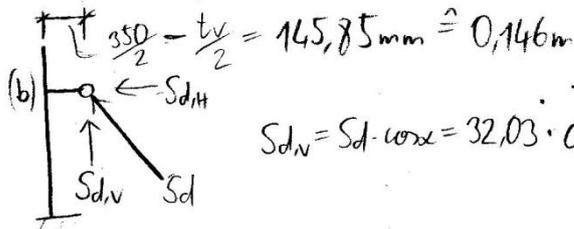


$$\sigma_{c,\frac{\alpha}{2},d} = \frac{N_d}{118,51 \text{ cm}^2} = 0,238 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \hat{=} \underline{2,38 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}$$

Nachweis:  $\sigma_{c,\frac{\alpha}{2},d} \leq f_{c,\frac{\alpha}{2},d}$   
 $2,38 \leq 4,20 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \checkmark$

Ausnutzung: 56,67%

### Einfluss auf das Moment durch außermittige Belastung an Verbindung (b)



$$S_{d,v} = S_d \cdot \cos \alpha = 32,03 \cdot \cos(56,37) = 17,71 \text{ kN}$$

$$M_{Neu,(b)} = -15,36 \text{ kNm} + 0,146 \cdot S_{d,v} = \underline{-12,75 \text{ kNm}}$$

(RSTAB)

Wie erwartet wirkt sich die außermittige Belastung günstig auf das Moment aus. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wird dies vernachlässigt.

### Schubnachweis:

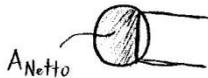
$$f_{v,d} = f_{v,R} \cdot \frac{k_{red}}{f_M} = 14,25 \cdot \frac{0,55}{1,3} = 6,03 \frac{N}{mm^2}$$

Schnittgrößen an Stelle (b), Stab [1]:

$$N = +16,13 \text{ kN (Zug)}$$
$$Q = +15,36 \text{ kN}$$
$$M = -15,36 \text{ kNm}$$

$$\tau_{d} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{A_{Netto}} = 0,272 \frac{N}{mm^2}$$

$A_{Netto} = 847,08 \text{ cm}^2$  (graphisch durch AutoCAD ermittelt)



Schubnachweis:  $\tau_d \leq f_{v,d}$  Ausnutzung: 4,51%

$$0,272 \leq 6,03 \quad \checkmark$$

### Biege-Zug Nachweis:

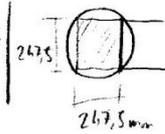
$$f_{t,d} = 137,5 \cdot \frac{0,55}{1,3} = 55,64 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{m,d} = 132 \cdot \frac{0,55}{1,3} = 55,85 \frac{N}{mm^2}$$

$$W_{Netto} = \frac{247,5 \cdot 247,5^2}{6} = 2\,526\,820,37 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{W_{Netto}} = \frac{15,36 \cdot 10^6}{2\,526\,820,37} = 6,08 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{t,d} = \frac{N}{A_{Netto}} = \frac{16,13}{847,08} = 0,019 \frac{N}{mm^2}$$



$\Rightarrow$  Wunde mit stark abgerundeten Werten berechned  $\rightarrow$  sichere Seite!

Biege-Zug Nachweis:  $\frac{\sigma_{t,d}}{f_{t,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$  Ausnutzung: 11%

$$0,11 \leq 1,0 \quad \checkmark$$

### Drucknachweis an Sihga Stegran©-Platte: ( $\varnothing 16 \text{ cm}$ , $r = 8 \text{ cm}$ )

$$\sigma_{c,d} = \frac{F}{A} = \frac{33,04 \text{ kN}}{8^2 \cdot \pi \text{ cm}^2} = 0,164 \frac{kN}{cm^2} \hat{=} 1,64 \frac{N}{mm^2}$$

Drucknachweis:  $\sigma_{c,d} \leq f_{c,d} \Rightarrow 1,64 \leq 27,5 \quad \checkmark$

Ausnutzung: 5,96%

## Stabilitätsnachweis:

### Knicknachweis Stab [2]

$$l_k = l = 3,044 \text{ m} \quad (\text{ll. Plan})$$

$$\lambda_y = \lambda_z = \lambda = \frac{l_k}{i} = 40,59$$

$$\text{QS-Fläche: } A = r^2 \cdot \pi = 150^2 \cdot \pi = 70685,84 \text{ mm}^2$$

$$\text{Trägheitsmoment: } I = \frac{r^4 \cdot \pi}{4} \quad (\text{Kreis})$$

$$I_z = I_y = I = 397607820,2 \text{ mm}^4$$

$$i_y = i_z = i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \underline{75,0 \text{ mm}}$$

$$\lambda_{\text{red}} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{k_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \underline{1,679}$$

$$k_y = k_z = k = 0,5 (1 + \beta_c (\lambda_{\text{red}} - 0,3) + \lambda_{\text{red}}^2) = \underline{k = 2,047}$$

$$\beta_c = 0,2 \quad (\text{bei Vollholz})$$

$$k_{c,y} = k_{c,z} = k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{\text{red}}^2}} = \underline{0,311}$$

ll. RStab wirkt im Stab [2] ein maximales Moment von 0,51 kNm

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{F}{A} = \frac{33,04 \text{ kN}^{\text{max N}}}{70685 \text{ cm}^2} = \underline{0,47 \text{ N/mm}^2}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M}{W} = \frac{0,51 \cdot 10^6 \text{ Nm}}{\frac{\pi \cdot d^3}{32} \cdot 300 \text{ mm}} = \underline{0,192 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Widerstandsmoment Kreis: } \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$\text{Knicknachweis: } \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0$$

