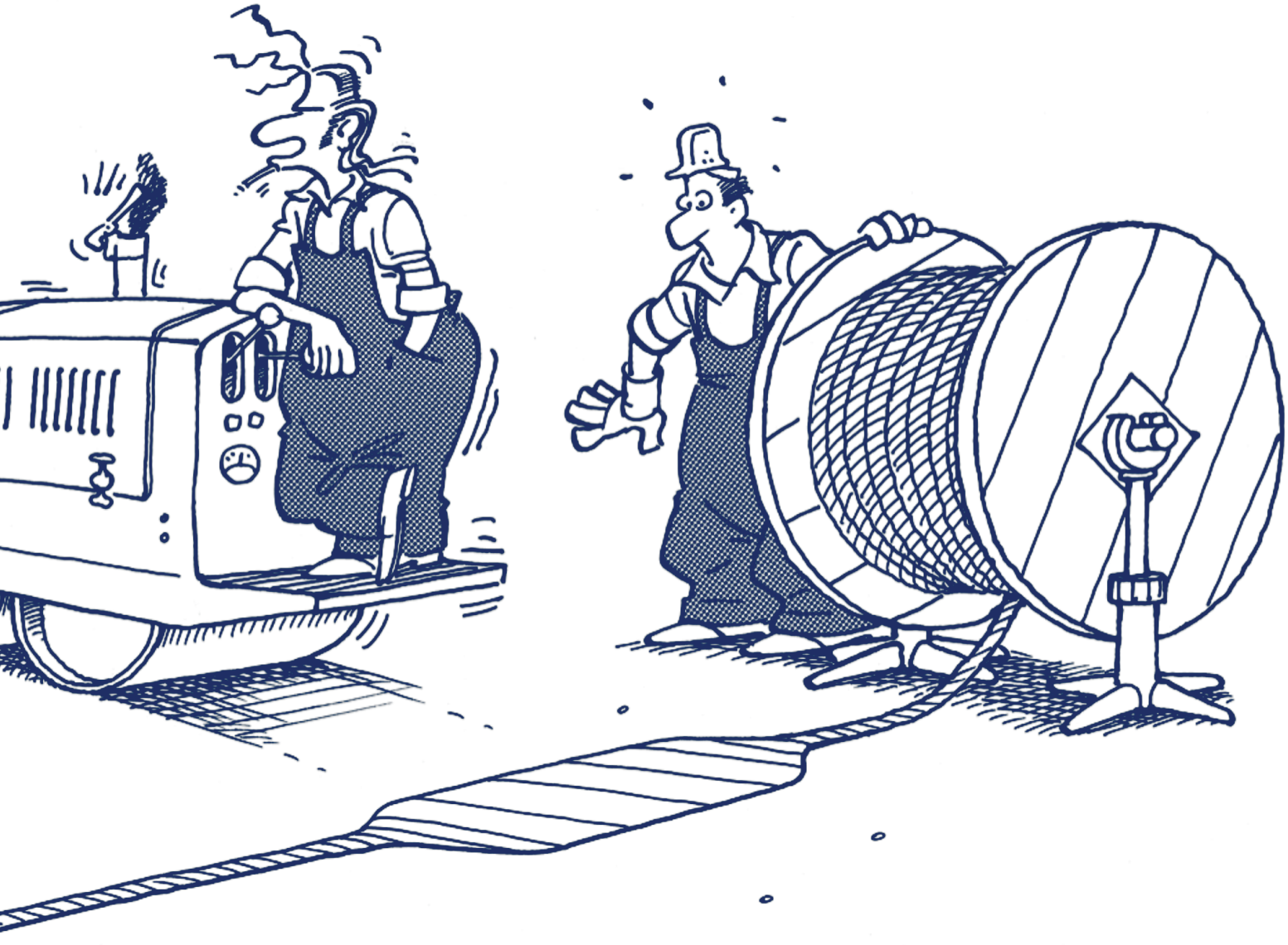
WIRE ROPE
TECHNOLOGY AACHEN



Stahldrahtseile für Krane
Probleme und Lösungen

Stahldrahtseile für Krane
Probleme und Lösungen

von Dipl.-Ing. Roland Verreet

Inhalt

1. Das Drahtseil als mehrfach redundantes Maschinenelement 4
2. Problem: Lokale Konzentrationen von Drahtbrüchen 6
3. Problem: Innere Drahtbrüche....7
4. Problem: Innere Drahtbrüche in konventionellen drehungsarmen Seilen....10
5. Die magnetinduktive Drahtseilprüfung....15
6. Problem: Korrosion von Stahldrahtseilen....16
7. Problem: Ungenügende Lebensdauer von Drahtseilen 17
8. Problem: Litzenlockerungen und Korbbildungen 25
9. Problem: Beschädigung der Drahtseile auf der Seiltrommel 31
10. Problem: Gute Drahtseile sind teuer. 33

© 2002, 2004, 2012, 2018 Ingenieurbüro für Drahtseiltechnik Wire Rope Technology Aachen GmbH
Titel und Cartoons: Rolf Bunse
Satz, Layout und Gestaltung: Benedikt Dolzer, Aachen
Nachdruck, auch teilweise, nur mit Genehmigung des Verfassers.

1. Das Drahtseil als mehrfach redundantes Maschinenelement

Bei der visuellen Inspektion eines Drahtseiles hat der Inspektor 10.000 Drahtbrüche gefunden. Nach seiner Meinung ist das Drahtseil noch nicht ablegereif. Könnte er recht haben?

Vor der Erfindung des Drahtseiles im Jahre 1834 waren Ketten die gebräuchlichsten Hebemittel. Ketten haben jedoch einen gewichtigen Nachteil: Ketten sind Reihenschaltungen von lasttragenden Elementen. Wenn nur ein einziges Kettenglied bricht (Abb. 1), versagt das Gesamtsystem und die Last stürzt ab.

Drahtseile sind Parallelschaltungen von lasttragenden Elementen. Wenn ein Element eines Drahtseiles bricht, wird die Bruchkraft des Seiles in der Regel um weniger als 1% geschwächt (Abb. 2), und auch diese Schwächung betrifft nur eine kurze Seilstrecke.

Ein Drahtseil ist ein mehrfach redundantes System lasttragender Elemente. In einem redundanten System sind die Elemente, die für das Funktionieren des Systems bedeutsam sind, mindestens zweifach vorhanden. So ist z. B. unser Körper in Bezug auf Hören und Sehen redundant. Wenn wir das Sehvermögen auf einem Auge verlieren, können wir immer noch sehen. Und wenn wir auf einem Ohr taub werden, können wir immer noch hören.

Wenn in einem Drahtseil ein Draht bricht, finden sich immer noch ungefähr 250 andere Drähte, die die Last tragen können.

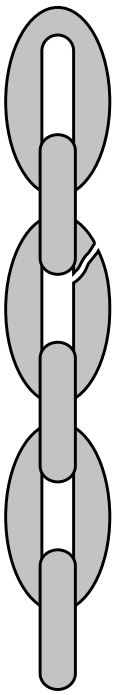


Abb. 1: Die Kette. Der Bruch eines Elementes führt zum Versagen des Gesamtsystems.

Abb. 2: Das Drahtseil. Der Bruch eines Elementes hat praktisch keinen Effekt.

Aber was passiert, wenn während des Einsatzes eines Drahtseiles immer mehr von diesen Drähten brechen? Wenn wir die Sehkraft auf beiden Augen verloren haben, können wir nicht mehr sehen. Und wenn wir das Hörvermögen auf beiden Ohren verloren haben, können wir nicht mehr hören. Sollte deshalb nicht auch ein Drahtseil spätestens dann versagen, wenn jeder seiner 250 Drähte gebrochen ist?

Nein. Es klingt unglaublich, aber ein Drahtseil kann immer noch in einem guten Zustand sein, selbst wenn jeder seiner Drähte 200 mal gebrochen ist!

Abb. 3 zeigt eine schematische Anordnung der 250 Drähte, aus denen unser Drahtseil aufgebaut ist. Aus Platzgründen sind lediglich 30 Drähte dargestellt. Entlang der Seillänge ist jeder einzelne der 250 Drähte einmal gebrochen. Jeder Drahtbruch stellt jedoch lediglich eine lokale Verringerung der Bruchkraft des Seiles dar. Einige Millimeter von seiner Bruchstelle entfernt trägt jeder Draht wieder seinen vollen Anteil an der Last.

Wenn wir eine sehr gleichmäßige Verteilung der Drahtbrüche entlang der Seillänge haben, so dass in jedem kurzen Seilstück, sozusagen in jeder Salamischeibe des Drahtseiles, nur ein Drahtbruch gefunden werden kann, wird die Bruchkraft jeder einzelnen dieser Sektionen nur um weniger als 1% geschwächt sein.

In einem Zugversuch würde dieses Drahtseil seine volle, im Katalog ausgewiesene Mindestbruchkraft erreichen, obwohl jedes einzelne seiner Elemente einmal gebrochen ist.

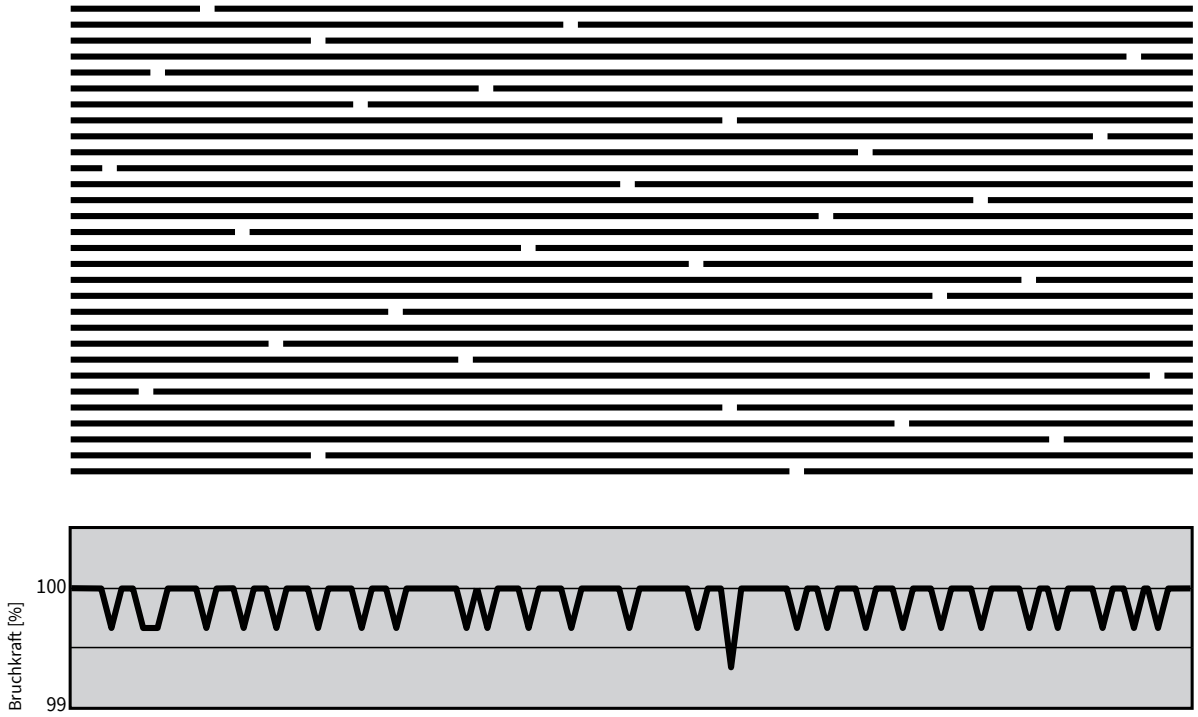


Abb. 3: Jeder Drahtbruch bewirkt nur lokal eine geringfügige Herabsetzung der Seilbruchkraft.

