Messbericht Kreisbund

Belastungsversuch zur Bestimmung der Festigkeit von Kreisbünden

Version:
1.0

Datum:
05.02.2020

Autor:
Christof Baeriswyl

Management Summary:
Der vorliegende Messbericht untersucht die Belastung von Kreisbünden. Dazu wurden zwei Rundhölzer mittels Kreisbund verbunden und anschliessend wurde die Verbindung belastet. Der Bericht geht auf die Frage ein, ob die Windungen des Kreisbundes unabhängig voneinander betrachtet werden können und ob die Tragfähigkeit des Kreisbundes und Anzahl der Windungen in einem linearen Verhältnis stehen. Die Testresultate übertrafen die Lehrmeinungen und Erwartungen der Autoren signifikant und liefern neue Möglichkeiten für preiswerte Holzverbindungen in der Praxis.

1 Messaufgabe

Der vorliegende Messbericht untersucht die Belastung von Kreisbünden. Dazu wurden zwei Rundhölzer mittels Kreisbund verbunden und anschliessend wurde die Verbindung belastet.

Mit dem Messversuch soll insbesondere auf zwei Thesen eingegangen werden, die das Verhalten eines Kreisbund unter Belastung beschreiben:

1. Nur die Seilstücke der oberen Windungen sind belastet und daher tragen auch nur diese zur Zugfestigkeit bei.
2. Die Seilstücke der Windungen haben unterschiedliche Weglängen, dadurch werden nicht alle Seilstücke gleich stark belastet und es wird keine Linearität zwischen der *Anzahl der Windungen* und der *Zugfestigkeit* erreicht.

Die Messungen wurde am 02.02.2019 im Prüflabor der Firma neue Holzbau AG in Lungern durchgeführt. Aufgrund des Messaufbaus konnten Messfehler nicht ausgeschlossen werden, worauf wir eine Validierung der Messresultate mit einem geänderten Messaufbau am 01.02.2020 in Muttenz durchführten. Dieser Bericht enthält beide Messversuche.

1.1 Anfertigen eines Kreisbundes

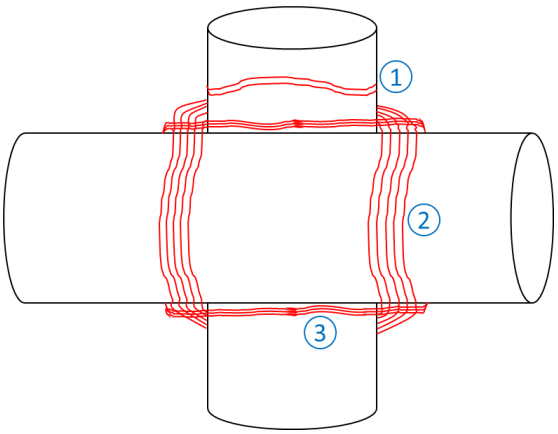


Abbildung 1: Kreisbund an einem Träger (waagrecht liegendes Rundholz) und an einer Stütze (stehendes Rundholz)

Wir knüpfen unsere Kreisbünde gemäss der Anleitung vom Buch «kennen + können» [1]. Wir zitieren an dieser Stelle die Anleitung mit freundlicher Genehmigung des Verlages:

«Der Kreisbund dient dem rechtwinkligen Verbinden zweiter Stangen. Begonnen wird an der senkrecht stehenden Stange mit einem Mastwurf (1). Die Touren werden so gelegt, dass sie satt aneinander anliegen und einander nie überkreuzen (2). Mit einigen Kreistouren zwischen den Stangen (3) wird das Ganze zusammengezogen. Zum Schluss das Ende mit dem beim Mastwurf liegenden Anfang verknoten.
Bei Rundhölzern empfiehlt es sich, die Berührungsstellen vorher einzukerben.»

Anmerkungen: Kreisbünde knotet man am besten zu zweit, sodass immer Zug auf dem Seil ist und der Bund auch unbelastet bereits straff anliegt. Den Arbeitsschritt (3) nennen wir **würgen**, die Anzahl Kreistouren **Würgungen**. Die beiden Enden werden mit einem Samariter verknotet und mit einem zweiten Samariter gesichert (ein **doppelter Samariter**).

[1] Manfred Kaderli et al., “kennen + können”. 5. überarbeitete Auflage, © 2018 by rex verlag luzern. ISBN 978-3-7252-0999-6

Teil 1
Belastungsversuch 02.02.2019

2 Messobjekt

Das Messobjekt besteht jeweils aus drei Komponenten. Ein Rundholz Ø22-25cm dient als Stütze, auf welches ein weiteres Rundholz Ø18-22cm als Träger mit einem Kreisbund fixiert wird. Die Anzahl der Windungen der Kreisbünde variiert jeweils und ist bei den entsprechenden Messresultaten mitspezifiziert. Die Kreisbünde sind jeweils in Vertikalrichtung nach innen geschlagen, sodass die jeweils nächste Windung näher am Auflagepunkt der beiden Rundhölzer ist; in der Horizontalrichtung sind sie nach aussen geschlagen; vgl. Abbildung 2. Gewürgt wurde mit einer Handsteigklemme.