$$\sigma_{m,y,d} = \sigma_{m,z,d}$$

$$f_{m,y,d} = f_{m,z,d}$$

$$k_m = 1,0 \quad (\text{bei Vollholz})$$

10

$$\underline{0,024 \leq 1,0} \quad \checkmark$$

Ausnutzung: 2,4%

## 7) Darstellung ideales Pfostensystem

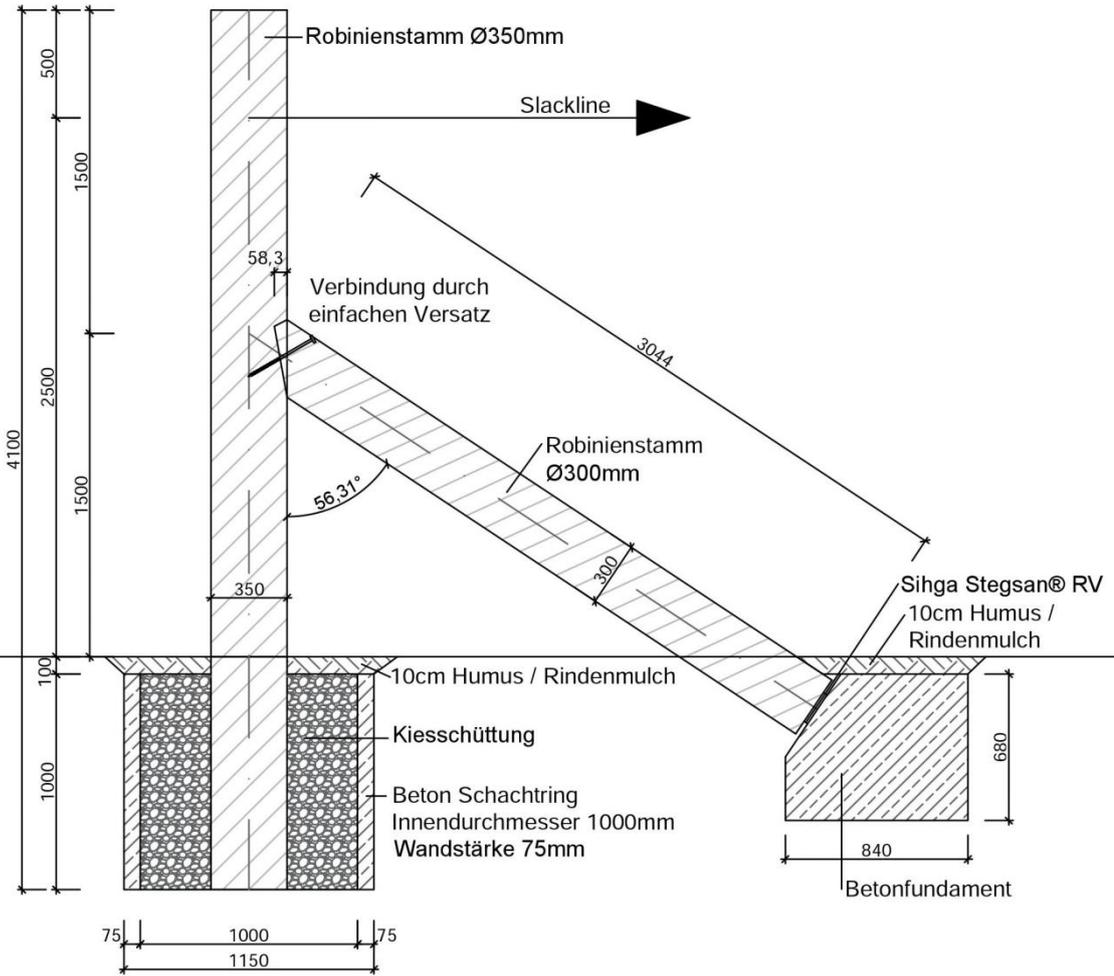
Schlussendlich konnte ein Plan zum „Idealen Pfostensystem“ gezeichnet werden, der alle notwendigen Maße und Details zum Bau beinhaltet.

Die Kraftübertragung im Knotenpunkt der beiden Stäbe erfolgt über einen einfachen Stirnversatz. Die zusätzliche Holzschraube dient zur Lagesicherung, um ein mögliches Risiko des Verrutschens der Pfosten zu verhindern.

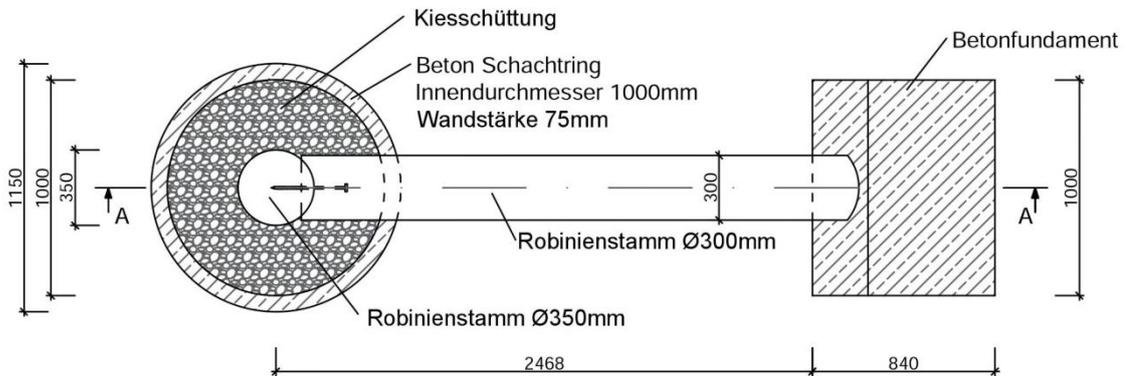
Zur passenden Darstellung der Holzkonstruktion wurde der im technischen Bereich unübliche Maßstab 1:30 verwendet. Somit kann sowohl die Draufsicht, als auch der Schnitt A-A anschaulich auf einer A4 Seite dargestellt werden.

# Schnitt A-A

Maße in mm



# Draufsicht



## 8) Zusätzliche Variante für die Befestigung von zwei Slacklines

Um auch die Möglichkeit zu bieten zwei Slacklines an einem Pfostensystem zu befestigen, wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit noch diese besondere Variante hinzugefügt.