Trotzdem können wir lediglich eine endliche Zahl von Drahtbrüchen pro Seillängeneinheit zulassen. Die Ablegedrahtbruchzahl ist in verschiedenen nationalen oder internationalen Normen und in den Regeln der Klassifikationsgesellschaften als eine zulässige Drahtbruchzahl bezogen auf eine Längeneinheit aufgeführt, die als Vielfaches des Seildurchmessers angegeben wird. Üblicherweise sind die Ablegedrahtbruchzahlen für eine Länge von 30 x Seilnenndurchmesser (dies entspricht ungefähr 5 Seilschlaglängen) und 6 x Seildurchmesser (dies entspricht ungefähr einer Seilschlaglänge) angegeben.

Unser Inspektor hat 10.000 Drahtbrüche gefunden, aber die Ablegedrahtbruchzahl war in keinem einzigen Seilstück der Länge 30 x d oder 6 x d erreicht. Seine Entscheidung, das Drahtseil auf dem Kran zu belassen, war somit korrekt.

Dieses Beispiel zeigt, dass unter normalen Bedingungen ein Drahtseil ein sehr sicheres und zuverlässiges Maschinenelement ist.

2. Problem: Lokale Konzentrationen von Drahtbrüchen

Einige Tage später untersucht unser Inspektor das Hubseil eines Schwesterkrans. Er findet lediglich 15 Drahtbrüche, besteht aber darauf, dass das Drahtseil abgelegt werden muß. Nachdem er auf einem baugleichen Kran 10.000 Drahtbrüche zugelassen hat, klingt diese Entscheidung ein wenig seltsam. Kann es sein, dass sich unser Inspektor diesmal irrt?

Wenn die Drahtbrüche sich auf einer sehr kurzen Seillänge konzentrieren (Abb. 4), z.B. als Folge einer fehlerhaften Behandlung eines Drahtseiles oder als Folge einer mechanischen Beschädigung, addieren sich die Bruchkraftverringerungen infolge der Einzeldrahtbrüche innerhalb dieser kurzen Strecke zu einem kritischen Wert. Obwohl die übrigen 500m des Seiles frei von Drahtbrüchen sind, muß deshalb dieses Drahtseil abgelegt werden, weil 5cm in schlechtem Zustand sind.

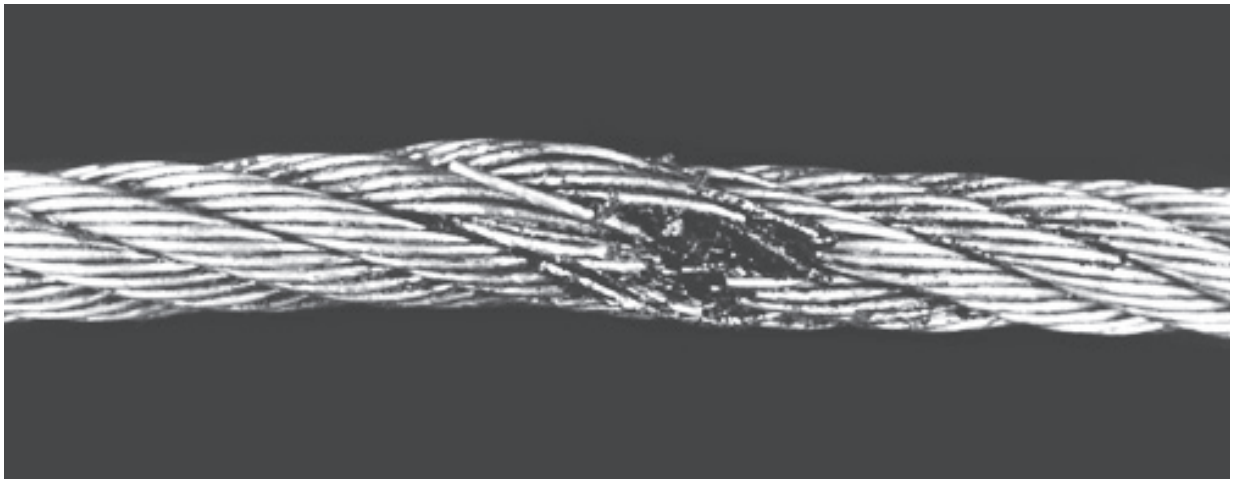


Abb. 4: Lokale Konzentration von Drahtbrüchen

Drahtseile mit lokalen Konzentrationen von Drahtbrüchen sind nicht betriebssicher. Die Entscheidung unseres Inspektors, das Drahtseil abzulegen, ist korrekt.

3. Problem: Innere Drahtbrüche

Das Hubseil eines dritten, baugleichen Kranes zeigt keinen einzigen äußeren Drahtbruch. Dennoch beschließt unser Inspektor nach einer Seiluntersuchung, dass das Hubseil abgelegt werden muß. Warum?

Während einer visuellen Seilkontrolle kann lediglich der Zustand der Außendrähte eines Drahtseiles begutachtet werden. Der Metallquerschnitt der Aussendrähte eines Drahtseiles beträgt jedoch lediglich 40% des gesamten metallischen Querschnitts eines Drahtseiles, und nur die Hälfte der Länge dieser Außendrähte ist sichtbar (Abb. 5).

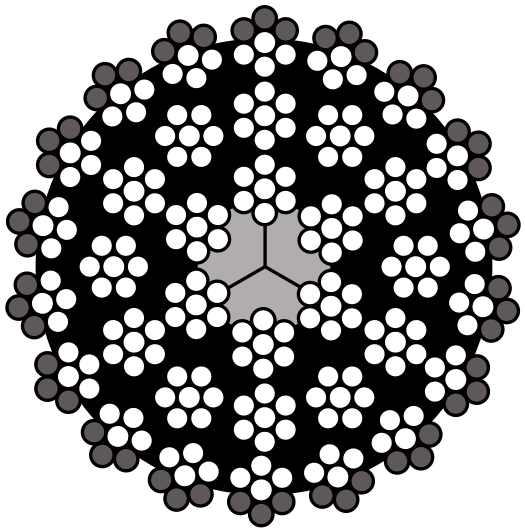


Abb. 5: Nur 20% des Metallquerschnittes (grau dargestellt) können visuell begutachtet werden.

Dies bedeutet, dass wir bei einer visuellen Drahtseilinspektion nur den Zustand von 20% des metallischen Querschnitts eines Drahtseils begutachten können. Bezüglich der übrigen, nicht sichtbaren 80% des Metallquerschnitts können wir lediglich hoffen, dass sie in Ordnung sind.

Visuelle Drahtseilinspektion =
20% Wissen + 80% Hoffnung

Leider kommt es aber relativ häufig vor, dass sich die sichtbaren 20% des Metallquerschnitts in gutem Zustand präsentieren, während sich im unsichtbaren Teil des Drahtseils eine große Zahl von Drahtbrüchen versteckt. Drahtseile, die innere, aber keine äußeren Drahtbrüche aufweisen, sind sehr gefährlich.

3.1. Problem: Innere Drahtbrüche in einem 6-litzigen Seil mit Stahleinlage

Während der Inspektion eines Drahtseils 6x36 Warrington-Seale mit Stahleinlage (Abb. 7) konnten keine äußeren Drahtbrüche gefunden werden. Nachdem das Drahtseil aber von Hand gebogen worden war, zeigte sich, dass jeder einzelne Außendraht im Inneren des Seiles gebrochen war (Abb. 6).

Die Überkreuzungsstelle zwischen der Stahleinlage und der Außenlitze ist charakterisiert durch sehr hohe lokale Spannungskonzentrationen (Abb. 9). Deshalb können die Außendrähte der Drahtseile an den Berührungspunkten mit der Stahleinlage brechen. Die freie Drahtlänge der gebrochenen Drähte in Bild 6 zeigt klar, dass dies hier der Fall gewesen ist.

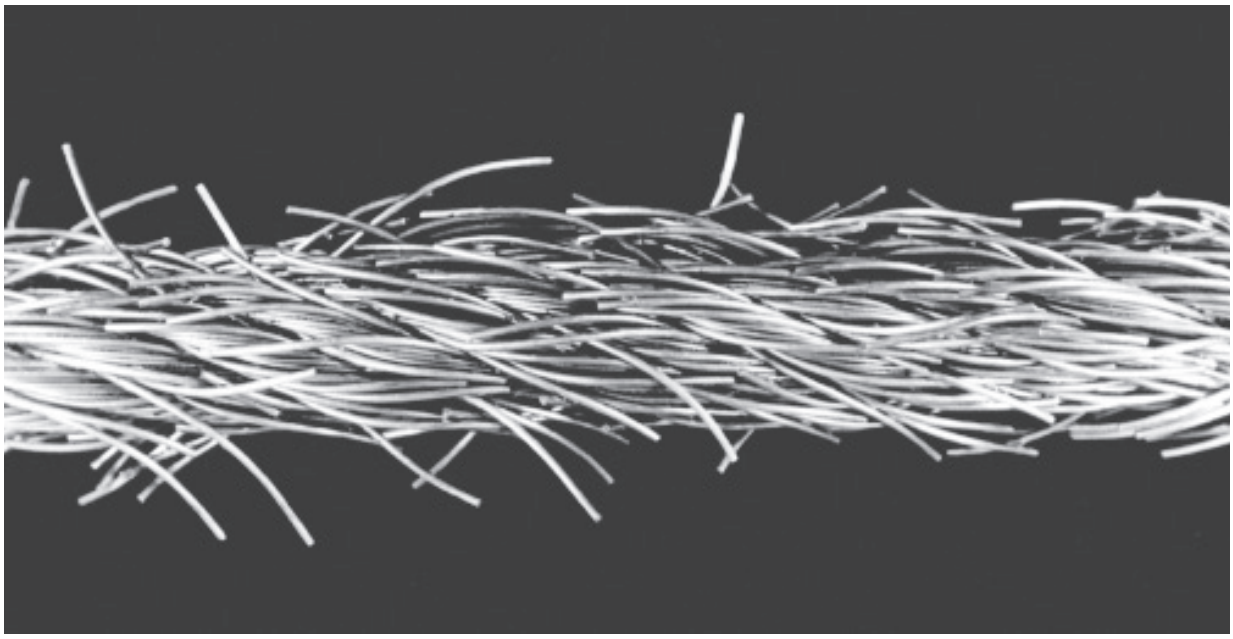


Abb. 6: Zahlreiche Drahtbrüche an den Auflagestellen der Außendrähte auf der Stahleinlage

3.2. Lösung: 8-litzige Seile mit einer Kunststoffzwischenlage

Abb. 8 zeigt den Querschnitt eines 8-litzigen Seiles mit einer Kunststoffzwischenlage zwischen der Stahleinlage und den Außenlitzen. Die Kunststoffzwischenlage schließt nicht nur das Schmiermittel in der Stahleinlage ein und schützt diese gegen eine korrosive Umgebung, sie verhindert auch eine direkte Auflage Stahl auf Stahl zwischen den zwei Litzenlagen und verhindert somit die hohen lokalen Pressungen an den Auflagestellen zwischen der Stahleinlage und den Außenlitzen (Abb. 10). Auf diese Weise hilft die Kunststoffzwischenlage erfolgreich, Drahtbrüche im Seilinnern zu vermeiden.