Abbildung 2: Messobjekt

2.1 Seil

Bei den verwendeten Seilen handelt es sich um halbstatische gedrehte Seile:

Bez.	Durchmesser	Material	Zugfestigkeit gemäss Lieferant	Lieferant
Seil 1	11mm	Polyester PES	2075kg	Seilerei
Seil 2	6mm	Polypropylen	580kg	Seilerei

Abbildung 3: Kreisbünde mit Seil 1 (weiss-gelb, links) und Seil 2 (orange, rechts)

3 Messaufbau

3.1 Schematische Zeichnung des Messaufbaus

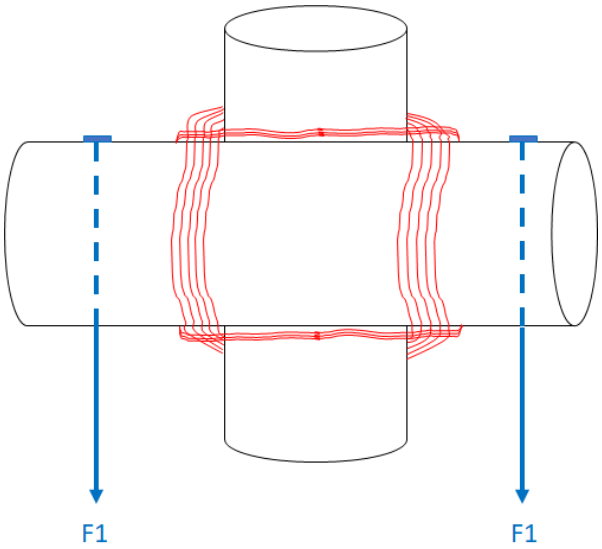


Abbildung 4: Schematische Zeichnung des Messaufbaus. Die Anzahl der Windungen des Kreisbundes variieren je nach Messreihe. Zwei Gewindestangen sichern das Rundholz gegen axiale Drehung; an diese wird die Kraft F1 mittels zweier Zylinder (Z1, Z2) appliziert. Die Kraft wird indirekt über den Öldruck mit einem Manometer (M1) gemessen.

3.2 Messprozedur

1. Zwei Rundhölzer mit einem Kreisbund miteinander verbinden und einspannen
2. Kraft F1 (10kN) applizieren
3. F1 sukzessive erhöhen, sodass sich ein Weg von 1cm/min ergibt. Kraft und Weg jeweils in regelmässigen Abständen notieren.
4. Bis zur Zerstörung fortfahren.

3.3 Messmittelliste

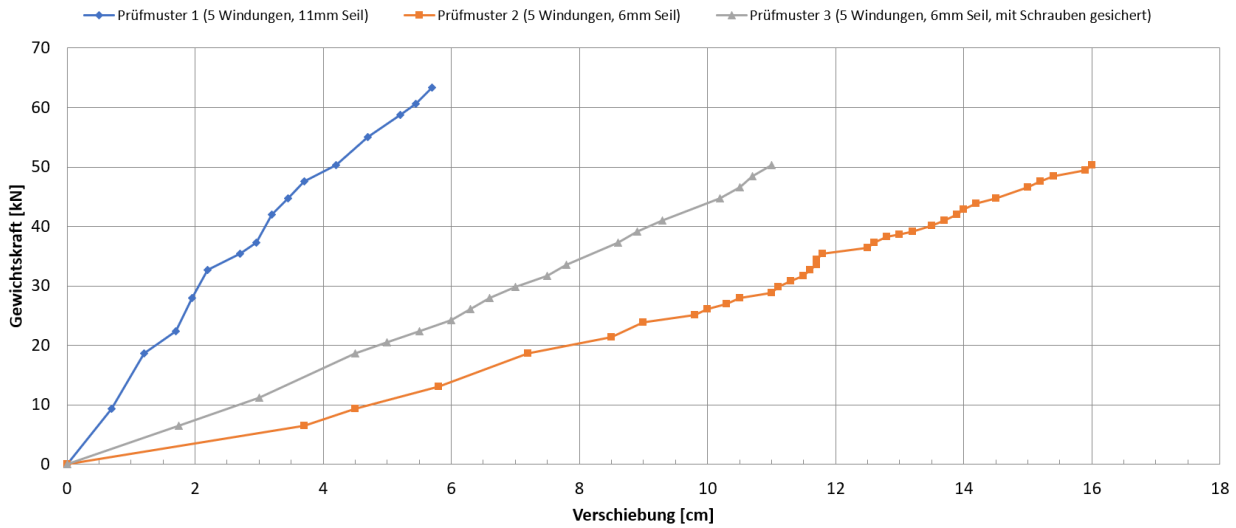
Bez.	Bezeichnung	Typ
Z1,Z2	Zylinder	RCH-306, Enerpac
M1	Manometer	Enerpac