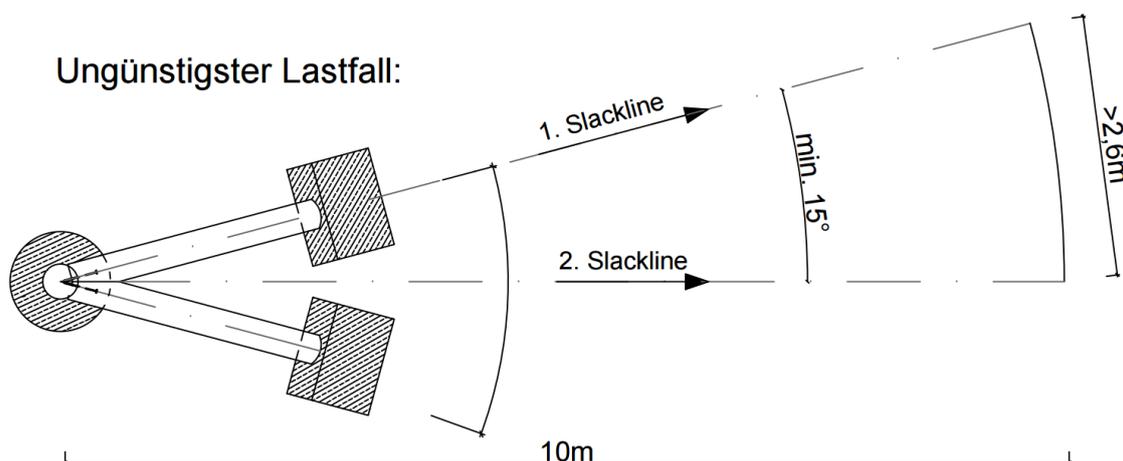
Die daraus resultierenden Vorteile zwei Slacklines an demselben Pfostensystem zu befestigen, sind unter anderem die Material- und Aufwandsersparnis. Somit können die Material- und Baukosten minimiert werden, ohne die Sicherheitsreserven zu verlieren.

### 8.1) Maßgebender Lastfall für zusätzliche Variante

Theoretisch ist der maßgebende Lastfall dann erreicht, wenn beide Slacklines in die exakt selbe Richtung zeigen und dabei beide gleichzeitig dynamisch belastet werden. Praktisch ist dieser Lastfall unmöglich, da sich die zwei Slacklines gegenseitig im Weg stehen und somit zum balancieren ungeeignet sind.

Aus diesem Grund wird der ungünstigste Lastfall wie folgt angenommen:

Der horizontale Winkel zwischen zwei gespannten Slacklines muss für die sichere Benützung der Bänder mindestens  $15^\circ$  betragen. Erst ab diesen Winkel kann ein angebrachter Sicherheitsabstand beim Balancieren eingehalten werden. Dieser beträgt ab einem Abstand von 10m vom Pfosten mindestens 2,6m und steigt mit wachsender Entfernung.



*Draufsicht des maßgebenden Lastfalls. Beide Slacklinebänder sind belastet und ihre Richtungen weisen einen Differenzwinkel von nur  $15^\circ$  auf.*

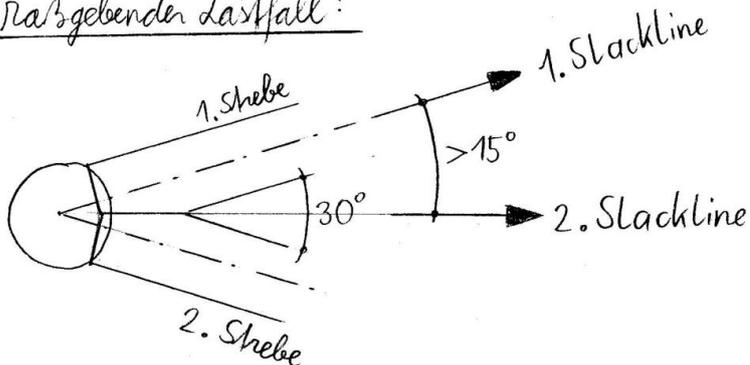
Der geplante Longlinepark wird so strukturiert, dass die horizontalen Winkel zwischen den gespannten Slacklinebändern mindestens  $15^\circ$  aufweisen.

## 8.2) Berechnung der zusätzlichen Variante

### 8.2.1) Berechnung

Berechnung der zusätzlichen Variante zur Befestigung von zwei Slacklines

maßgebender Lastfall:



1. Slackline:  $F_{1,d} = Q_{R,1} \cdot \gamma_{Q,1} = 10,24 \cdot 1,5 = 15,36 \text{ kN}$  (Leiteinwirkung)

2. Slackline:  $F_{2,d} = Q_{R,2} \cdot \gamma_{Q,2} \cdot \psi_{0,2} = 10,24 \cdot 1,5 \cdot 0,7 = 10,752 \text{ kN}$   
Kombinationsbeiwert (Begleiteinwirkung)

Die Belastung durch die 2. Slackline wirkt exakt mittig zwischen den zwei ausstehenden Stäben.

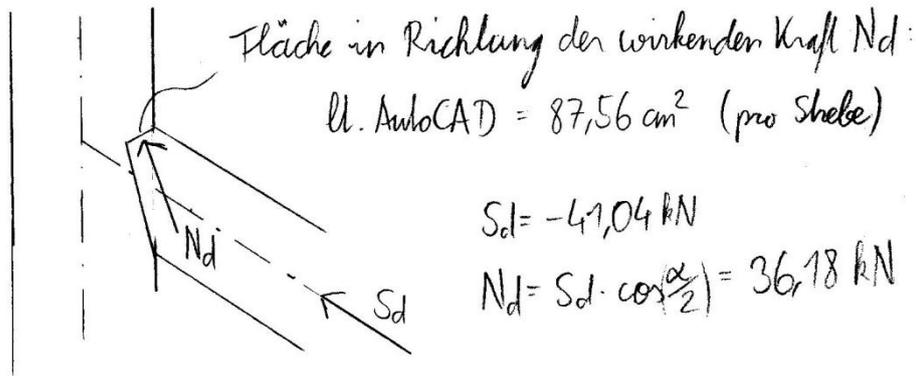
Symmetriebedingt teilt sich dadurch die Belastung auf beide Stäben auf.

