

Einfache Holzbrücke mit Rundholzträgern *im Verbund*

Fussgängerbrücken, private Zugänge oder Provisorien



Willi Eyer, Forstingenieur ETH
Daniel Christinaz, Techniker (Zeichnungen)

1. Einleitung

Zum Bau von einfachen Holzbrücken mit Breiten von 1 bis 3 m und Spannweiten von 2 bis 10 m, bei denen alle Elemente inklusive die Träger aus Rundholz erstellt werden, gibt es verschiedene gute Publikationen und viele praktische Erfahrungen. Einer der grossen Schwachpunkte von Rundholzträgern wird aber meist nicht angesprochen: die Tragfähigkeit.

Das vorliegende Papier illustriert eine einfache neue Idee, die dieses Problem sehr stark verbessert. Es richtet sich an Fachleute mit praktischer Erfahrung im Holzbau, insbesondere an Förster oder Fortwarte.

Bei stark beanspruchten und wichtigen Brücken ist es im Allgemeinen besser, die tragenden Elemente aus Stahl (HEA oder HEB-Träger) zu erstellen, und nur die relativ einfach ersetzbare Fahrplatte aus Holz zu bauen. Bei kleineren Fussgängerbrücken, privaten Zugängen oder provisorischen Übergängen, wo die Investitionskosten oft so klein als möglich gehalten werden müssen, ist aber die Verwendung von Rundholzträgern durchaus eine Option. Auch fehlende Zufahrtmöglichkeiten, ästhetische oder ökologische Aspekte können bei dieser Wahl eine Rolle spielen.

2. Widerstandsmoment eines Trägers

Die Widerstandskraft eines Trägers ist umso besser, je weiter die tragenden, auf Zug und Druck beanspruchten Teile des Trägers von der neutralen Linie entfernt sind. Auf dieser neutralen Linie treten weder Zug- noch Druckkräfte auf. Dieses Prinzip ist beim Doppel-T-Träger aus Eisen (HEA oder HEB-Träger) auf einfache Weise realisiert.

Ein Rundholz ist in dieser Hinsicht sehr ungünstig. Der grösste Anteil des Holzquerschnitts befindet sich in unmittelbarer Nähe der neutralen Linie. Das Widerstandsmoment für einen Kreisquerschnitt beträgt $W_y = D^3 \times \text{Pi} / 32$ (mit D = Durchmesser des Kreises), oder nur ca. $0.1 \times D^3$.

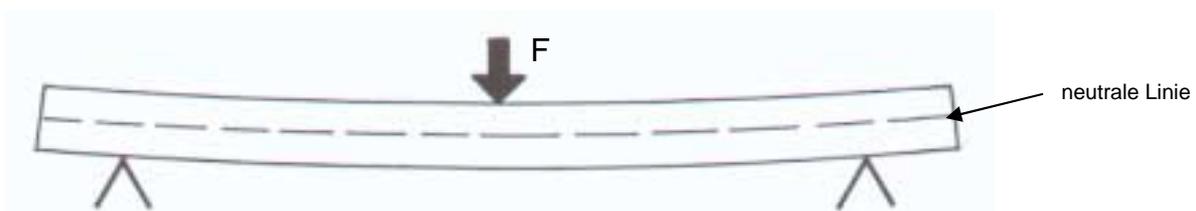


Abb. 1: Deformation eines Rundholzträgers bei Kraffteinwirkung F mit neutraler Linie