3.4 Umgebungsbedingungen

Umgebungstemperatur: Laborbedingungen, 21˚C

4 Messresultate

4.1 Weg-Kraft-Diagramme



4.2 Belastungsgrenzen

Prüfmuster	1	2	3	4
Seil	11mm	6mm	6mm	6mm
Windungen	5	5	5, mit Schrauben gesichert gegen Abrutschen	3, mit Schrauben gesichert gegen Abrutschen
Maximalkraft	63.4 kN	55.9 kN	93.2 kN	75.5 kN
Testabbruch aufgrund	Keine optische Veränderung erkennbar; zu starkes Seil für Testaufbau.	Starke vertikale Verschiebung des Kreisbundes, zu hohe Wege für Testaufbau.	Zerstörung des Trägers (Rundholz)	Seilriss

4.3 Fotos der getesteten Kreisbünde

Abbildung 5: Prüfmuster 1. Zu beachten ist einerseits die vertikale Verschiebung (der Träger war ursprünglich auf Höhe der oberen Windungen) und das Einschnüren des Seiles in die Stütze beim rechten Bildausschnitt.

Abbildung 6: Prüfmuster 2. Links: unbelasteter Kreisbund; rechts: belasteter Kreisbund. Zu beachten ist die sehr starke vertikale Verschiebung und andererseits das Abrutschen des Kreisbundes.

Abbildung 7: Prüfmuster 2. Abrutschen des Kreisbundes und Abschaben der Rinde an der Stütze.

Abbildung 8: Prüfmuster 3. Links: mit Schrauben gesicherter Kreisbund gegen Abrutschen. Rechts: Unbelasteter Kreisbund.

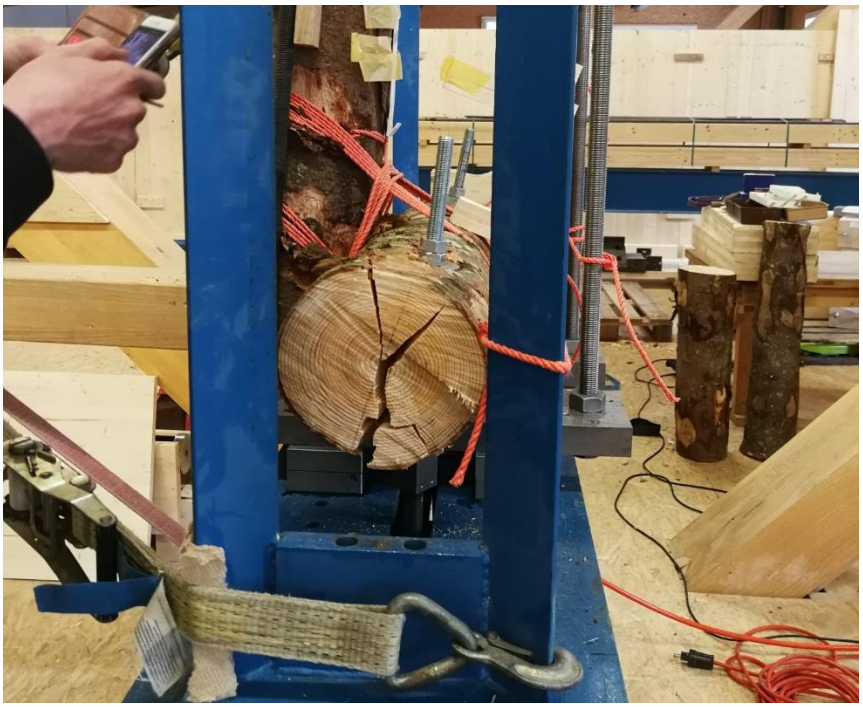


Abbildung 9: Prüfmuster 3. Zerstörung des Rundholzes bei einer Maximalkraft von 93 kN.

5 Interpretation der Messresultate

5.1 Thesen

Im Vorfeld der Tests stellten wir zwei Thesen auf, wie sich ein Kreisbund unserer Vorstellung nach verhalten sollte bei Belastung:

1. Nur die Seilstücke der oberen Windungen sind belastet und daher tragen auch nur diese zur Zugfestigkeit bei.
2. Die Seilstücke der Windungen haben unterschiedliche Weglängen, dadurch werden nicht alle Seilstücke gleich stark belastet und es wird keine Linearität zwischen der *Anzahl der Windungen* und der *Zugfestigkeit* erreicht.

Diese zwei Thesen stellten sich als **falsch** heraus. Die gemessenen Werte bei der Zugfestigkeitsprüfung waren erstaunlich hoch und unerwartet; sie stellen viele bisherige Praxiswerte in Frage. In den folgenden Abschnitten wird auf einige bemerkenswerte Punkte näher eingegangen:

5.2 Verschiebung des Kreisbundes in der Vertikalen

Abbildung 10: Verschiebung des Kreisbundes in der Vertikalen; der Bund rutscht sowohl bei den oberen wie auch bei den unteren Windungen des Pfostens.