Daraus folgt: Die maximale Belastung in Richtung der ersten Stäbe ergibt sich durch:

$$F_{1,d} + \frac{F_{2,d}}{2} = 15,36 + \frac{10,752}{2} = \underline{\underline{20,74 \text{ kN}}}$$

Berechnung mit Hilfe von RSTAB ergibt eine Normalkraft in der Stäbe, am Verbindungspunkt von  $-41,04 \text{ kN}$ . (Druck)

$\Rightarrow \underline{\underline{S_d = -41,04 \text{ kN}}}$



$$\sigma_{c, \frac{\alpha}{2}, d} = \frac{N_d \left[ \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \right]}{87,56 \left[ \text{cm}^2 \right]} = 4,13 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{c, \frac{\alpha}{2}, d} = 4,20 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nachweis:  $\sigma_{c, \frac{\alpha}{2}, d} \leq f_{c, \frac{\alpha}{2}, d}$

$4,13 \leq 4,20 \checkmark$       Ausnutzung: 98%

Schubnachweis:

Schnittgrößen an Stelle (b), Stab 1 (Gurd):

$N = 27,09 \text{ kN}$  (Zug)

$Q = 26,11 \text{ kN}$

$M = -26,11 \text{ kNm}$

Schnittgrößen hervorgerufen durch:

$F_{1,d} + F_{2,d} = 15,36 + 10,752 = \underline{26,11 \text{ kN}}$

$f_{v,d} = 6,03 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Schubnachweis:  $\tau_d \leq f_{v,d}$

$0,49 \leq 6,03 \checkmark$       Ausnutzung: 8,08%

### Biege-Zug Nachweis:

$$W_{\text{Netto}} = 2\,526\,820,31 \text{ mm}^3 \quad (\text{stark abgemindertes Widerstandsmoment})$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M}{W_{\text{Netto}}} = \frac{26,11 \cdot 10^6}{2\,526\,820,31} = 10,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{m,d} = 55,85 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{t,o,d} = \frac{N}{A_{\text{Netto}}} = \frac{27,09 \text{ kN}}{803,99 \text{ cm}^2} = 0,34 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{t,o,d} = 55,64 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Biege-Zug Nachweis: } \frac{\sigma_{t,o,d}}{f_{t,o,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1,0$$

$$\underline{0,19 \leq 1,0} \quad \underline{\text{Ausnutzung: } 19\%}$$

### Drucknachweis an Sihga Stegran ©-Platte: ( $\varnothing 16 \text{ cm}$ , $r = 8 \text{ cm}$ )

$$\sigma_{c,o,d} = \frac{F}{A} = \frac{42,05}{8^2 \cdot \pi} = 2,09 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Drucknachweis: } \sigma_{c,o,d} \leq f_{c,o,d}$$

$$\underline{2,09 \leq 27,5} \quad \underline{\text{Ausnutzung: } 7,6\%}$$

### Stabilitätsnachweis:

Auf Grund der minimalen Ausnutzung von nur 2,4% beim letzten Knicknachweis, wird dieser Nachweis als nicht maßgebend betrachtet und vernachlässigt.

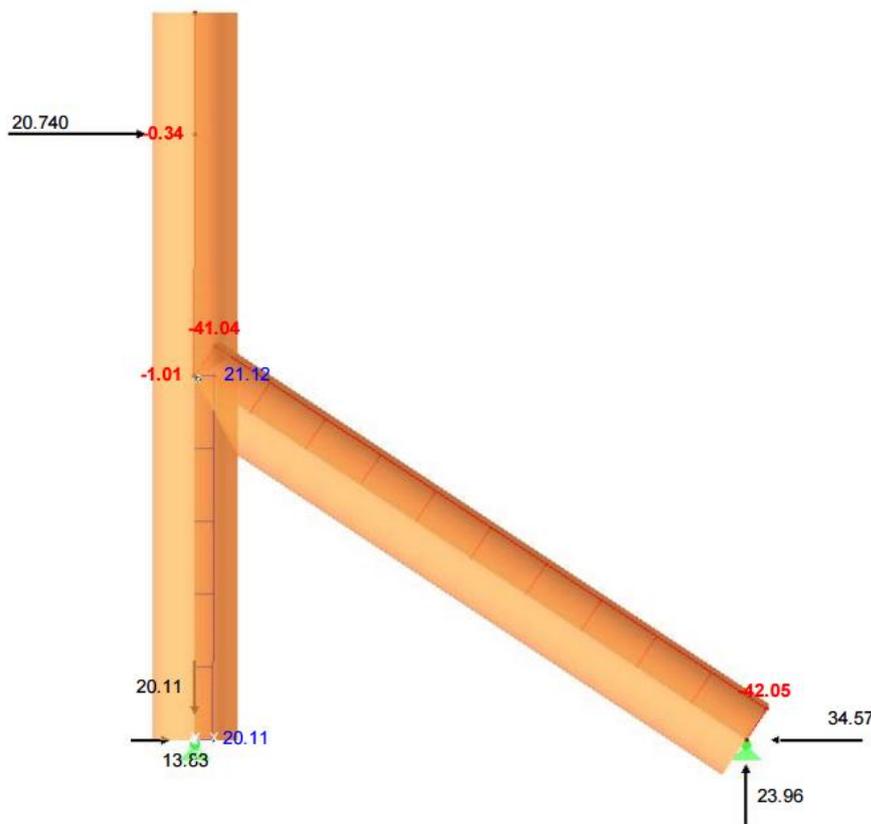
## 8.2.2) Erläuterung zur Berechnung

Für die Berechnung der diagonalen Streben wurde folgende maximale Belastung ermittelt:

$$F_{1,d} + F_{2,d}/2 = 15,36 + 10,75/2 = \underline{20,74 \text{ kN}}$$

Hinweis: Es wird angenommen, dass das erste gespannte Slacklineband exakt in Richtung der ersten Strebe zeigt und somit die komplette daraus resultierende Belastung von dieser ersten Strebe aufgenommen wird. Das zweite Band wirkt exakt mittig zwischen den Streben, wodurch sich dessen Belastung auf beide Streben aufteilt. (siehe Berechnung und Skizze „Ungünstigster Lastfall“)

Die daraus resultierenden Normalkräfte in der maximal belasteten Strebe wurden mit Hilfe von RSTAB berechnet und bereits in den Berechnungen mit einbezogen.