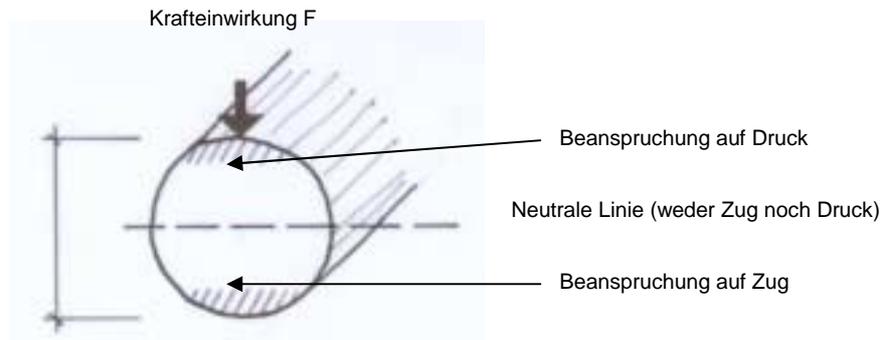


Abb. 2: Querschnitt und Widerstandsmoment Rundholzträger

3. Doppelrundholzträger im Verbund

Wenn zwei Rundhölzer aufeinander gelegt und starr miteinander verbunden werden, ergibt sich ein riesiger Effekt hinsichtlich Widerstandsmoment: der Querschnitt wird natürlich verdoppelt, viel wichtiger aber ist die wesentlich verbesserte Anordnung des tragenden Holzes um die neutrale Linie. Die Distanz der beiden Rundhölzer zur neutralen Linie wird durch den Einbezug der Brückentragfläche weiter erhöht, was einerseits die Konstruktion selber vereinfacht, andererseits die Tragfähigkeit weiter vergrößert. Es gibt weitere positive Nebeneffekte:

- die seitlichen Radabweiser sind direkt integriert.
- Geländerpfosten sind an diesen beiden starren Elementen wesentlich einfacher anzubringen.

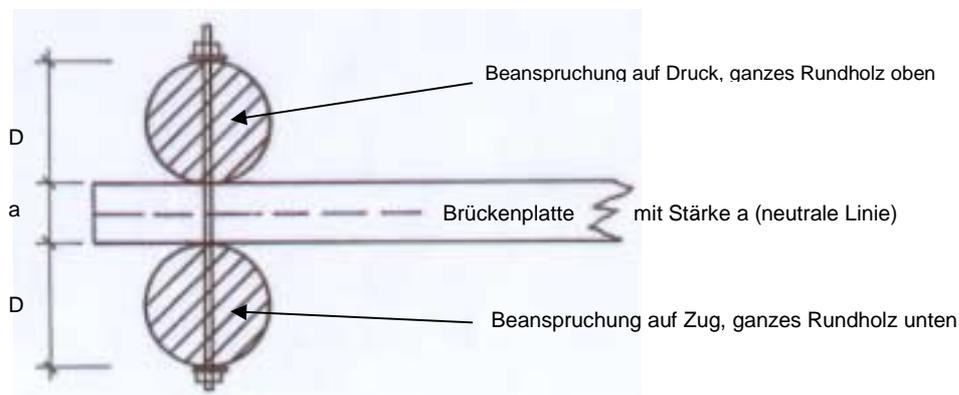


Abb. 3 Querschnitt verbundener Doppelrundholzträger

Entscheidend ist dabei, dass der Verbund starr ist, womit das Widerstandsmoment näherungsweise - unter konservativer Annahme für $a = 1/3 D$ (z.B. Durchmesser Rundholz 30 cm, Querplatte 10 cm) - wie folgt errechnet werden kann (Satz von Steiner, gemäss A. Böll):

$$W_y = 73 \pi D^3 / 336 = \text{ca. } 0.68 D^3$$

Damit ergibt sich also nicht nur eine Verdoppelung, sondern ein etwa 7 mal besserer Wert als derjenige bei der Verwendung einer Einfachlage von 2 Rundhölzern als Träger!

Dank der Konstruktionsart ist ein Kippen dieser Verbundkonstruktion bei Belastung nicht möglich, hingegen müssten hohe HEA oder HEB-Stahlprofile unterhalb von Brücken gegen Kippen oder Verdrehung gesichert sein.

4. Verbund

Der Verbund wird mittels beidseitig verschraubten Gewindestangen (mind. $D = 12$ mm, bei grossen Dimensionen der Brücke bis 20 mm) hergestellt. Der Abstand beträgt 30 - 50 cm, je grösser die erwartete Last, desto kleiner der Abstand. Sehr wichtig sind breite und massive Unterlagsscheiben (min. 40 mm), da die Gewindestangen bei grossen Lasten stark beansprucht werden und die Muttern in das Holz gezogen werden könnten. Schwächungen der Rundholzträger durch Einschnitte jeglicher Art sind immer zu vermeiden!