Die Kreisbünde rutschten bei hohen Belastungen. In Abbildung 10 lässt sich sehr gut erkennen, dass sowohl die oberen wie auch die unteren Windungen bei Belastung nach unten rutschen. Da auch die unteren Windungen rutschen, impliziert das, dass diese ebenfalls stark belastet werden.
Diese Tatsache wiederlegt These 1.

Um dem Rutschen entgegenzuwirken, haben wir Schrauben mit Unterlagsscheiben als Fixierung verwendet, sodass die Windungen jeweils nur ca. 2-3cm rutschten und dann auf den Schrauben aufliegen.
Beim getesteten Seil handelt es sich um ein Polypropylenseil mit einer Dehnung von 2% bei 100kg. Bei einer Seillänge von 10m, die im Kreisbund mit 3 Windungen verwendet wurde, entspricht dies einer Längenausdehnung von 0.20m bei 100kg. Unter Annahme des hook'schen Gesetzes erhalten wir bei einer Belastung von 500kg somit eine Ausdehnung von 1.0m. Aufgeteilt auf 12 Seilstücke (je 3 pro Seite; je unten und oben)

erhalten wir somit eine mögliche Längenausdehnung von 8.3cm pro Seilstrang, dadurch ergibt sich eine theoretische Verschiebung von 17cm (vgl. Abbildung 11). Eine Verschiebung des Kreisbundes in der Grössenordnung von 15cm konnten wir messen; das Resultat scheint daher realistisch. Die hohe Längenausdehnung führt dazu, dass sämtliche oberen Seilstränge des Kreisbundes gleichmässig belastet werden.

Diese Tatsache wiederlegt These 2.

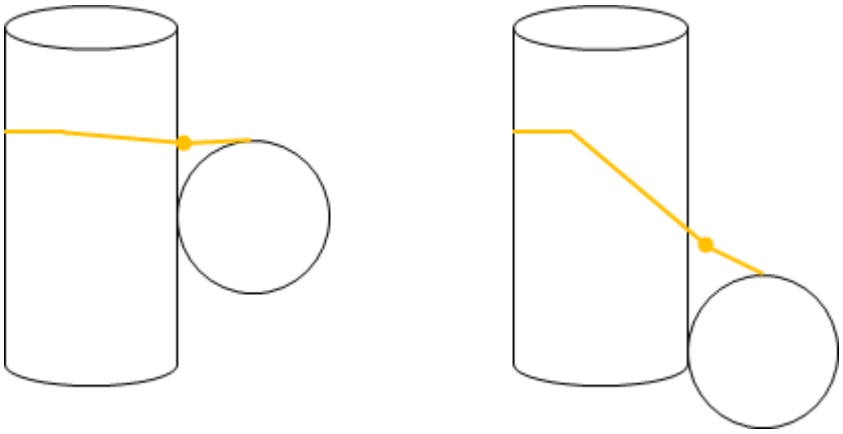


Abbildung 11: unbelasteter Kreisbund (links) und belasteter Kreisbund (rechts). Der Seilstrang ist um 8cm verlängert, wodurch sich eine vertikale Verschiebung von 17cm ergibt.

5.3 Einschnüren der Seilwindungen in das Rundholz

Abbildung 12: Einschnüren der Seilwindungen in die Rinde des Trägers

Der Seildurchmesser beträgt 6mm. Bei hohen Belastungen schnüren sich die jeweiligen Seilwindungen fast komplett in die Rinde ein, wie in Abbildung 12 erkennbar. Dadurch erhöht sich der Reibungskoeffizient massiv; wir mussten nach den Tests, nach dem Aufschneiden der Kreisbünde, die Seile regelrecht aus der Rinde herausziehen.

5.4 Berechnung der Tragfähigkeit

Das 6mm-Seil hat gemäss Herstellerangabe eine Zugfestigkeit von 580daN. Ein Zugversuch mit Achter ergab eine Zugfestigkeit von 570daN. Die Zugfestigkeit ohne Achter lag bei Tests bei rund 800daN.
Prüfmuster 4 (Kreisbund mit 3 Windungen) erlitt bei einer Belastung von 75.5kN einen Seilriss. Das würde bedeuten, dass alle 6 Seilstücke praktisch unabhängig voneinander zu betrachten sind (Annahme 800daN pro Seilstück) und auch die Seilstücke unterhalb des Kreisbundes wesentlich belastet werden (Annahme 400daN).

Dies führt zu folgenden Kräften:

$$n_{Windungen} := 3$$

$$F_{obere,Seilstücke} := 8\ \mathrm{kN}$$

$$F_{untere,Seilstücke} := 4\ \mathrm{kN}$$

$$F_{tot} := n_{Windungen} \cdot 2 \cdot F_{obere,Seilstücke} + n_{Windungen} \cdot 2 \cdot F_{untere,Seilstücke} = 72\ \mathrm{kN}$$

Diese 72kN sind sehr nahe an den gemessenen 75.5kN. In Abbildung 10 ist ersichtlich, dass der untere Kreisbund auch belastet wird – das Resultat ist daher nachvollziehbar, wenngleich auch erstaunlich.