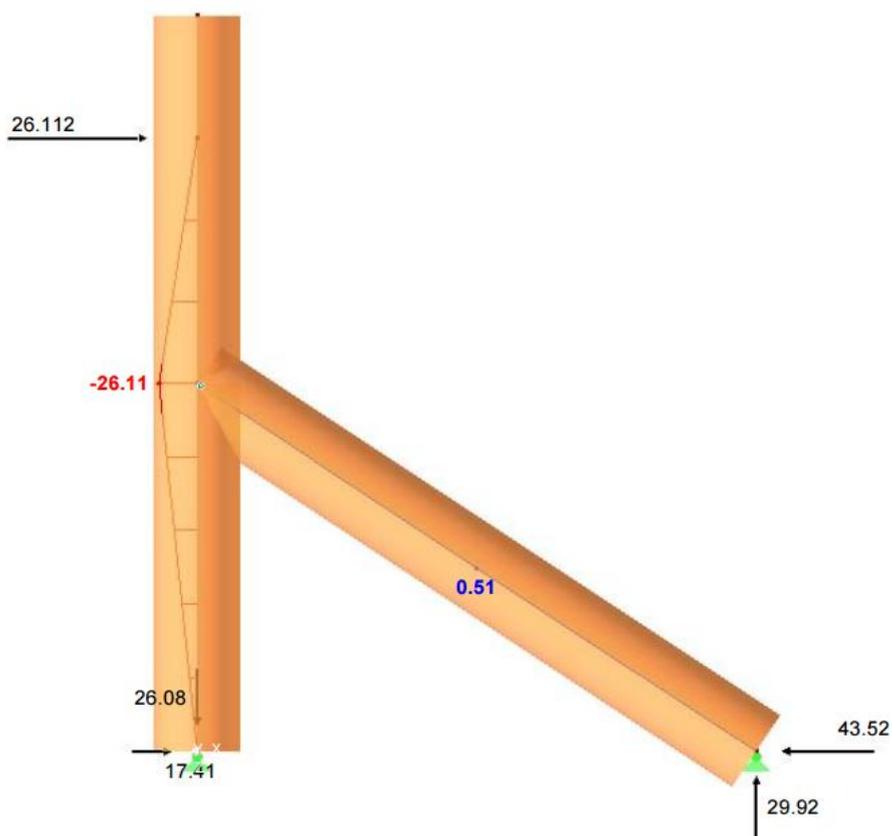
Normalkraftverlauf [kN] - Maximal auftretende Normalkräfte in den Streben: -42,05 kN

Für die Berechnung des vertikalen Gurts wurde folgende maximale Belastung ermittelt:

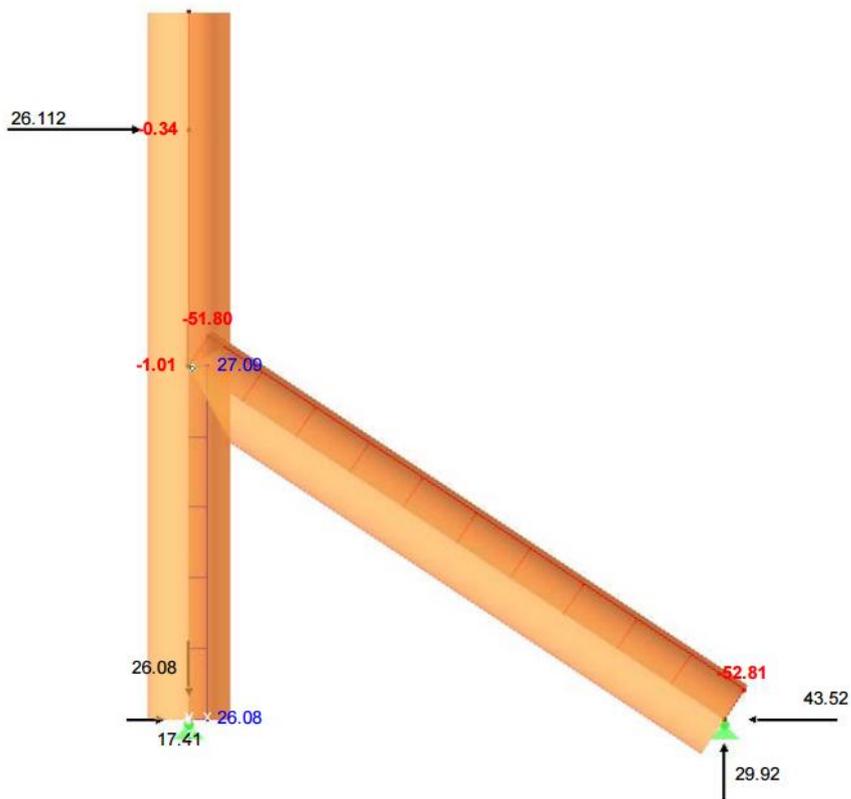
$$F_{1,d} + F_{2,d} = 15,36 + 10,75 = \underline{26,11 \text{ kN}}$$

Hinweis: Um auf der sicheren Seite zu liegen, wurde der 15° Differenzwinkel zwischen den Slacklines vernachlässigt, und einfach die Summe der zwei Belastungen ermittelt.