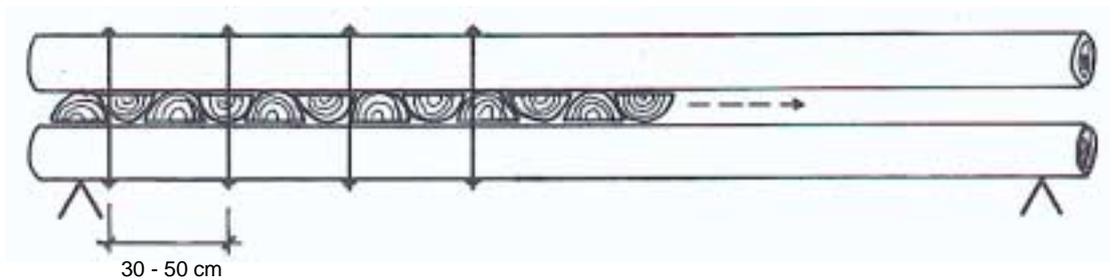


Abb. 4: Anordnung des Verbundes mit Gewindestangen

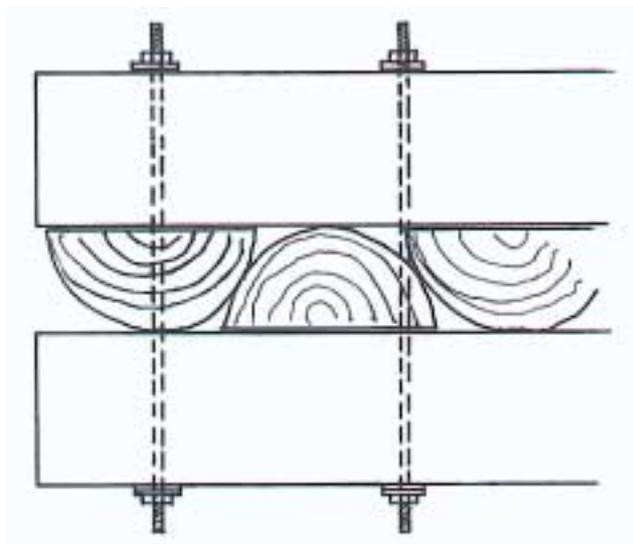


Abb. 5: Ausschnitt Abb. 4

5. Bau

Am besten erfolgt der Bau der gesamten Platte direkt neben dem definitiven Einbauort.

Um den Zugang zur Unterseite zu ermöglichen (Bohren, Verschrauben) und die Arbeitshöhe zu verbessern, sollten die beiden ersten, sauber entrindeten Rundhölzer auf ein Auflager gebracht werden.

Darauf wird nun die Tragfläche gelegt, welche aus Rundhölzern von mindestens 10 cm Durchmesser, oder allenfalls aus halbierten Rundhölzern oder Kanthölzern besteht. Ganze Rundhölzer eignen sich als definitive Begehfläche aus Sicherheitsgründen nicht, da sie bei Nässe extrem rutschig sind. Die Breite und Dicke der Querhölzer ist vom Verwendungszweck der Brücke abhängig. Soll diese als Fahrbahn dienen, muss auch deren Stärke bemessen werden (mit 20 cm ist man für gewöhnliche Personenwagen und Fahrbahnbreite von 2 m auf der sicheren Seite). Die Querhölzer sollten mindestens 10 cm über die Aussengrenze der Träger hinausragen.

Die Höhendifferenzen entlang der Auflagerlinie des zweiten Trägers sind so gut als irgend möglich mittels Einschnitten in den Querhölzern auszugleichen (prüfen mit Schnur). Die eingeschnittenen Seiten sollen wegen dem langsameren Zersetzungsprozess schliesslich nach unten zu liegen kommen, die Platte wird also am Schluss gedreht.