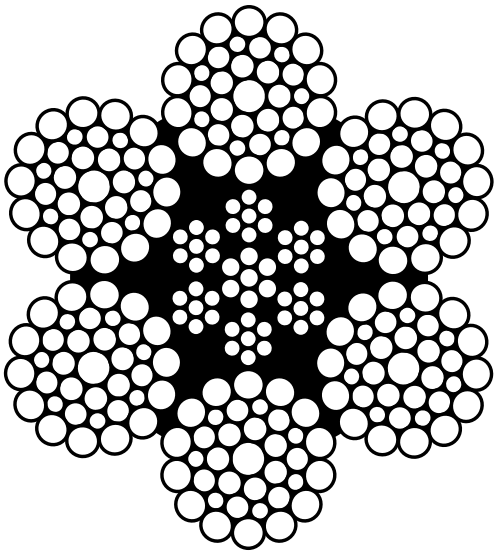


Abb. 7: Drahtseil 6x36 Warrington-Seale mit Stahleinlage

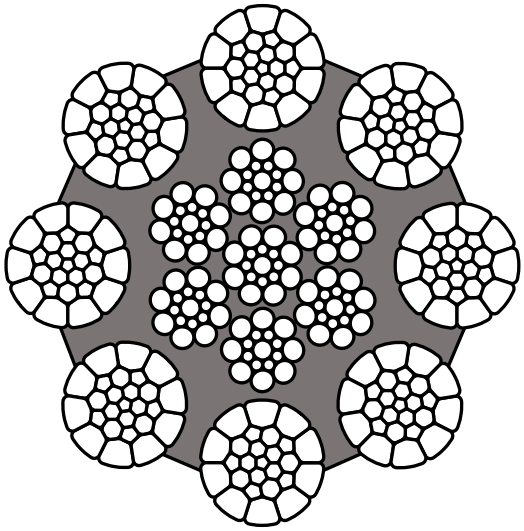


Abb. 8: 8-litziges Seil mit einer Kunststofflage zwischen der Stahleinlage und den Außenlitzen

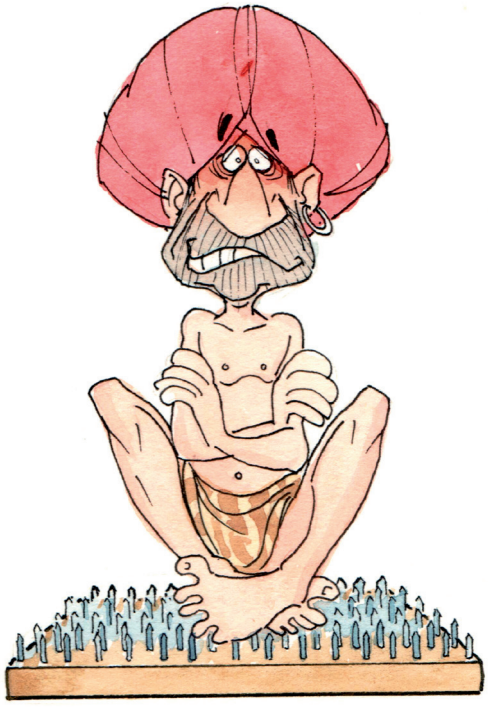


Abb. 9: Sehr hohe Spannungskonzentrationen an den Berührungs-punkten mit der Stahleinlage (6x36 Warrington-Seale SES)

Abb. 10: Die Kunststoffzwischenlage wirkt wie ein Kissen. Sie reduziert die Pressungen an den Auflagestellen und hilft so, innere Drahtbrüche zu verhindern.

4. Problem: Innere Drahtbrüche in konventionellen drehungsarmen Seilen

In drehungsarmen oder drehungsfreien Drahtseilen ist die Stahleinlage entgegengesetzt zur Schlagrichtung der Außenlitzen verseilt. Aus diesem Grund sind drehungsarme oder drehungsfreie Drahtseile noch stärker der Gefahr innerer Drahtbrüche ausgesetzt als 6- oder 8-litzige Drahtseile.

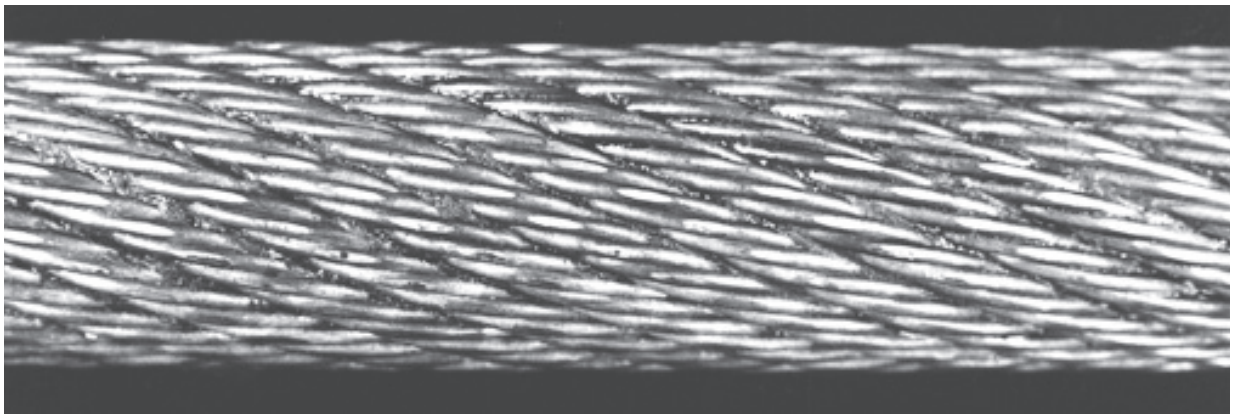


Abb. 11: Seil 36x7 nach einigen Monaten Einsatzzeit. Das Seil zeigt keine äußerlich sichtbaren Drahtbrüche.

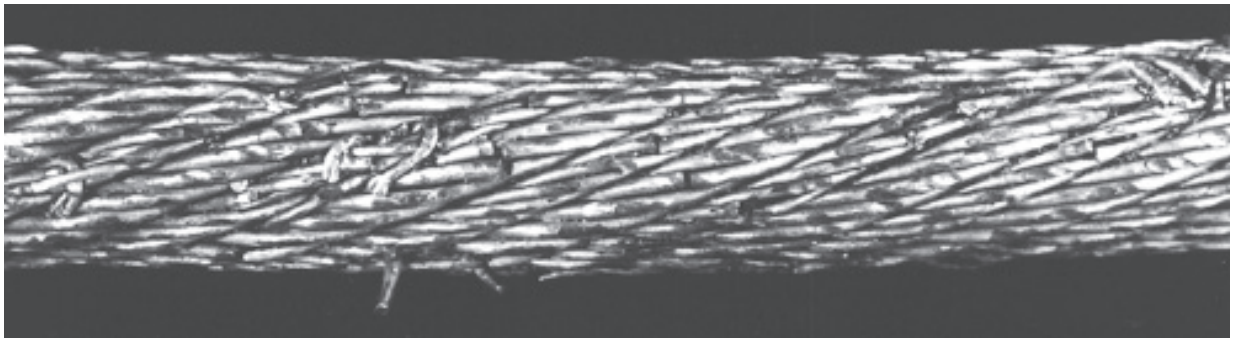


Abb. 12: Nach Abschälen der Aussenlitzen werden viele Drahtbrüche auf der Stahleinlage an den Überkreuzungsstellen der Litzenlagen sichtbar.

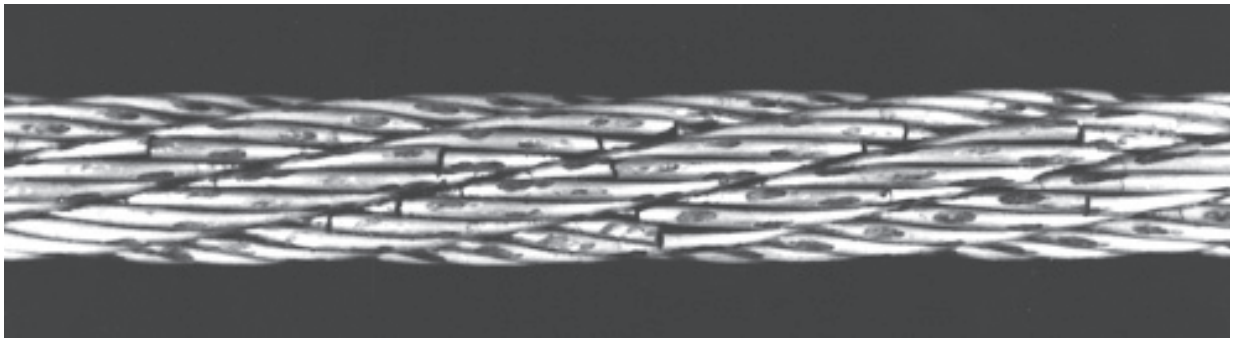


Abb. 13: Die innerste Litzenlage zeigt eine Vielzahl von Drahtbrüchen.

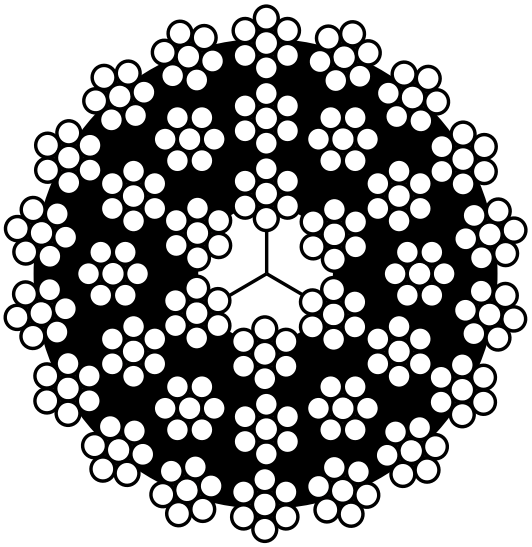


Abb. 14: Drehungsarmes Hubseil (36x7)

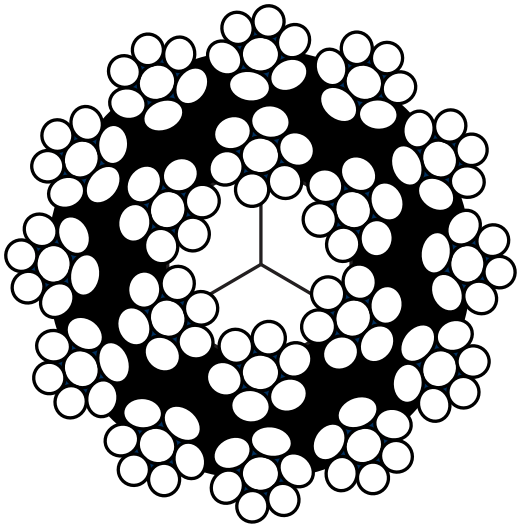


Abb. 15: Drehungsarmes Hubseil (18x7)

Abb. 14 zeigt den Querschnitt eines drehungsarmen Drahtseiles 36x7. Abb. 11zeigt die äußere Oberfläche eines derartigen Seiles nach einigen Monaten Einsatzzeit. Das Drahtseil hat nicht einen einzigen sichtbaren Drahtbruch. Nach dem Abschälen der äußeren Litzenlage findet man eine Vielzahl von Drahtbrüchen auf der Oberfläche der Stahleinlage an den Überkreuzungsstellen der Stahleinlage mit den Außenlitzen (Abb. 12). Nach dem Abschälen der äußeren Litzenlage der Stahleinlage zeigt auch die erste Litzenlage der Stahleinlage eine große Zahl von Drahtbrüchen (Abb. 13).