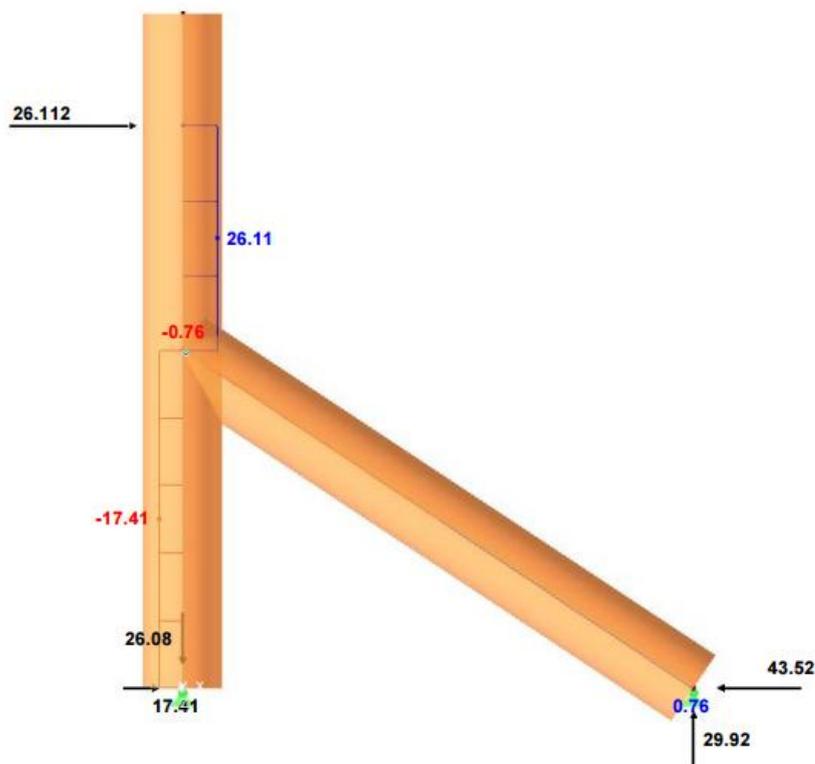
Daraus resultieren folgende maximalen Schnittgrößenverläufe und Verformungen, die bereits in den Berechnungen mit einbezogen wurden.



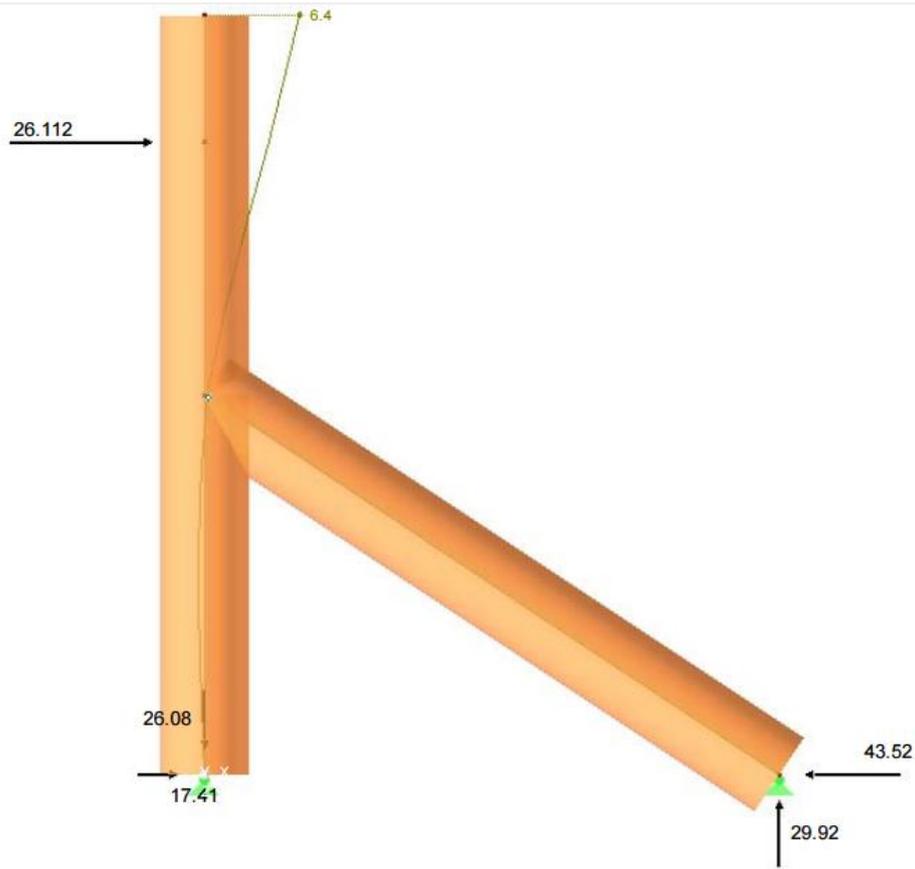
*Momentenverlauf [kNm], Maximal auftretende Momente im vertikalen Gurt: -26,11 kNm*



*Normalkraftverlauf [kN], Maximal auftretende Normalkraft im vertikalen Gurt: 26,08 kN*