Nun wird der zweite Träger (welcher die gleichen Dimensionen wie die erste Lage aufweisen sollte) aufgelegt und falls nötig provisorisch fixiert. Die Zopfseite soll dem unterliegenden Rundholz entgegengesetzt angeordnet werden. Die Bohrungen mittels Langbohrer erfolgen möglichst zentral durch die Träger quer durch das „Sandwich“, entsprechend Abb. 3 und 4. Die Querhölzer können dabei beliebig angebohrt sein. Die Bohrung sollte etwas kleiner sein als der Durchmesser der Gewindestange. Ein schrittweiser Einbau und das laufende Verschrauben der abgelängten Gewindestangen verringert allfällige Probleme in Sachen Präzision der Bohrungen.

Nach dem sehr satten (!) Verschrauben aller Gewindestangen ist die Platte fertig und starr. Um horizontale Verschiebungen während der Manipulation der Brückenplatte zu vermeiden, muss mindestens ein diagonales Holz auf die Platte genagelt oder geschraubt werden. Die Platte kann nun gedreht, mittels Seilzug oder Maschineneinsatz auf die Auflager gebracht und definitiv angepasst werden. Die Träger sollten an den Randstellen möglichst keinen direkten Kontakt mit dem Erdreich haben (Packung mit Steinen oder ähnlich).

Die Geländerpfosten können vorgängig seitlich an die beiden Rundhölzer angeschraubt werden, dabei ist auf eine tiefe und gute Verschraubung zu achten. Allfällige Anpassungen mittels Schnitten sollen am Pfosten und nicht am Träger erfolgen! Die Querhölzer der Platte, welche an der Einbaustelle des Pfostens herausragen, werden so präzise wie möglich abgesägt, ein Einklemmen des Pfostens in die seitlichen Querhölzer verbessert die Stabilität des Geländers.

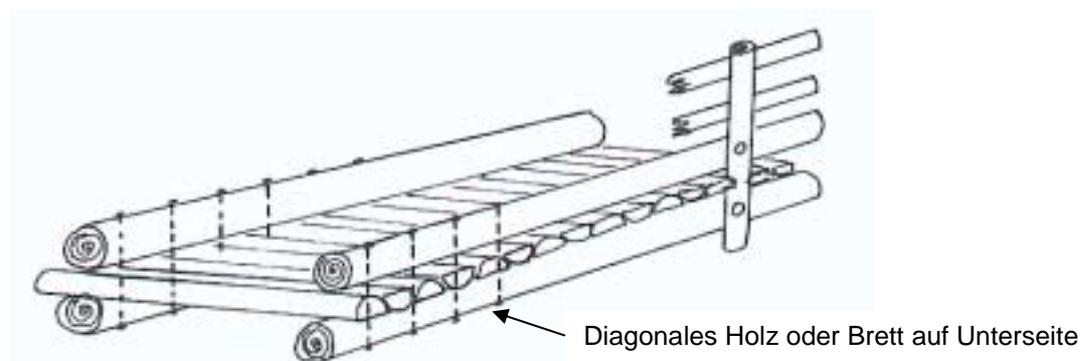


Abb. 6: Skizze der Brückenplatte

6. Bemessung und Gebrauchstauglichkeit

6.1 Dimensionierung

Die nachfolgende Tabelle liefert Hinweise über die Belastbarkeit dieser Konstruktion. Angenommen wird dabei eine punktuelle Belastung in der Brückenmitte mit gleichmässiger Verteilung auf die beiden Träger (das Eigengewicht der Brücke ist unter der Annahme einer Breite von etwa 2 m berücksichtigt). Es handelt sich um Näherungswerte, sie entsprechen etwa einer zulässigen Einzel-Achslast eines Fahrzeuges. Wenn die angegebene Last in Wirklichkeit auf die Platte verteilt ist und nicht nur in der Brückenmitte wirkt (Personen, Achsabstand von Fahrzeugen), erhöht sich der Sicherheitsfaktor. Die Werte wurden nicht auf die zulässige Durchbiegung untersucht, dies scheint angesichts der kleinen Spannweiten und der Konstruktionsart nicht notwendig.