5.5 Mögliche Messfehler

Aufgrund des Messaufbaus ist es nicht auszuschliessen, dass die beiden Rundhölzer aneinandergedrückt wurden. Falls das passiert ist, sind die Messresultate verfälscht worden aufgrund der Reibung zwischen den beiden Rundhölzern.

6 Fazit

Die gemessenen Werte der Festigkeitsprüfung waren erstaunlich hoch und unerwartet. Da sich die Resultate stark von den Lehrmeinungen und den Erwartungen der Vereinsmitglieder unterscheiden, sind sie unbedingt zu verifizieren mit einem zweiten Test mit geändertem Testaufbau.

6.1 Nächste Tests

- Resultate der Festigkeit der Kreisbünde validieren mit geändertem Testaufbau

Teil 2
Belastungsversuch 01.02.2020

7 Messobjekt

Siehe Abschnitt 2.
Stütze: Rundholz Ø21cm
Träger: Rundholz Ø22cm
Seil: gedrehtes Seil aus Polypropylen, Ø=6mm (Seil 2 gemäss Abschnitt 2.1)

8 Messaufbau

8.1 Schematische Zeichnung des Messaufbaus

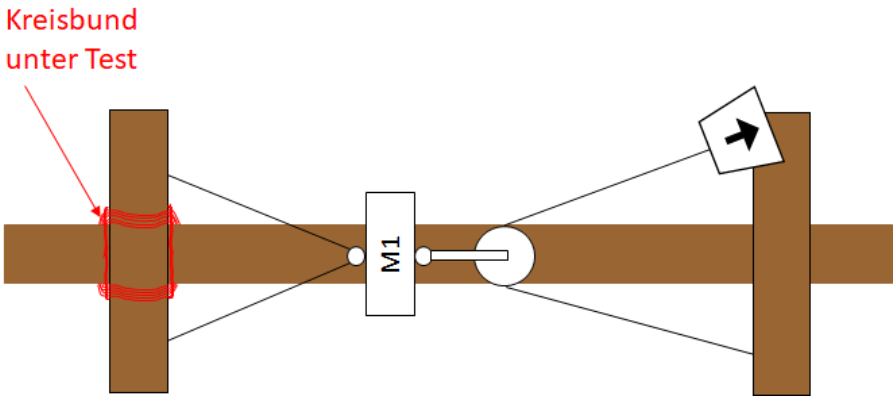


Abbildung 13: Schematische Zeichnung des Messaufbaus. Die Zugkraft wird mit einem Drahtseilzug appliziert, der über eine Umlenkrolle mit dem Rest des Messsaufbaus verbunden ist. Die Kraft wird mit einem Kraftmessgerät (M1) gemessen.

8.2 Messprozedur

1. Zwei Rundhölzer mit einem Kreisbund miteinander verbinden und einspannen
2. Zugkraft mittels Drahtseilzug applizieren
3. Zugkraft sukzessive erhöhen, sodass sich ein Weg von 1cm/min ergibt. Kraft und Weg jeweils in regelmässigen Abständen notieren.
4. Bis zu einer Kraft von 60kN fortfahren.