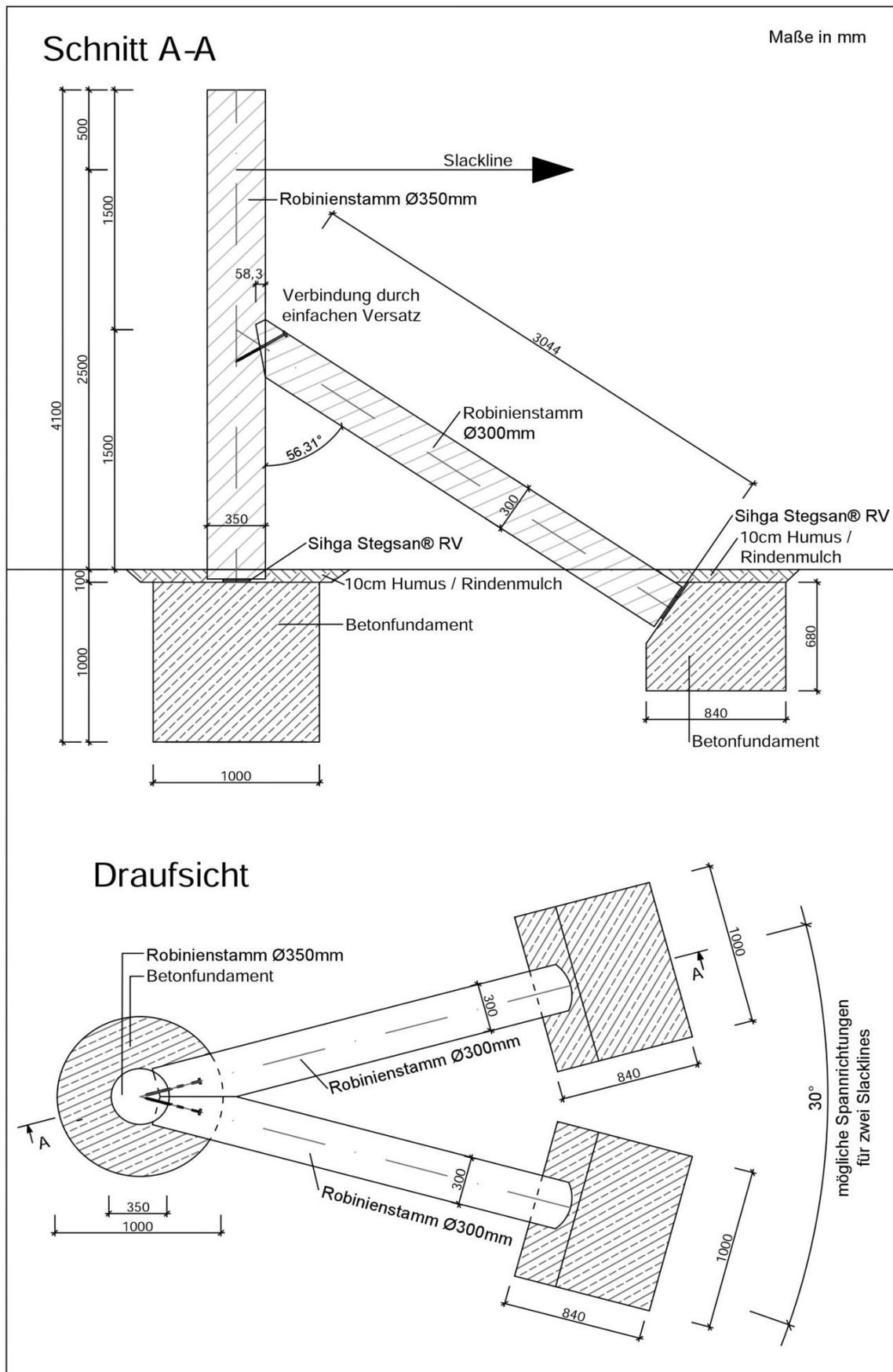


*Querkraftverlauf [kN], Maximal auftretende Querkraft im vertikalen Gurt: 26,11 kN*



*Globale Verformungen [mm], Maximale Verformung des vertikalen Gurtes: 6,4mm*

### 8.3) Darstellung der zusätzlichen Variante

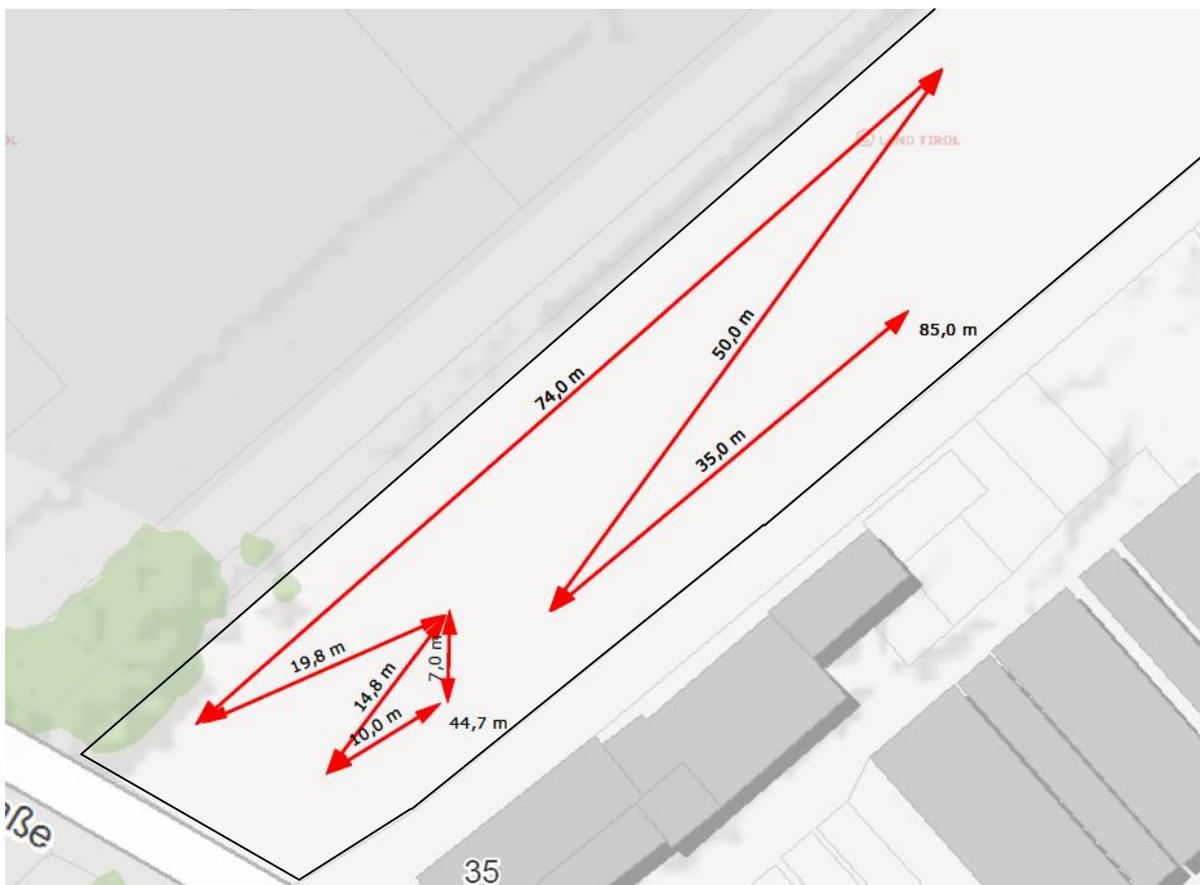


## 9) Strukturierung und Lage des Longlineparks

In einem Besprechungstermin mit dem Grünanlagenamt Innsbruck konnte ein Grundstück im Stadtteil Reichenau gefunden werden, das für den Bau des Longline-Parks optimal ist. Im folgenden Plan ist dieses Grundstück mit Hilfe des Online-Kartendienstes Tiris dargestellt.