Holzbrücke mit 2 Doppelrundholzträgern im Verbund Geschätzte Tragfähigkeit in Tonnen (Maximallast in Brückenmitte)

Durchmesser	Spannweite der Brücke (Distanz Auflager)								
	2 - 3 m	3 - 4 m	4 - 5 m	5 - 6 m	6 - 7 m	7 - 8 m	8 - 9 m	9 - 10 m	10 - 11 m
16 - 18 cm	7.3	5.1	3.8	3.0	2.3	1.9	1.5	1.2	0.9
18 - 20 cm	10.2	7.1	5.4	4.2	3.4	2.8	2.3	1.8	1.5
20 - 22 cm	13.8	9.7	7.3	5.8	4.7	3.9	3.2	2.7	2.2
22 - 24 cm	18.2	12.8	9.7	7.7	6.3	5.2	4.4	3.7	3.1
24 - 26 cm	23.4	16.5	12.6	10.0	8.2	6.8	5.8	4.9	4.1
26 - 28 cm	29.6	20.8	15.9	12.7	10.5	8.8	7.4	6.3	5.4
28 - 30 cm	36.7	25.9	19.8	15.9	13.1	11.0	9.4	8.0	6.9
30 - 32 cm	44.9	31.7	24.3	19.5	16.1	13.6	11.6	10.0	8.7
32 - 34 cm	54.2	38.3	29.4	23.6	19.6	16.6	14.2	12.3	10.7
34 - 36 cm	64.7	45.8	35.2	28.3	23.5	19.9	17.1	14.8	13.0
36 - 38 cm	76.5	54.2	41.6	33.6	27.9	23.7	20.4	17.7	15.5
38 - 40 cm	96.7	68.6	52.8	42.6	35.5	30.2	26.1	22.7	20.0

Durchmesser Durchmesser der beiden Rundhölzer in Brückenmitte, entrindet. Der Durchmesser des Rundholzes kann gegen die Auflager hin etwas abnehmen, ohne dass die Tragfähigkeit deswegen reduziert wird.

Tragfähigkeit Das Eigengewicht der Brücke ist berücksichtigt, aufgrund einer angenommenen Breite von etwa 2 m. Das spezifische Gewicht Holz ist mit 800 kg/m³, die zulässige Zugspannung mit 7 N/mm² eingesetzt.

Zum Vergleich sind die analogen Werte für eine einfache Rundholzlage angegeben.

Tab. 2: Holzbrücke mit 2 Rundholzträgern ohne Verbund
Geschätzte Tragfähigkeit in Tonnen (Maximallast in Brückenmitte)

Durchmesser	Spannweite der Brücke (Distanz Auflager)								
	2 - 3 m	3 - 4 m	4 - 5 m	5 - 6 m	6 - 7 m	7 - 8 m	8 - 9 m	9 - 10 m	10 - 11 m
16 - 18 cm	0.9	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4
18 - 20 cm	1.3	0.8	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.3	-0.4
20 - 22 cm	1.8	1.2	0.8	0.5	0.2	0.1	-0.1	-0.3	-0.4
22 - 24 cm	2.4	1.6	1.1	0.7	0.4	0.2	0.0	-0.2	-0.4
24 - 26 cm	3.2	2.1	1.4	1.0	0.6	0.4	0.1	-0.1	-0.3
26 - 28 cm	4.0	2.7	1.9	1.3	0.9	0.6	0.3	0.0	-0.2
28 - 30 cm	5.0	3.4	2.4	1.7	1.2	0.8	0.5	0.2	-0.1
30 - 32 cm	6.2	4.2	3.0	2.2	1.6	1.1	0.7	0.4	0.1
32 - 34 cm	7.5	5.1	3.7	2.7	2.0	1.5	1.0	0.6	0.2
34 - 36 cm	9.0	6.1	4.5	3.3	2.5	1.9	1.3	0.9	0.5
36 - 38 cm	10.7	7.3	5.4	4.0	3.1	2.3	1.7	1.2	0.7
38 - 40 cm	13.5	9.3	6.9	5.3	4.1	3.1	2.4	1.7	1.2