8.3 Messmittelliste

Bez.	Bezeichnung	Seriennummer
M1	Kranwaage BKT electronics, MAX 12t	MaSo 2012106

8.4 Umgebungsbedingungen

Temperatur 14˚C, rel. Luftfeuchtigkeit 85%, Luftdruck 980mbar; windgeschützt

9 Messresultate

9.1 Weg-Kraft-Diagramme

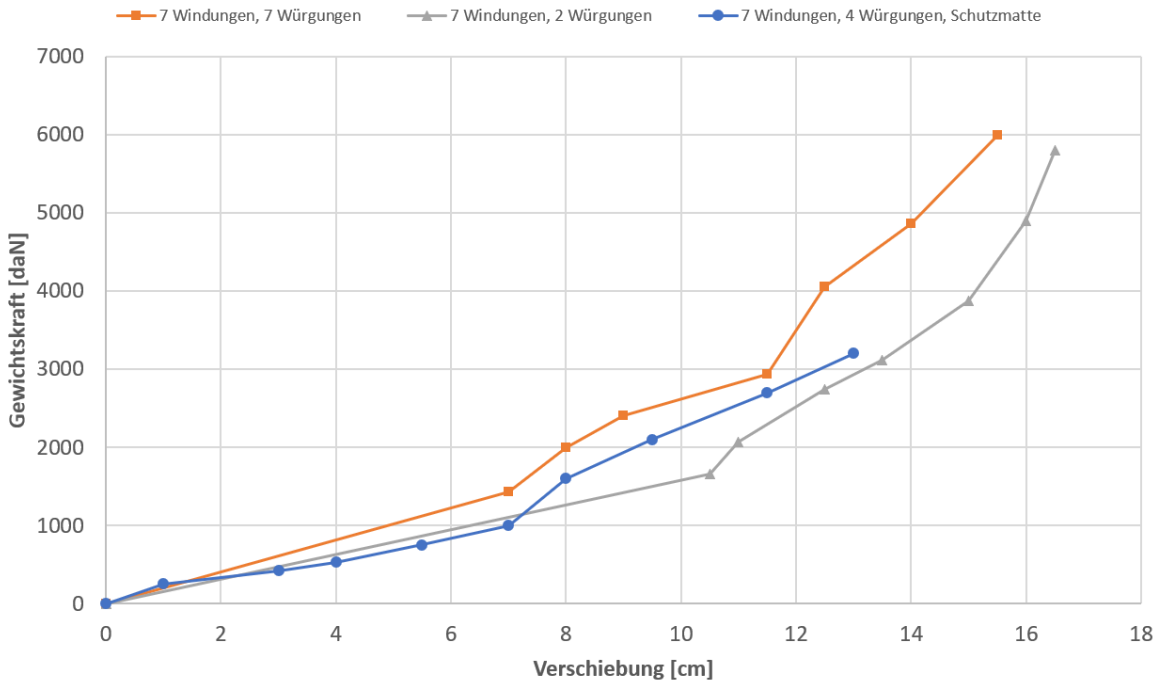


Abbildung 14: Weg-Kraftdiagramm für Kreisbünde von Rundholz (Träger) Ø=22cm auf Rundholz (Stütze) Ø=21cm

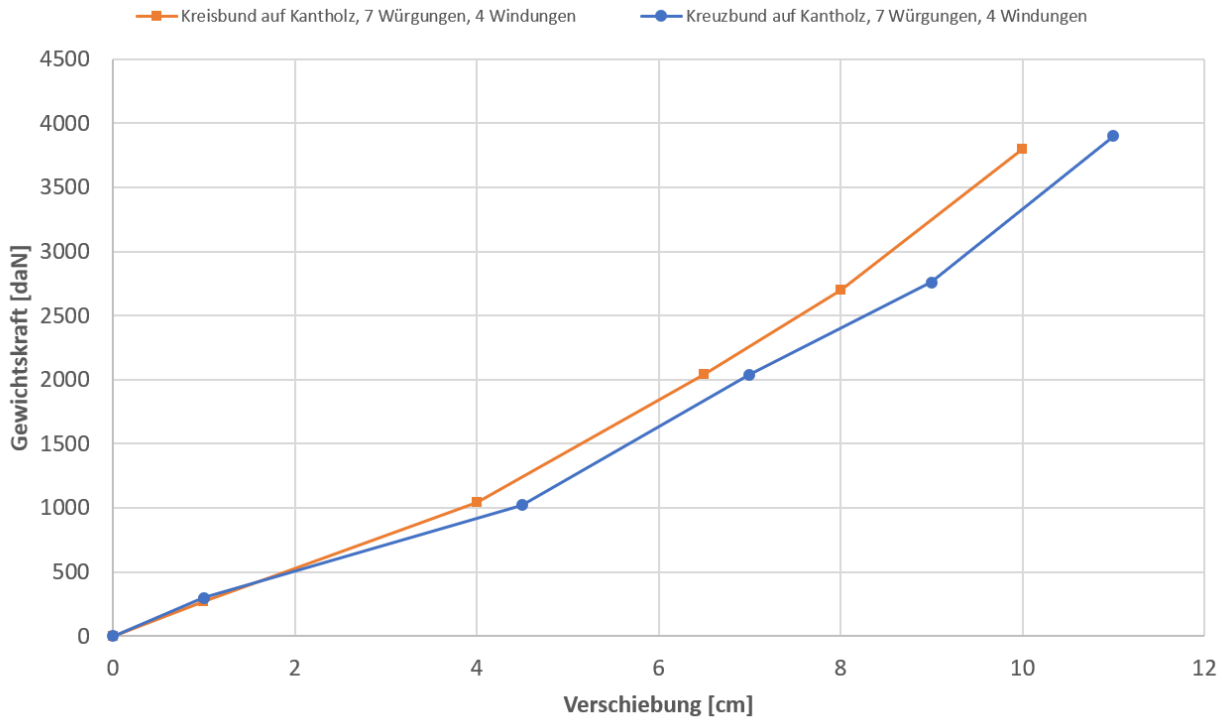


Abbildung 15: Weg-Kraftdiagramme für Kreisbund und Kreuzbund von Kantholz (Träger) 12x12cm auf Rundholz (Stütze) Ø=22cm

9.2 Fotos vom Versuchsaufbau

Abbildung 16: Gesamtaufbau. Der Kreisbund unter Test ist links unten im Bild dargestellt. Die Zugkraft wird mittels eines Drahtseilzuges appliziert und in der Mitte des Versuchsaufbaus umgelenkt und gemessen.