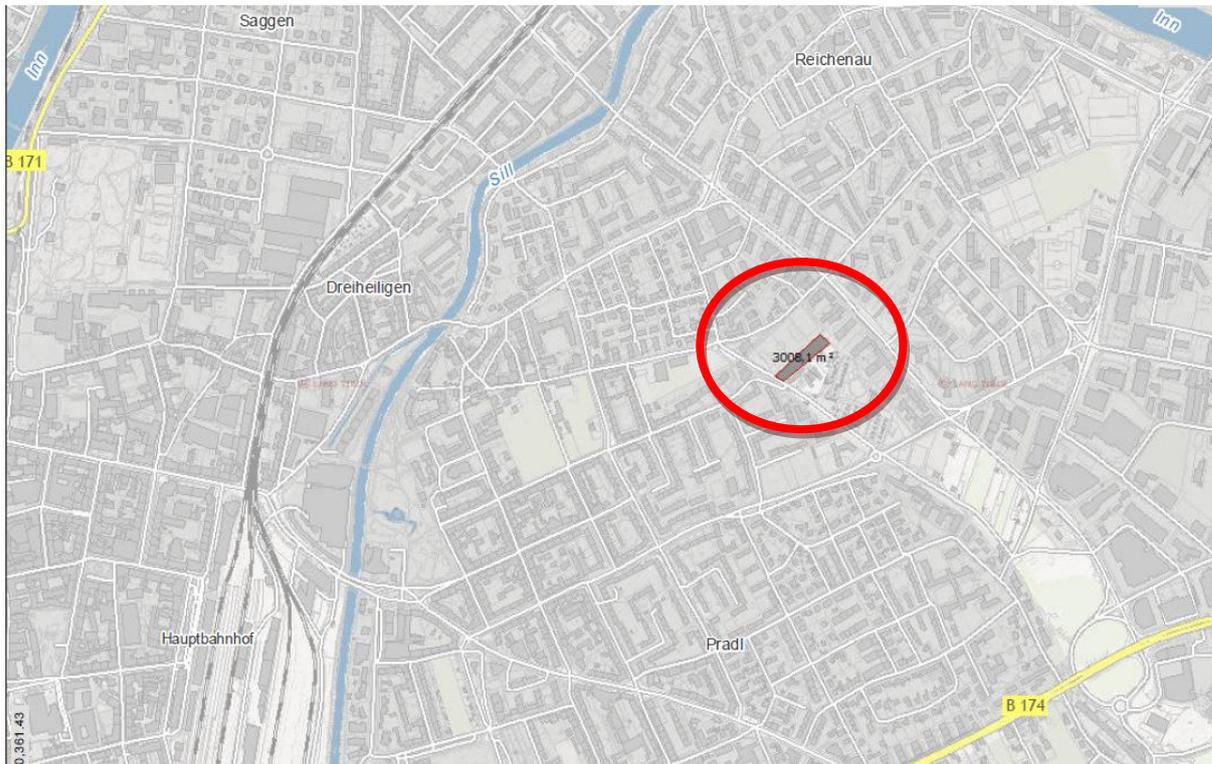
Der eingezeichnete Aufbau des Longlineparks ist nur eine von vielen Möglichkeiten zur Strukturierung des Parks. Bei der Planung wurde darauf Rücksicht genommen, nie mehr als 2 Slacklines pro Pfosten anzuspannen, um die Sicherheiten des Systems nicht zu überschreiten. Ebenso sind die dargestellten Spannweiten abgestuft eingezeichnet, um möglichst viele verschiedene Längen zum Balancieren zu bieten.

Neben den großen Spannweiten von 35 bis 74m befinden sich auch kürzere Spannweiten mit unter 20m auf dem geplanten Gelände.



*Detailplan Parkaufbau auf ausgewähltem Grundstück im Stadtteil Reichenau an der Egerdachstraße*

Auf der folgenden Übersichtskarte kann die Position des geplanten Longlineparks besser dargestellt werden.



*Übersichtskarte zur Darstellung der Position des geplanten Longlineparks im Stadtteil Reichenau an der Egerdachstraße*

Direkt nebenan befindet sich das Sportcafe und der Sportplatz Reichenau. Somit liegt der Park bereits in einem sportlich genutzten Gebiet, was sich ebenfalls positiv auf die Positionierung auswirkt.

## Literaturverzeichnis

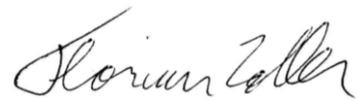
- 1) Resources, S. S. (7. Februar 2008). *http://slack.e30tuner.com*. Von <http://slack.e30tuner.com>: [http://slack.e30tuner.com/articles\\_linetension.php](http://slack.e30tuner.com/articles_linetension.php) abgerufen
- 2) Slacklineverband, Ö. (5. April 2017). *Slacklineverband.com*. Abgerufen am 7. April 2017 von [Slacklineverband.com](http://www.slacklineverband.com): <http://www.slacklineverband.com/know-how/slackline-vergleich-dehnung/>
- 3) Slacktivity. (8. Februar 2014). Forces in Slacklines xxx. Zürich, Zürich, Schweiz.

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

11.4.2017

\_\_\_\_\_  
Datum



\_\_\_\_\_  
Unterschrift