4.1. Intermezzo: Drehungsarme und drehungsfreie Drahtseile

Falls Sie Drahtseile der Machart 18x7 (Abb. 15) oder 19x7 oder eine ihrer verdichteten Varianten als Hubseil auf einem Kran einsetzen, erzählen Sie es nicht Ihrer Haftpflichtversicherung!

Diese Drahtseile haben ein eingebautes Problem, wie das folgende Beispiel zeigt: Zwei Gruppen von Sportlern versuchen, ein Drehkreuz in entgegengesetzten Richtungen zu drehen. Es ist ein sehr unfairer Wettkampf, denn die eine Gruppe greift außen am Drehkreuz an und hat somit einen erheblich größeren Hebelarm als ihre innen angreifenden Gegner (Abb. 16).

Wenn schon bei der gleichen Zahl von Wettkämpfern innen und außen die innen Kämpfenden keine Chance haben, um wieviel schlimmer wird es ihnen dann ergehen, wenn außen doppelt so viele Wettkämpfer antreten wie innen (Abb. 17)?

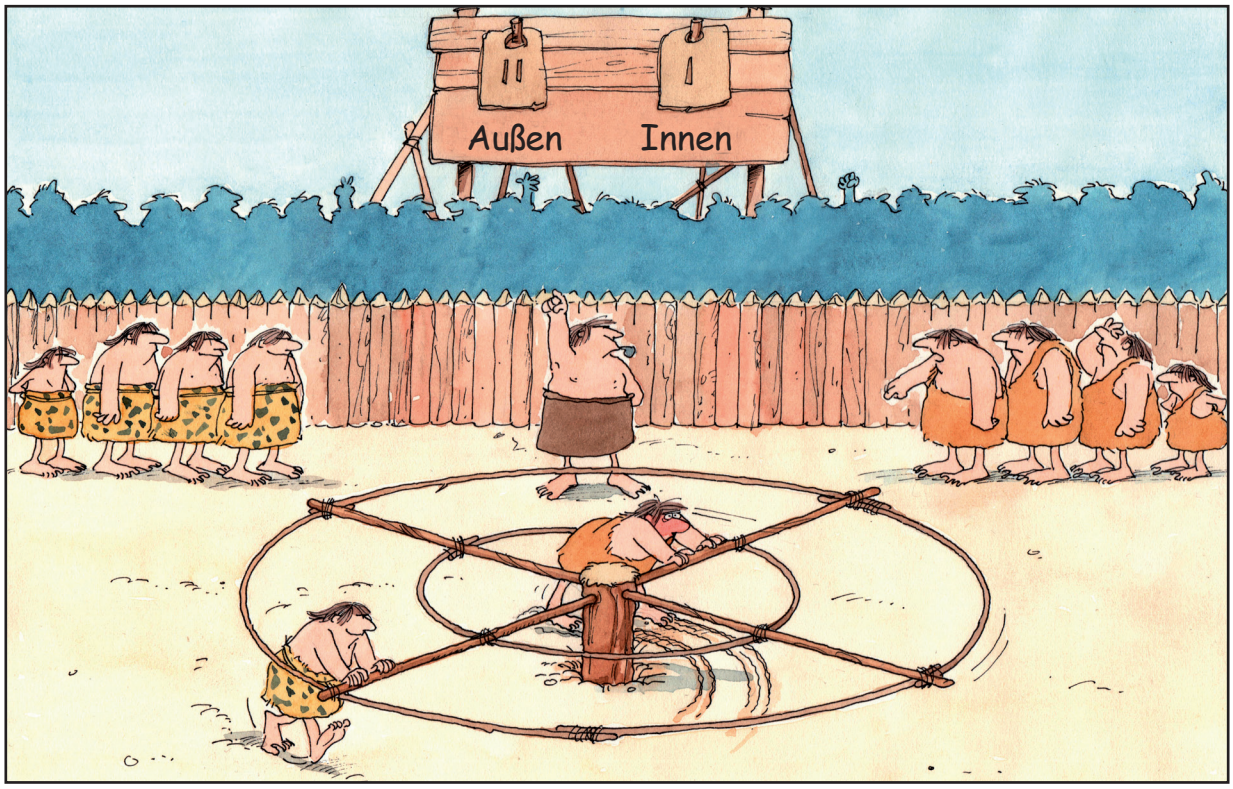


Abb. 16: Die Außenlitzen sind aufgrund des größeren Hebelarms im Vorteil

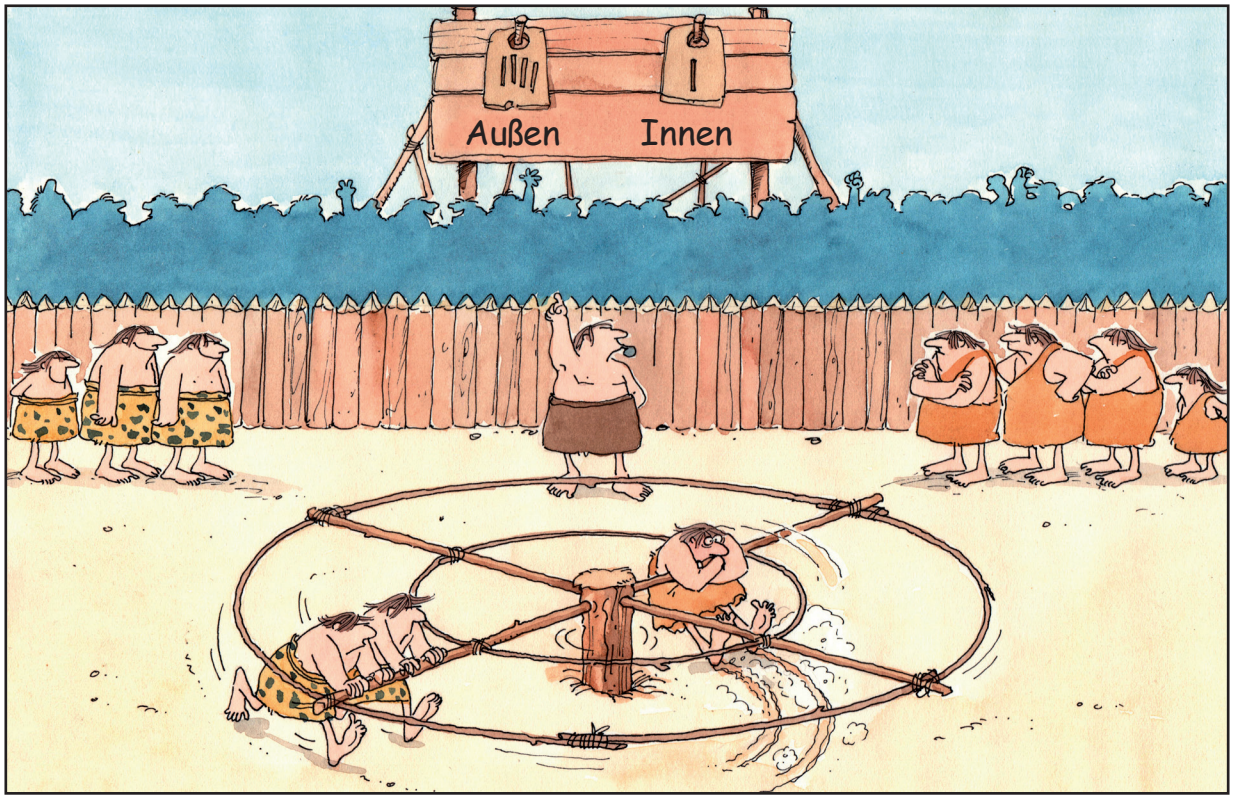


Abb. 17: In einem Seil 18x7 ist der Metallquerschnitt der Außenlitzen doppelt so groß wie der des Kernseils..

Dies nämlich sind genau die Verhältnisse der Seile 18x7, 18x19 und ihrer zahlreichen Varianten. Diese Seile haben 6 innenliegende Litzen, die sich gegen 12 Außenlitzen von gleichem Durchmesser und exakt doppelt so langen Hebelarmen behaupten müssen. Derartige Seile können nur dann halbwegs drehstabil sein, wenn die inneren Litzen hoffnungslos überlastet werden!

Mit anderen Worten: In diesen Drahtseilen wird das Kernseil immer überproportional belastet werden und deshalb erheblich schneller als die Außenlitzen versagen. Die inneren Drahtbrüche sind somit bereits durch den Seilaufbau vorprogrammiert.

Abb. 18 zeigt, wie Drehstabilität erzeugt werden sollte: Die Athleten im Inneren, die den kürzeren Hebelarm besitzen, sollten zahlreicher sein als die Athleten außen mit dem längeren Hebelarm!

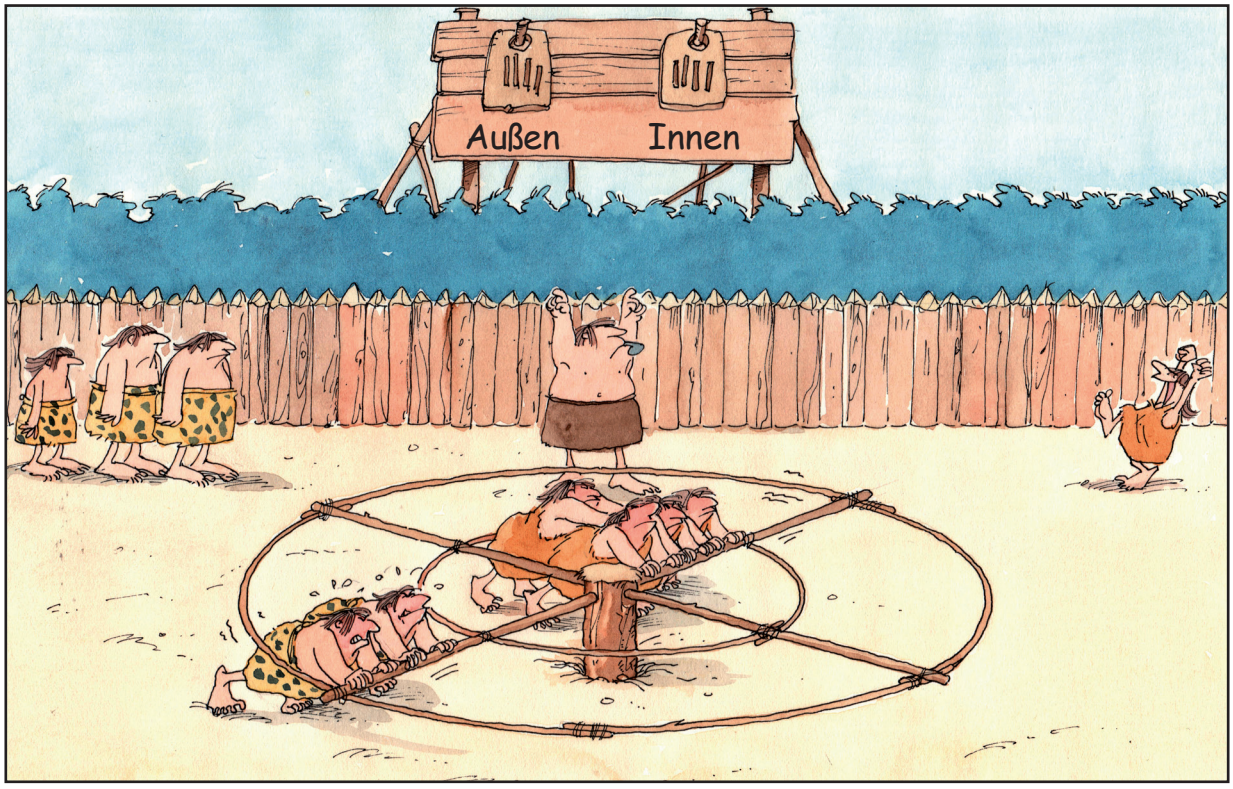


Abb. 18: In den drehungsfreien Hubseilen ist der Metallquerschnitt des Kernseiles größer als der Metallquerschnitt der Außenlitzen. Hierdurch wird ein Gleichgewicht hergestellt, ohne daß einzelne Litzen überbeansprucht werden.