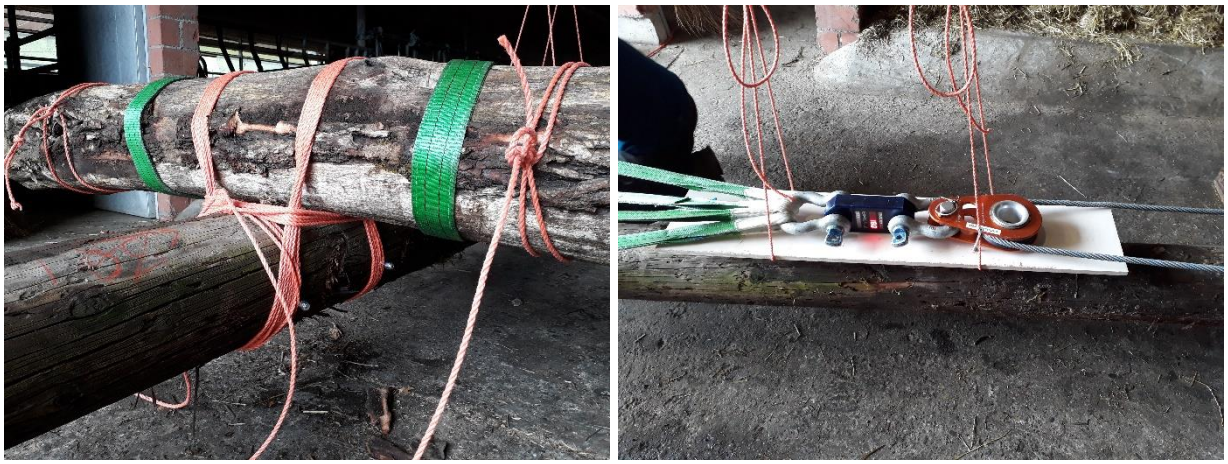


Abbildung 17: Links: Kreisbund unter Test mit 7 Windungen und 7 Würgungen; rechts: Kraftmessgerät

Abbildung 18: Links: Befestigung Drahtseilzug am Versuchsaufbau; rechts: Rückhaltung Hilfsträger

9.3 Fotos von den getesteten Kreisbünden

Abbildung 19: Links: Kreisbund mit 7 Windungen und 7 Würgungen vor der Belastung. Der Bund ist mit total 4 Schrauben gegen Abrutschen an der Stütze gesichert. Rechts: Belastung mit 2310kg. Die vertikale Verschiebung des Bundes ist deutlich sichtbar.

Abbildung 20: Links: Kreisbund mit Gummimatte unter Belastung; rechts: Abdrücke an Gummimatte nach Test.

Abbildung 21: Links: Kreisbund mit Kantholz 12x12cm unter Belastung; rechts: Detail des Eindrückens des Kreisbundseiles in das Kantholz. Ein Fasen der Kanten hilft wesentlich, die Scherkräfte zu reduzieren.

Abbildung 22: Links: Kreuzbund mit Kantholz 12x12cm; rechts: Unterseite des Bundes. Das Kantholz rutscht über die Würgungen.

10 Interpretation der Messresultate

10.1 Vergleich der beiden Belastungsversuche

Beim Belastungsversuch am 02.02.2019 erreichten wir eine Maximalkraft (Seilriss) von 75kN bei einem Kreisbund mit 3 Windungen. Der zweite Versuchsaufbau ermöglichte eine Maximalkraft von 60kN. Ein Kreisbund mit 3 Windungen hielt dieser Belastung aus und es trat kein Seilriss auf. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der erste Versuchsaufbau die Messresultate maximal 20% verfälscht hat.

10.2 Einfluss der Anzahl Windungen

Wie bereits in Abschnitt 5.4 erläutert, scheint die Tragfähigkeit des Bundes linear mit der Anzahl Windungen zuzunehmen. Zudem verkleinert sich die vertikale Verschiebung mit der Anzahl Windungen und das Einschnüren in die Rundhölzer nimmt ebenfalls ab mit der Anzahl der Windungen.

Für die Praxis ist sicher die vertikale Verschiebung der Plattform von Interesse. Die Kräfte auf einen Kreisbund für eine Plattform von 3m x 4m lassen sich wie folgend abschätzen:

$P := 5 \frac{kN}{m^2}$ (Belastung, u.a. durch Personen)

$A := 3\ m \cdot 4\ m$ (Begehbare Fläche der Plattform)

$m_{Plattform} := 1500\ kg$ (Masse der Plattform, u.A. Balken und Bretter)

$F_{tot} := m_{Plattform}\ g_e + P \cdot A = 74{,}71\ kN$ (Gesamtkraft, wirkend auf alle 4 Kreisbünde)

$F_{Kreisbund} := \frac{F_{tot}}{4} = 18{,}6775\ kN$ (Kraft pro Kreisbund)

Eine Kraft von 18.67kN führt gemäss Abbildung 14 zu einer vertikalen Verschiebung von knapp 8cm bei einem **Kreisbund mit 7 Windungen und 7 Würgungen**. Werden die Geländer aus Kantholz 15cm x 4cm realisiert, so ergibt sich für die Fussleiste des höheren Geländers ein Spalt von 23cm. Gemäss Suva-Dokument 44006.d darf die Distanz maximal 30cm betragen; es ist daher eine ausreichende Sicherheitsreserve vorhanden.