Die negativen Werte bedeuten, dass diese Bemessung nicht zulässig ist. Die Träger brechen theoretisch bereits aufgrund des Eigengewichtes der Brücke, natürlich unter der konservativen Annahme einer zulässigen Zugspannung von nur 7 N/mm² für das Holz. Bei grossen Spannweiten wird das Verhältnis zur Belastungsmöglichkeit der besseren Verbundkonstruktion zunehmend schlechter als der Faktor 7, dies ist die Folge der Wirkungen des Eigengewichtes.

6.2 Lebensdauer

Diese Konstruktion hat eine Lebensdauer von mindestens 10 Jahren, eher aber 15 - 20 Jahre. Der Alterungsprozess ist hauptsächlich abhängig vom Zersetzungsprozess des Holzes, welcher je nach Holzart und Ausgangsmaterial, lokalen Klimabedingungen und Bauweise stark variieren kann. Wenn Holzfäulnis an der Oberfläche der Träger bis in mehrere cm Tiefe festgestellt wird, sind Unterhalts- oder Ersatzmassnahmen angezeigt. Mit zunehmendem Alter nehmen die in den Tabellen 1 und 2 angegeben maximalen Lastwerte natürlich ab. Ein allfälliger Ersatz hängt auch ab vom Zweck des Bauwerkes und den allfälligen Folgen eines Versagens. Ein plötzlicher Bruch erfolgt aber im Prinzip nur bei einer Zusatzbelastung, welche im Verhältnis zum Eigengewicht der Brücke relativ gross ist.

6.3 Brückenplatte

Wenn dafür Rundhölzer verwendet werden, sollte diese Oberfläche nicht so belassen werden, da diese bei Nässe eine eigentliche Rutschfalle darstellt (Achtung Werkhaftung!). Ein zusätzliches Aufbringen von ungehobelten Brettern mit irgendwelchen Rutschsicherungen ist dann notwendig. Die Oberfläche von halbierten Rundhölzern oder ungehobelten Kanthölzern bietet mehr Haftung am Schuhwerk und dürfte im Allgemeinen so belassen werden können. Bei der Verwendung von Kanthölzern sind kleine Zwischenräume von z.B. 1 cm durchaus erwünscht (Wasser, Trocknung).

6.3 Geländer

Bei Geländern von Brücken, insbesondere bei Wanderwegbrücken, sieht man oft viel zu grosse Öffnungen auf der Unterseite. Die Längshölzer des Geländers sollen so angeordnet sein, dass ein Kleinkind bei einem unglücklichen Sturz nicht durchrutschen kann (auch hier: Achtung Werkhaftung!). Der vertikale Abstand zwischen den Längshölzern auf der unteren Hälfte des Geländers sollte deshalb bei 15 - max. 20 cm liegen, die Gesamthöhe ab Platte bei mindestens 90 cm. Es braucht deswegen meist 3 Längshölzer (Bretter oder halbierte Rundhölzer). Bei der vorliegenden Konstruktion ist eine gute seitliche Sturz- und Durchrutschsicherung bereits durch den oberen Rundholzträger gegeben. Hier sollten auch die herausragenden Gewindestangen so abgeschliffen werden, dass keine Verletzungsgefahr an scharfen Teilen besteht.

Das Geländer muss so stabil sein, dass auch mehrere Personen mit voller Kraft dagegen drücken können, ohne dass dieses nachgibt. Eine genügende Anzahl von Geländerpfosten (Abstand ca. 1.5 m) sowie deren gute Verschraubung mit grossen Unterlagsscheiben an den oberen und unteren Rundholzträger stellt dies sicher. Vermieden werden dabei auch die eher unschönen, seitlich herausragenden „Dreieckkonstruktionen“, die man bei einfachen Rundholzbrücken verschiedentlich beobachten kann.