Und genau auf diese Weise erzeugt ein gutes drehungsfreies Drahtseil Stabilität, ohne das Kernseil zu überlasten: der Metallquerschnitt des Kernseiles ist erheblich größer als der Metallquerschnitt der Außenlitzen.

4.2. Lösung: Drehungsfreie Spezialdrahtseile mit einem verdichteten Seilkern und verdichteten Außenlitzen

Abb. 19 zeigt den Querschnitt eines 40-litzigen drehungsfreien Drahtseils mit einem verdichteten Kernseil und verdichteten Außenlitzen. Die Verdichtung des Kernseiles als Ganzes führt zu einer erhöhten Bruchkraft und zu einer größeren Drehstabilität des Seiles. Zusätzlich sorgt die vergrößerte Auflagefläche der Außenlitzen auf dem Kernseil für geringere Pressungen an den Auflagestellen (Abb. 20), was die Gefahr innerer Drahtbrüche weiter reduziert.

Drehungsfreie Drahtseile der Machart 35x7 oder 40x7 sollten vorzugsweise mit einem offenen Wirbel eingesetzt werden.

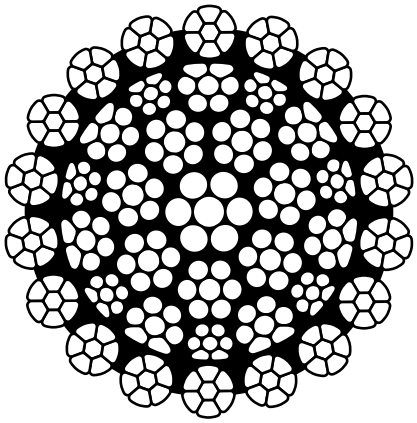


Abb. 19: 40-litziges drehungsfreies Hubseil mit verdichteten Außenlitzen und einem verdichteten Kernseil

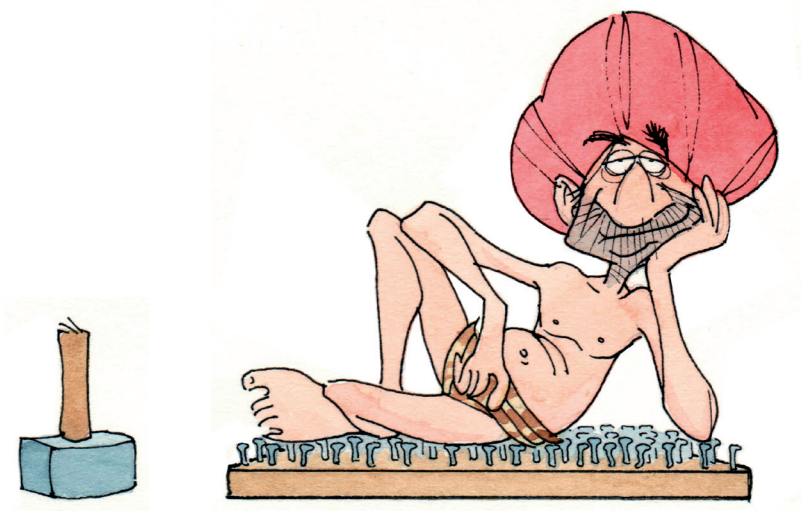


Abb. 20: Die vergrößerten Auflageflächen auf dem abgeflachten Kernseil reduzieren die Pressungen zwischen dem Kernseil und den verdichteten und geglätteten Außenlitzen und verringern so die Gefahr innerer Drahtbrüche.

5. Die magnetinduktive Drahtseilprüfung

Innere Drahtbrüche können mit Hilfe von magnetinduktiven Prüfgeräten festgestellt und lokalisiert werden. Magnetinduktive Prüfungen von Drahtseilen können durch qualifiziertes Personal des Kranbetreibers oder durch unabhängige Dienstleister durchgeführt werden (Abb. 21).

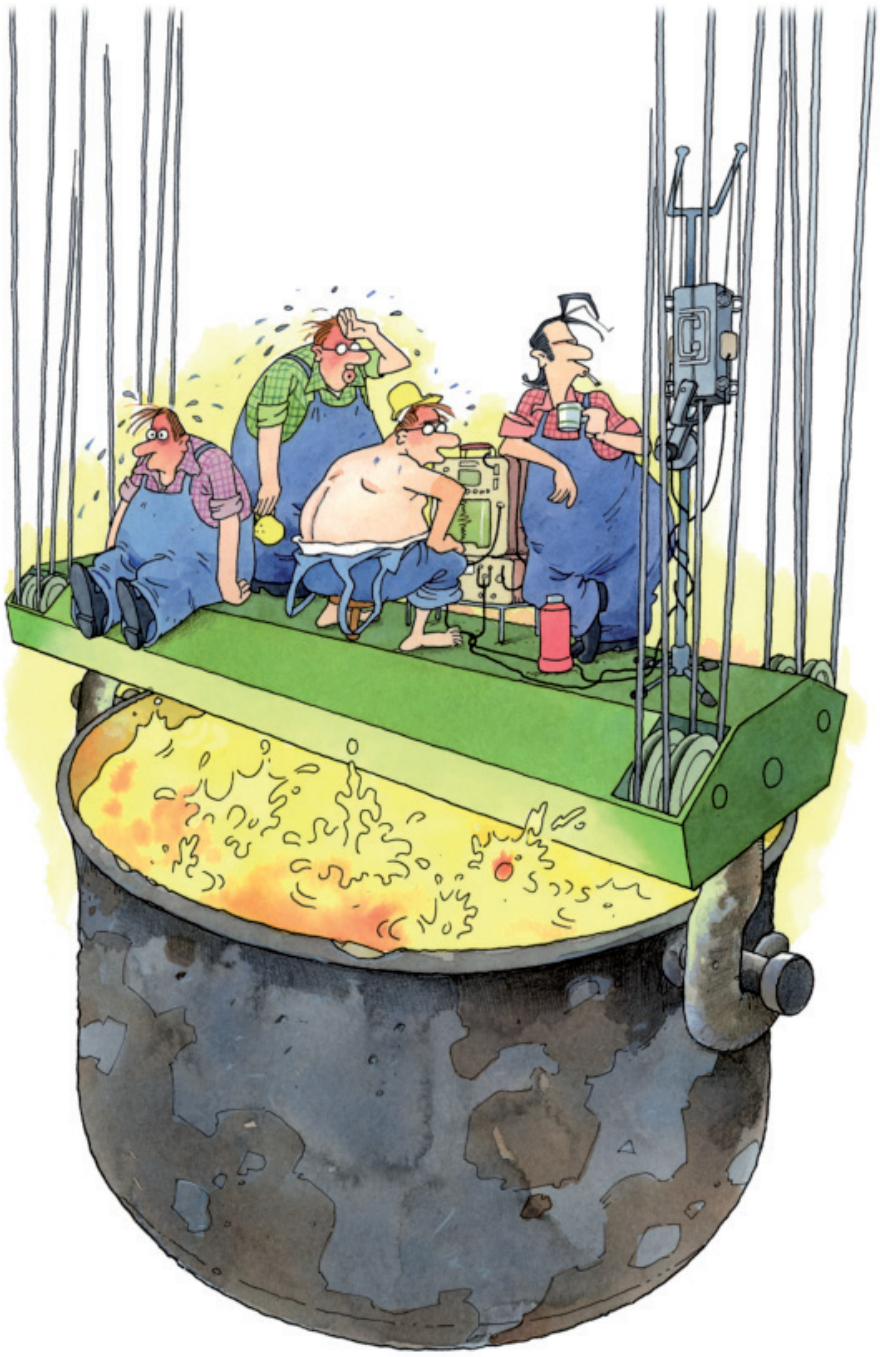


Abb. 21: Magnetinduktive Drahtseilprüfung unter Last

6. Problem: Korrosion von Stahldrahtseilen

Die gesamte Oberfläche aller Drähte, aus denen ein Drahtseil aufgebaut ist, ist ungefähr 16 mal so groß wie die Oberfläche einer Stahlstange mit vergleichbarem Metallquerschnitt (Abb. 22). Dies bedeutet, dass, wenn nicht andere Maßnahmen ergriffen werden, Drahtseile in einer korrosiven Umgebung etwa 16 mal so schnell korrodieren wie eine Stahlstange.

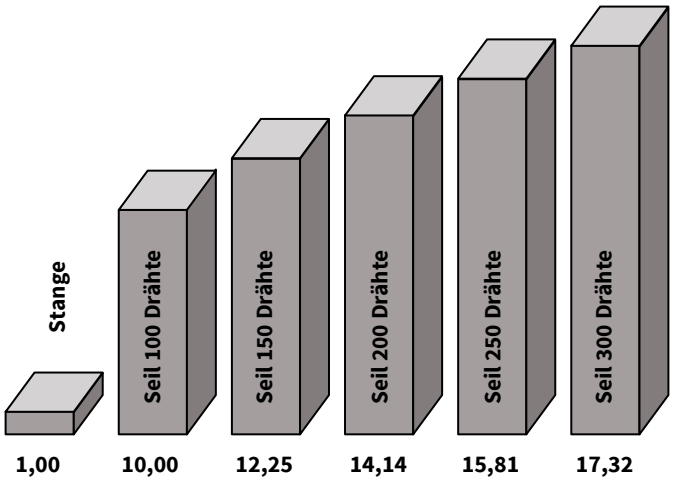


Abb. 22: Die Summe der Oberflächen der Drähte eines Drahtseils ist ungefähr 16 mal so groß wie die Oberfläche einer Stange mit vergleichbarem Metallquerschnitt.

6.1. Lösung 1: Verzinkte Drähte und kunststoffumhüllte Stahleinlagen

Stahldrahtseile, die in korrosiver Umgebung arbeiten, sollten aus verzinkten Drähten hergestellt werden. Selbst wenn die Zinkauflage lokal, beispielsweise durch Abrieb, abgetragen sein sollte, würden die freiliegenden Stahlzonen durch den Zink in ihrer Umgebung elektrochemisch geschützt werden (kathodische Protektion).

Die Stahleinlage des Seiles sollte zusätzlich kunststoffummantelt sein. Ein Kunststoffmantel schließt zum einen das Schmiermittel in der Stahleinlage ein und verhindert zum anderen das Eindringen korrosiver Elemente.

6.2. Lösung 2: Regelmäßige Nachschmierung

Die Drahtseile werden im Laufe ihrer Einsatzzeit mehr und mehr von ihrer Zinkauflage verlieren. Zusätzlich wird mehr und mehr ihres Schmierstoffs aufgebraucht werden. Deshalb sollten die Drahtseile während ihrer Einsatzzeit in regelmäßigen Abständen nachgeschmiert werden, um die Reibung zwischen den Seilelementen zu verringern und ihre Oberflächen gegen Korrosion zu schützen. Abb. 23 zeigt verschiedene Methoden zur Nachschmierung von Drahtseilen.