10.3 Einfluss der Anzahl Würgungen

Eine grosse Anzahl Würgungen führt dazu, dass der Kreisbund bei geringen Belastungen weniger Verschiebung in die Vertikale hat (er «rutscht» weniger), was meist erstrebenswert ist. In der Praxis ist bei Pfetten (untere Trägerlage einer Plattform) ein symmetrisches Rutschen auf beiden Seiten sicherlich vorteilhaft, damit die Plattform gerade bleibt. Die Anzahl Windungen sollte daher gleich sein.

An dieser Stelle soll nochmals auf die Wichtigkeit des doppelten Samariters (Kreuzknoten) eingegangen werden. Wie in Abbildung 19 ersichtlich, wird der Samariter stark belastet bei einer Kraft von 23kN. Tests mit diesem gedrehten Polypropylenseil haben ergeben, dass ein einfacher Samariterknoten komplett durchrutschen kann. Das **Nachsichern** des Knotens ist daher **zwingend**.

10.4 Kreisbund vs. Kreuzbund

In der einschlägigen Literatur, an dieser Stelle seien [2] und [3] erwähnt, wird gerne auf Unterschiede in der Belastung von Kreis- und Kreuzbünden eingegangen. Bei unseren Tests (Kantholz auf Rundholz, 7 Windungen, 4 Würgungen) verhielten sich die Bünde faktisch gleich bis zur Maximalbelastung von 3800daN; der leichte Unterschied in der Vertikalverschiebung liegt innerhalb des Mess- und Aufbaufehlers.

[2] Rony Müller, “Technix”. 5. Auflage, Juli 2007. ISBN 978-3-033-01015-4

[3] Boogie, “Kreuzbund”. Online verfügbar, aufgerufen am 05/02/2020: https://de.scoutwiki.org/Kreuzbund

11 Zusammenfassung und Tipps für die Praxis

11.1 Seilart

Halbstatikseile mit Dehnung im unteren Prozentbereich verwenden; gut geeignet sind Seile aus Polypropylen. Seile mit Dehnungen >5% auf 100kg (dynamische Seile) sind zwar für eine hohe Tragfähigkeit des Kreisbundes gut geeignet, dürften aber zu Schwierigkeiten bei der Realisierung und Belastung von Plattformen führen aufgrund der starken vertikalen Verschiebungen. Keinesfalls sollten Drahtseile und andere Seile mit Dehnungen <1% verwenden werden, da dadurch nicht gewährleistet ist, dass die Seilstränge gleichmässig belastet sind.

11.2 Seileigenschaften

Seile mit einem Durchmesser von 6mm und einer Zugfestigkeit von 580kg sind für einen Kreisbund gut geeignet und bieten ausreichend Sicherheitsreserven. Die kleine Auflagefläche führt dazu, dass sich die einzelnen Seilstränge aufgrund des hohen Druckes stark in die Rinde einschnüren. Dadurch erhöht sich die Reibung zwischen Seil und Rundholz ganz massiv, was erstrebenswert ist.

11.3 Anzahl Windungen und Würgungen

Für Kreisbünde in der Praxis können wir folgende Empfehlungen machen:

- 5-7 Windungen
- 4-5 Würgungen
- Kreisbund mit 4 Holzschrauben gegen das Abrutschen sichern
- Abschliessen mit zwei kompletten Samariterknoten.

Bemerkungen:

- Die Festigkeit nimmt zu mit der Anzahl **Windungen**.
- Die **Würgungen** führen dazu, dass der Kreisbund bei geringen Belastungen weniger Verschiebung in die Vertikale hat (er «rutscht» weniger). Die Tragfähigkeit des Bundes wird durch Würgen nicht erhöht.
- Ein zweiter Samariterkonten auf dem ersten Samariterknoten stellt sicher, dass dieser nicht durchrutschen kann und ist zwingend anzuwenden.

11.4 Kreisbünde an lebenden Bäumen

Bei Kreisbünden an lebenden Bäumen ist eine Schutzmatte für den Schutz der Rinde einzusetzen und auf Schrauben ist zu verzichten. Es empfiehlt sich ein Ausplatten (Einkerben) des Trägers, damit die Kontaktfläche des Trägers auf den Baum erhöht und damit der Druck auf die Rinde des Baumes reduziert wird. Alternativ zu einer dicken Schutzmatte kann auch eine dünnere Schutzmatte und ein dickeres Seile (z.B. 11mm) verwendet werden.