6.5 Unterhalt

In den ersten Monaten und Jahren müssen die Gewindestangen wegen der Holzschwindung unbedingt nachgeschraubt werden, da bei einer zu starken Lockerung der Schrauben die Annahme des starren Verbunds nicht mehr zutrifft. Nach 5 - 10 Jahren sollte die Konstruktion mindestens einmal jährlich visuell auf Fäulnis kontrolliert werden. Die kritische Stelle der Tragkonstruktion befindet sich in der Mitte der Brücke. Falls die Querhölzer der Platte selber nicht mehr genügen, hat diese Konstruktion den Nachteil, dass diese Elemente wegen der Einspannung zwischen den Rundholzträgern nicht sehr einfach ersetzt werden können. Ein seitliches Einschieben sollte aber trotzdem möglich sein.

7. Kostenschätzung (nur Herstellung der Platte)

Die Kosten beschränken sich im Wesentlichen auf die Arbeit von Forstwarten/ Förstern, den Werkzeug und Maschineneinsatz (Winde, Traktor, Schreitbagger, Stromaggregat, Motorsägen, etc.) sowie den Wert und die Zulieferung und Aufbereitung des Rohmaterials Holz.

Für die Herstellung einer Platte von 6 m Länge und 1.5 m Breite ergibt sich folgende Grobschätzung:

Vorbereitung, Einrichtung Arbeitsplatz	Fr.	1'000.--
Rundholzträger 1.7 m3	Fr.	400.--
Halbierte Rundhölzer für Platte 1.5 m3	Fr.	500.--
Holz für Geländer	Fr.	300.--
Eisenmaterial (Gewindestangen, Schrauben, etc.)	Fr.	500.--
Arbeit 4 MT	Fr.	2'500.--
Verschiedenes, Unvorhergesehenes	Fr.	800.--
Total geschätzt	Fr.	6'000.--

Hinzu kommen der Aufwand für die Erstellung der Widerlager sowie der Einbau, womit die Gesamtkosten in der Grössenordnung von etwa Fr. 10'000.-- liegen dürften. Amortisiert auf 15 Jahre ergibt dies jährliche Kosten von ca. Fr. 700.--. Dieser Gesamtaufwand variiert sehr stark mit der Grösse des Bauwerks und der Art der Verrechnung (Eigenleistungen Arbeit, Eigenleistung Material, Lehrlingskurse, etc.)

8. Quellen

Die Literatur betreffend Holzbrückenbau ist umfangreich. Meist bezieht sie sich auf komplizierte Bauwerke mit grossen Spannweiten 10 - 30 m, also Fachwerkbau, Leimbindertechnik, Holzplattenbau System Renfer, usw., welche nicht Gegenstand des vorliegenden Papiers sind.

- Baustatik. Kurs ETH Zürich, forstliches Ingenieurwesen, Vorlesung Dr. R. Hirt, 1983
- Handnotizen, Albert Böll, Ing. ETH, WSL Birmensdorf
- Brücken aus Rundholz, Anleitung zum Selbstbau, Präsidentenkonferenz der Landwirtschaftskammern Österreichs, Löwelstr. 12, 1014 Wien, 1999
- Bündner Wald, Nr. 4 1985, Schwerpunkt Brücken für Wald- und Güterwege, Nr. 1 1989, Schwerpunkt Holzbrückenbau.
- Ponts de fortune en bois, Service du génie et des fortifications, Bulletin du génie n° 14, 1957
- Diverse weitere Publikationen, Normalien, eigene Notizen, Beobachtungen und Berechnungen.

Ein spezieller Dank geht die Herren A. Böll (WSL Birmensdorf) und F. Thalmann (Revierförster) für die kritische Durchsicht dieses Papiers.

Freiburg, Februar 2004

Amt für Wald, Wild und Fischerei, Sektor Naturgefahren und forstliches Bauwesen