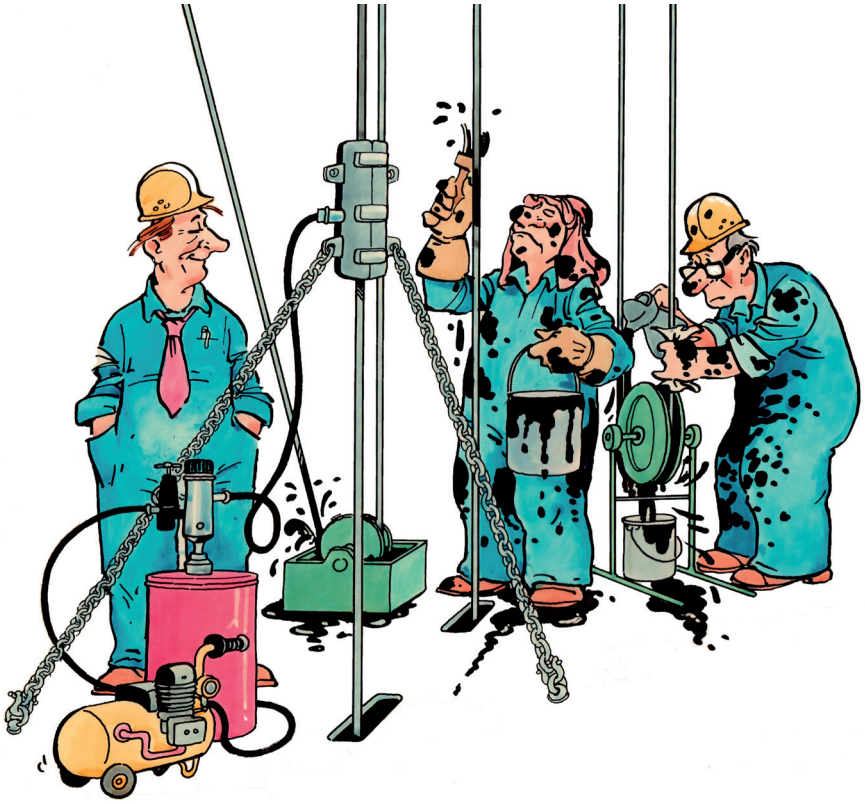


Abb. 23: Nachschmierung von Drahtseilen

7. Problem: Ungenügende Lebensdauer von Drahtseilen

Kranseile werden im Betrieb Biegewechselbeanspruchungen und schwellenden Zugbeanspruchungen ausgesetzt. Häufig entspricht ihre Ermüdungsfestigkeit nicht den Erwartungen des Betreibers.

7.1. Lösung 1: Drahtseile mit höherer Ermüdungsfestigkeit

Drahtseile verschiedener Machart haben verschieden hohe Ermüdungsfestigkeiten. Wegen ihrer höheren Elementezahl – resultierend in geringeren Biegespannungen – und ihrer größeren Zahl von Auflagepunkten in der Seilscheibe – resultierend in geringeren Flächenpressungen – sind 8-litzige Seile bei Biegewechselbeanspruchung erheblich ermüdungsfester als 6-litzige Seile (Abb. 24).

Drahtseile mit verdichteten Außenlitzen (Abb. 25) haben einen größeren Metallquerschnitt als Drahtseile, die aus konventionellen Litzen aufgebaut sind. Sie arbeiten deshalb bei gleicher äußerer Belastung unter einer geringeren spezifischen Zugbeanspruchung. Sie haben zudem eine deutlich vorteilhaftere Auflage auf der Seilscheibe als Drahtseile mit konventionellen Außenlitzen (Bild 26). Deshalb haben Drahtseile mit verdichteten Außenlitzen normalerweise eine größere Lebensdauer als Drahtseile mit konventionellen Außenlitzen.

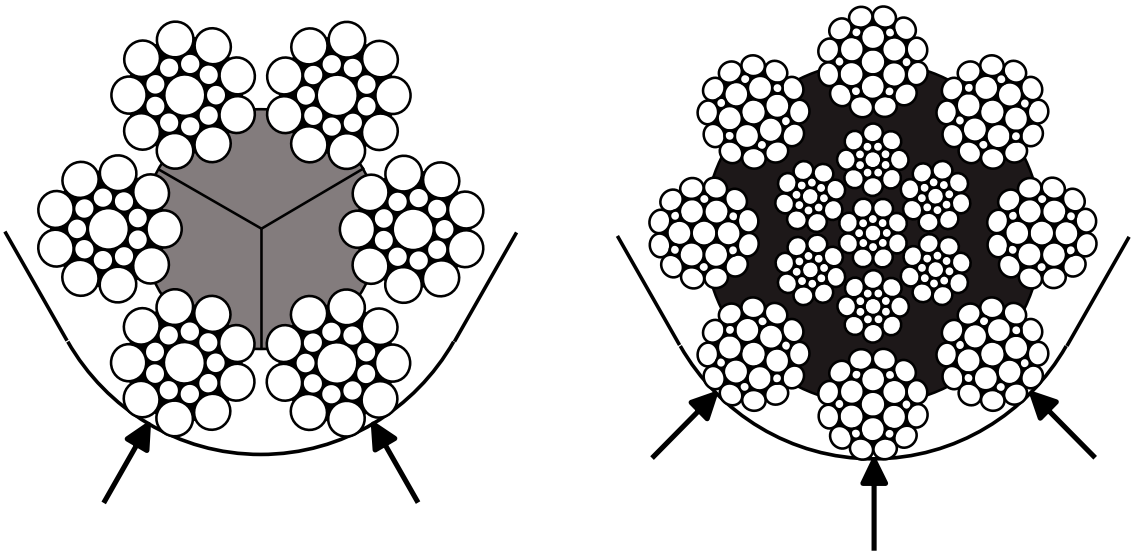


Abb. 24: Wegen ihrer größeren Zahl von Auflagepunkten in der Seilrille und den hieraus resultierenden geringeren Pressungen haben 8-litzige Drahtseile (rechts) eine höhere Biegewechselfestigkeit als 6-litzige Drahtseile (links).

Drahtseile mit einer Kunststoffzwischenlage zwischen der Stahleinlage und den Außenlitzen sind nicht nur unter Biegewechselbeanspruchung erheblich ermüdungsfester als vergleichbare Drahtseile ohne Kunststoffzwischenlage, sie zeigen auch eine deutlich höhere Ermüdungsfestigkeit unter schwellender Zugbeanspruchung.
Unter dynamischer Zugbeanspruchung reduziert das Drahtseil seinen Durchmesser und komprimiert hierbei die Kunststoffzwischenlage. Diese verhält sich hierbei wie ein Stoßdämpfer und reduziert die Spitzenspannungen in den Seildrähten.

Da dynamische Kräfte normalerweise über das Drahtseil in den Kran eingeleitet werden, sorgt dieser eingebaute Stoßdämpfer nicht nur für eine bessere Lebensdauer des Drahtseils selbst; auch die dynamischen Kräfte auf die übrigen Krankomponenten werden deutlich reduziert.

7.2. Lösung 2: Optimieren Sie Ihren Seildurchmesser!

Professor Feyrer von der Universität Stuttgart hat eine Formel zur Vorausberechnung der Drahtseillebensdauer entwickelt.

$$\lg N = b_0 + (b_1 + b_3 \cdot \lg \frac{D}{d}) \cdot (\lg \frac{S}{d^2} - 0.4 \cdot \lg \frac{R_o}{1770}) + b_2 \cdot \lg \frac{D}{d} + \lg f_d + \lg f_L + \lg f_E$$

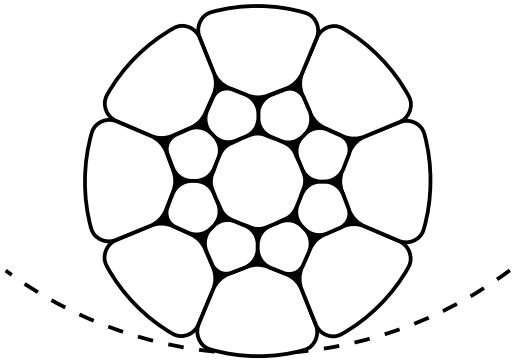


Abb. 25: Gute Auflageverhältnisse für eine verdichtete Außenlitze

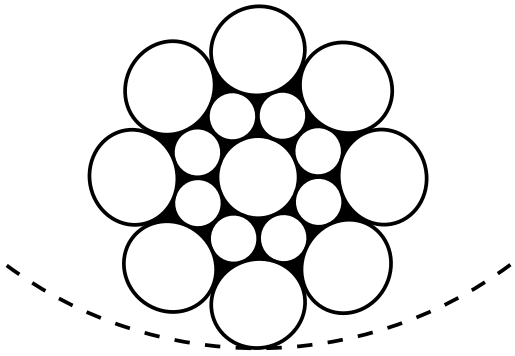


Abb. 26: Schlechte Auflageverhältnisse für eine konventionelle Außenlitze

Die drahtseilspezifischen Parameter b0 bis b3 müssen in einer großen Zahl von Dauerbiegeversuchen für jede einzelne Seilkonstruktion ermittelt werden. Die Parameter sind inzwischen für eine größere Zahl von Normseilen und Spezialdrahtseilen bekannt. f_d berücksichtigt den Größeneinfluß (Seildurchmesser), f_L die Länge der höchstbeanspruchten Seilzone und f_E die Art der Seileinlage.

Der Autor hat ein Programm geschrieben, welches die Drahtseillebensdauer bis Ablegereife und bis Bruch in Abhängigkeit von der gewählten Seilkonstruktion, dem Seilnenndurchmesser, dem Seilscheibendurchmesser und der Stranglast errechnet. Wenn die Geometrie und die Arbeitsbedingungen des Kranes bekannt sind, kann die Anzahl der Hübe bis zur Ablegereife und bis zum Bruch des Drahtseiles vorausgesagt werden.

Selbst wenn die absolute Zahl der Biegewechsel nicht von Interesse ist, kann das Programm dazu genutzt werden, das Ermüdungsverhalten verschiedener Seilkonstruktionen unter den gegebenen Bedingungen miteinander zu vergleichen.

Das Programm bietet zudem die Möglichkeit, einen Optimalen Seilnenndurchmesser zu berechnen. Abb. 27 zeigt die Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Seilnenndurchmesser für eine gegebene Seilkonstruktion, eine Stranglast von 40.000N und einen Seilscheibendurchmesser von 600mm.

Ein Seil vom Nenndurchmesser 10mm muß bereits nach 50.000 Biegewechseln abgelegt werden. Zwar ist das Verhältnis von Scheibendurchmesser zum Seilnenndurchmesser (D/d-Verhältnis) von 60 sehr vorteilhaft für das 10mm-Seil, aber offensichtlich ist die Stranglast von 40.000N viel zu hoch für ein Seil mit einem so kleinen Durchmesser.

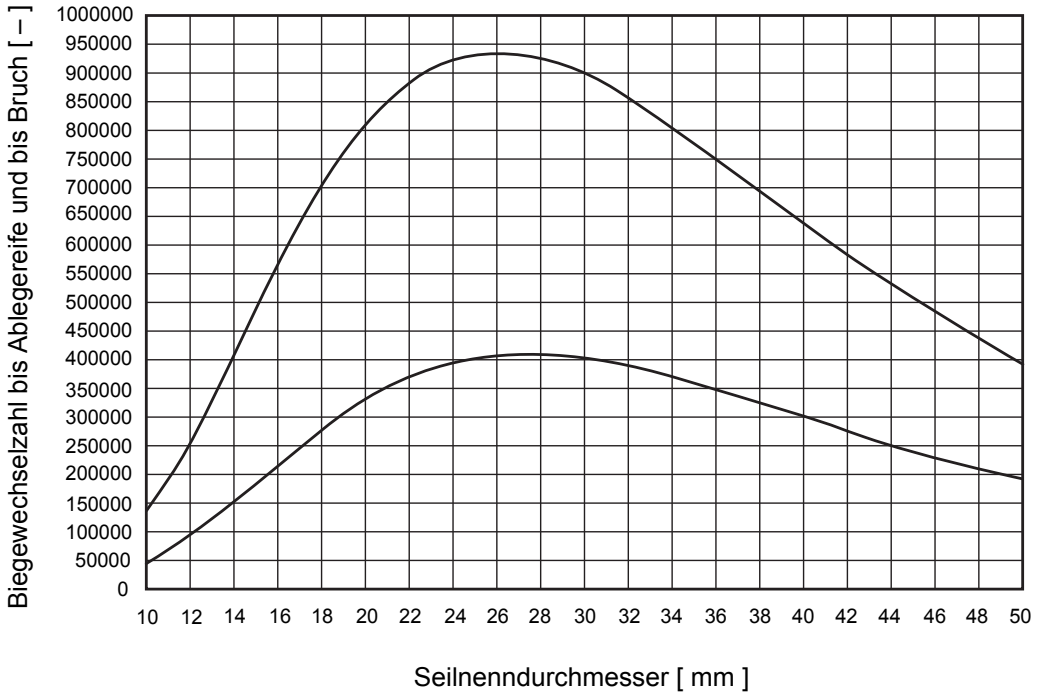


Abb. 27: Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Seilnenndurchmesser

Wenn der Seildurchmesser auf 20mm verdoppelt wird, steigt die Biegewechselzahl auf 340.000, also auf fast den 7-fachen Wert des ersten Ergebnisses. Das D/d-Verhältnis hat sich auf 30 verringert, aber der metallische Querschnitt des Seiles hat sich vervierfacht und die spezifische Zugbeanspruchung entsprechend reduziert.

Das 20mm-Seil kann die Stranglast von 40.000N trotz reduziertem D/d-Verhältnis somit erheblich besser ertragen als das 10mm-Seil.

Wenn der Seildurchmesser noch einmal auf 40mm verdoppelt wird, steigt die Biegewechselzahl jedoch nicht weiter an. Das 40mm-Seil erzielt 300.000 Biegewechsel. Dies ist ein Ergebnis, welches etwas unter dem eines Seiles von 20mm liegt.

Das 40mm-Seil hat einen Metallquerschnitt, der 16 mal so groß ist wie der des 10mm-Seiles. Es ermüdet nicht wegen der Stranglast von 40.000N, sondern weil sich das D/d-Verhältnis auf den sehr unvorteilhaften Wert von 15 verringert hat.

Im linken Teil der Kurven von Abb. 27 haben die Drahtseile vorteilhafte D/d-Verhältnisse. Sie versagen aufgrund zu hoher Zugspannung.
Im rechten Teil der Kurven haben die Seile vorteilhafte Zugspannungen. Sie versagen hier infolge zu hoher Biegespannungen, die aus zu geringen D/d-Verhältnissen resultieren.

Zwischen diesen beiden Zonen finden wir die Maxima der Lebensdauerkurven bei dem Seilnenndurchmesser, für den die Summen der schädigenden Einflüsse von

Stranglast und Biegespannungen minimal werden. Der Drahtseildurchmesser, für den die Biegewechselzahlen ein Maximum erreichen, wird der Optimale Seilnenndurchmesser genannt. In Abb. 27 ist der Optimale Seilnenndurchmesser 27mm. Für diesen Seilnenndurchmesser wird eine mittlere Biegewechselzahl von 410.000 bis Ablegereife erreicht.

Ein Krankonstrukteur sollte keinen Drahtseilnenndurchmesser auswählen, der größer ist als der Optimale Seilnenndurchmesser. Er würde lediglich mehr Geld für weniger Lebensdauer bezahlen. Er sollte im Gegenteil einen Seilnenndurchmesser wählen, der geringfügig kleiner ist als der Optimale Seilnenndurchmesser: In unserem Beispiel (Bild 27) würde ein Seil mit einem Nenndurchmesser von 24mm fast die gleiche Lebensdauer erzielen wie ein Seil mit einem Nenndurchmesser von 27mm.

Das Seil von 24mm ist jedoch 10% dünner als der Optimale Seilnenndurchmesser. Dies bedeutet, dass mit einem deutlich preiswerteren Drahtseil fast die gleiche Lebensdauer erzielt werden kann. Weiterhin kann bei Verwendung eines Drahtseiles mit kleinerem Durchmesser die Trommelbreite erheblich reduziert werden, was zusätzlich die Baukosten des Kranes senkt.

Der wirtschaftlichste Seilnenndurchmesser ist immer geringfügig kleiner als der Optimale Seilnenndurchmesser, er liegt je nach Bauform des Kranes beispielsweise bei 90% des Optimalen Seilnenndurchmessers.

Im Stahlbau bedeutet ‘dicker’ meistens ‘langlebiger’. Bei Drahtseilen bewahrheitet sich oft das Gegenteil.

7.3. Lösung 3: Optimieren Sie Ihren Scheibendurchmesser!

Durch Vergrößerung des Scheibendurchmessers kann die Lebensdauer von laufenden Drahtseilen verlängert werden. Das oben erwähnte Programm berechnet, um wieviel ein Scheibendurchmesser vergrössert werden muß, um das gewünschte Resultat zu erzielen.

Abb. 28 zeigt die Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Scheibendurchmesser. Bei einem Scheibendurchmesser von 600mm ist die Biegewechselzahl bis Ablegereife 400.000. Bei Erhöhung des Scheibendurchmessers um beispielsweise150 mm (+ 25%) steigt die Biegewechselzahl auf 900.000 (+125%).

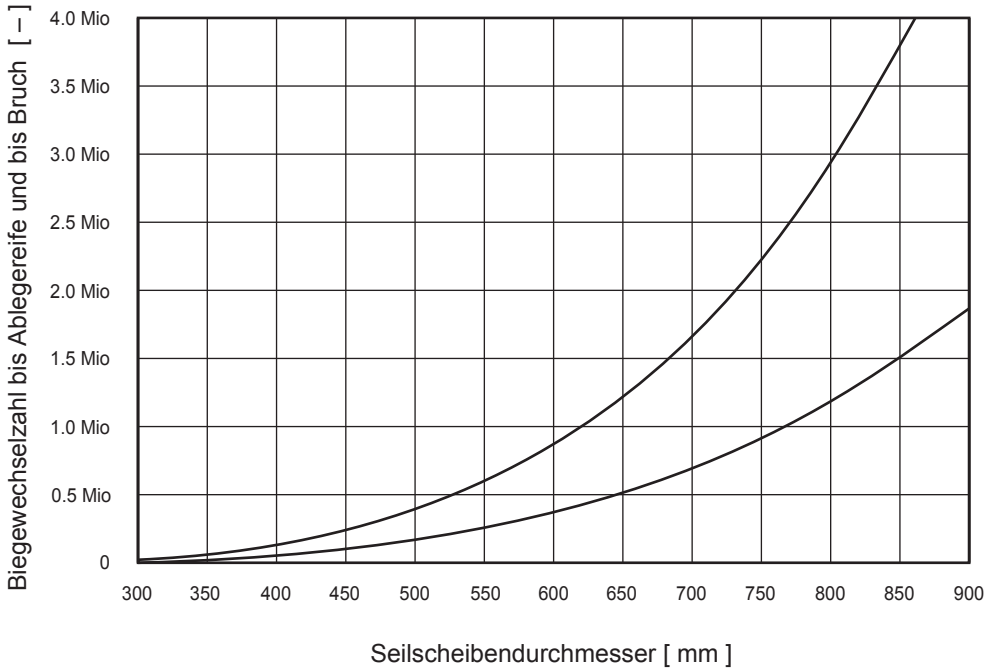


Abb. 28: Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Seilscheibendurchmesser

7.4. Lösung 4: Vermeidung unnötiger Ermüdungsbeanspruchung

Häufig werden Drahtseile in unnötigem Maße durch Biegewechselbeanspruchung geschädigt. Als Beispiel sollen hier die Lebensdauern zweier Drahtseile verglichen werden, die unter sonst identischen Bedingungen mit zwei unterschiedlichen Hakenflaschen eingesetzt werden.

Abb. 29 zeigt eine Hakenflasche mit zwei kleinen Seilscheiben. Während jeder Hubbewegung wird die Drahtseillänge, die durch die Hakenflasche läuft, zwei Biegewechseln unterworfen. Abb. 30 zeigt eine Hakenflasche mit nur einer großen Seilscheibe. Während jeder Hubbewegung wird die Seillänge, die durch die Hakenflasche läuft, nur einem Biegewechsel unterworfen.

Diese Tatsache allein würde bereits die Seillebensdauer verdoppeln. Der Scheibendurchmesser ist jedoch zweieinhalb mal so groß wie in der ersten Hakenflasche, und die Biegewechselzahl, die bei Biegung um einen derartig großen Durchmesser erzielt werden kann, ist neunmal so hoch wie bei den kleinen Seilscheiben. Deshalb erhöht sich die Lebensdauer des Drahtseiles noch einmal um einen Faktor 9. Insgesamt wird die Seillebensdauer in der einrolligen Hakenflasche daher 18 mal so hoch sein wie in der Ausführung mit zwei Seilscheiben!

Abhängig von den Randbedingungen wird ein Gegenbiegewechsel ein Drahtseil etwa 2 bis 7 mal so stark schädigen wie ein einfacher Biegewechsel.

Das Drahtseil des in Abb. 31 gezeigten Hubwerkes wird, da es keinem Gegenbiegewechsel unterworfen ist, allein hierdurch 1,5 bis 4 mal so lange leben wie das Drahtseil des Hubwerkes aus Abb. 32.

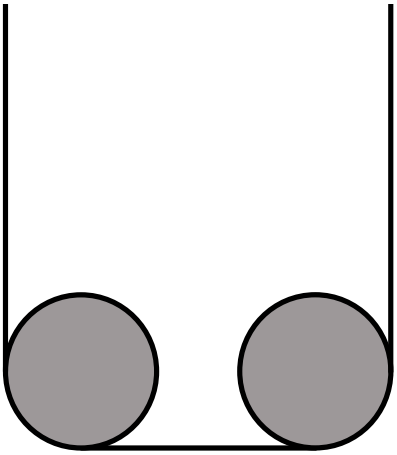


Abb. 29: Hakenflasche mit zwei kleinen Seilscheiben

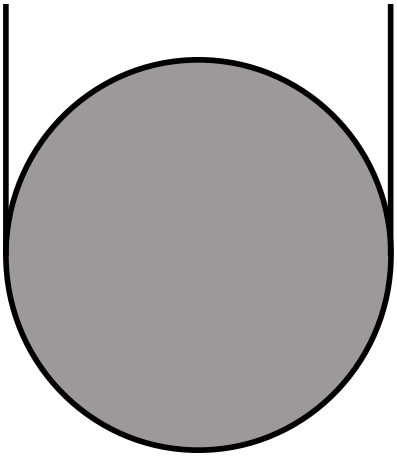


Abb. 30: Hakenflasche mit einer großen Seilscheibe

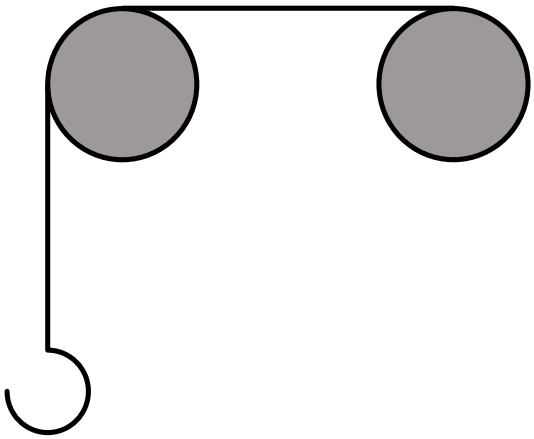


Abb. 31: Hubwerk mit Einfachbiegewechseln

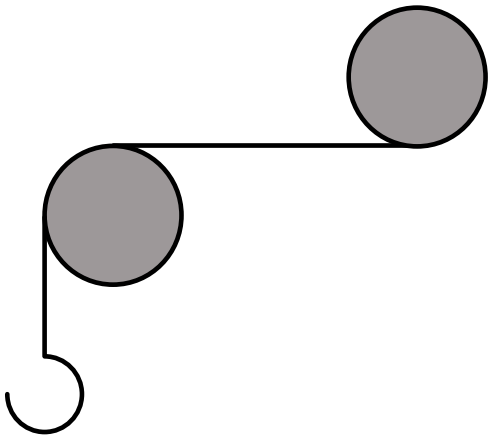


Abb. 32: Hubwerk mit Gegenbiegewechsel

7.5. Lösung 5: Optimieren Sie die Zugschwellfestigkeit durch Reduzierung des Drahtseildurchmessers!

In Zugschwellversuchen mit einer gegebenen Lastamplitude verringert sich die Lebensdauer eines Prüfkörpers normalerweise mit zunehmender Mittelspannung. Zugschwellversuche, die an der Universität Stuttgart durchgeführt wurden, zeigen jedoch, dass sich Drahtseile bis zu einer Gesamtbelastung von etwa 50% der Seilbruchkraft genau entgegengesetzt verhalten: Die Drahtseillebensdauer erhöht sich mit zunehmender Mittelspannung (Abb. 33).

Eine Erklärung für dieses Phänomen könnte sein, dass Drahtseile keine massiven Prüfkörper sind. Drahtseile stellen vielmehr einen Verbund aus vielen Elementen dar, die sich während der Lastwechsel relativ zueinander bewegen können und müssen. Wie man in einem typischen Last-Dehnungsdiagramm für Drahtseile (Abb. 34) sehen kann, sind aber die Dehnungen der Drahtseile und somit auch die Relativbewegungen der Seilelemente zueinander für geringe Mittelspannungen viel kleiner als für große Mittelspannungen. Für schwellend beanspruchte Drahtseile, also beispielsweise für Abspannseile von Kranen, könnte dies bedeuten, dass die Lebensdauern der Drahtseile durch Verwendung kleinerer Seildurchmesser und kleinerer Sicherheitsbeiwerte erhöht werden könnte!

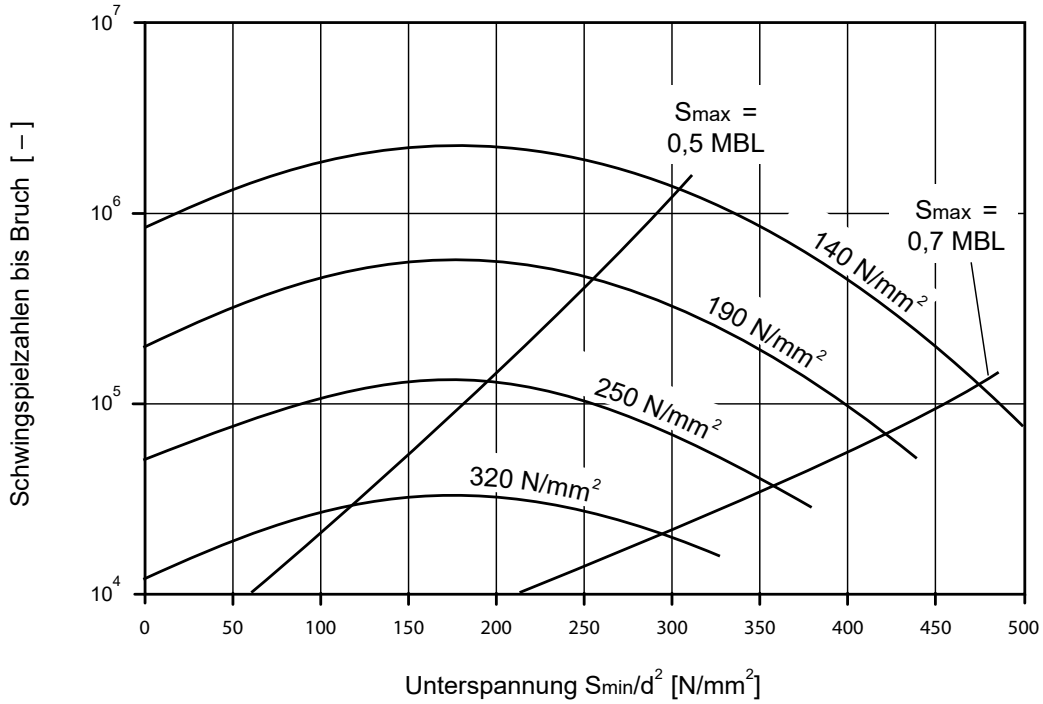


Abb. 33: Mit zunehmender Mittelspannung erzielen Drahtseile bis zu einer Gesamtbelastung von 50% ihrer Mindestbruchkraft höhere Schwingspielzahlen.

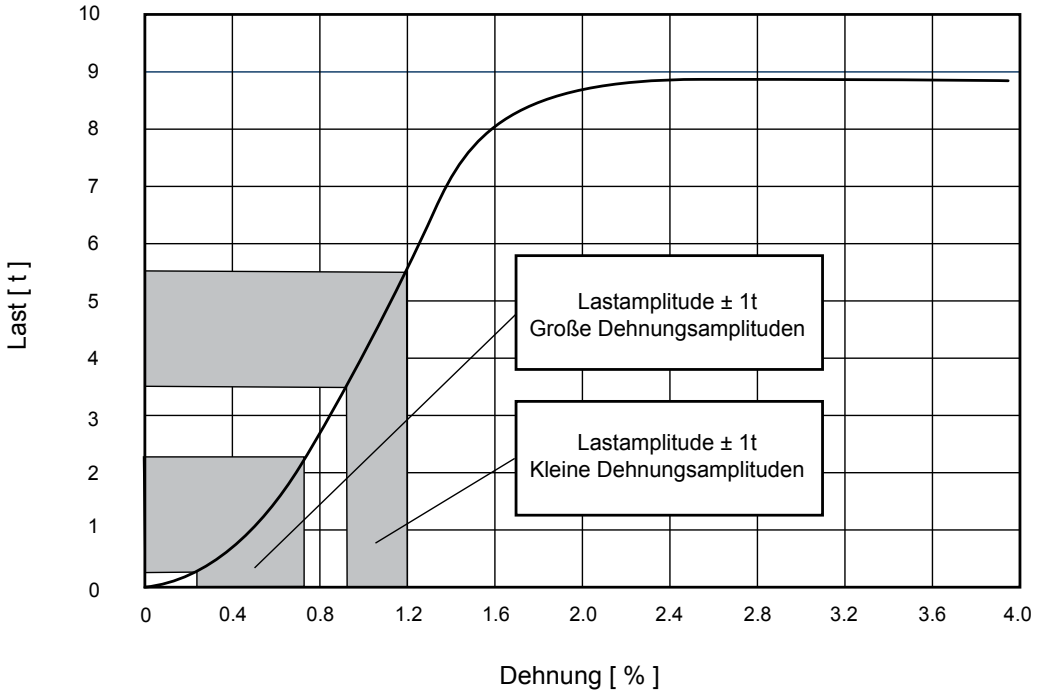


Abb. 34: Typisches Last-Dehnungsdiagramm. Die Dehnungsamplituden sind bei gleichen Lastamplituden für größere Mittellasten erheblich kleiner.

8. Problem: Litzenlockerungen und Korbbildungen

Jeder Kranbetreiber hat auf seinen Drahtseilen schon einmal Litzenlockerungen oder eine Korbbildung vorgefunden. Als Erklärung für diese Seilverformungen werden häufig (sogar noch in der alten Ausführung der ISO 4309!) dynamische Belastungen von Drahtseilen angegeben. In den meisten Fällen werden Draht- und Litzenlockerungen sowie Korbbildungen jedoch durch andere Mechanismen hervorgerufen.

Die häufigste Ursache für das Auftreten von Draht- und Litzenlockerungen sowie für die Erzeugung von Korbbildungen sind Verdrehungen eines Drahtseiles um seine eigene Achse. Betrachten wir als Beispiel ein Seilstück, welches an beiden Enden befestigt und gegen Verdrehen gesichert ist. Wenn wir dieses Drahtseil in der Mitte fassen und einmal um seine eigene Achse verdrehen (Abb. 35), verlängern wir es auf der einen Seite und verkürzen es auf der anderen (Abb. 36). Als Folge werden auf der einen Seite die Außenlitzen (Abb. 37) und auf der anderen Seite die Innenlitzen zu lang sein (Abb. 38).

Aber was könnte ein Drahtseil auf einem Kran um seine eigene Achse verdrehen? Jede Seilscheibe und jede Trommel könnte dies tun. Wenn ein Drahtseil unter einem Ablenkwinkel auf eine Seilscheibe aufläuft, wird es die Seilscheibe zuerst an der Flanke der Seilrille berühren und dann in den Rillengrund hinabrollen. (Abb. 39). Während dieses Vorgangs wird das Drahtseil um seine eigene Achse verdreht. Mit zunehmendem Ablenkwinkel wird die Verdrehung zunehmen.

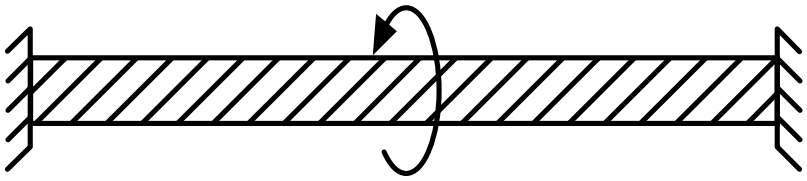


Abb. 35: Die gewaltsame Verdrehung eines Drahtseils ...

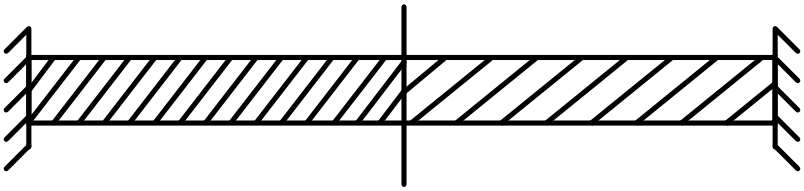


Abb. 36: ... verkürzt die Schlaglänge auf der einen Seite (links) und verlängert sie auf der anderen (rechts)

Abb. 37: Längenüberschuß der Außenlitzen, verursacht durch Aufdrehen des Drahtseils

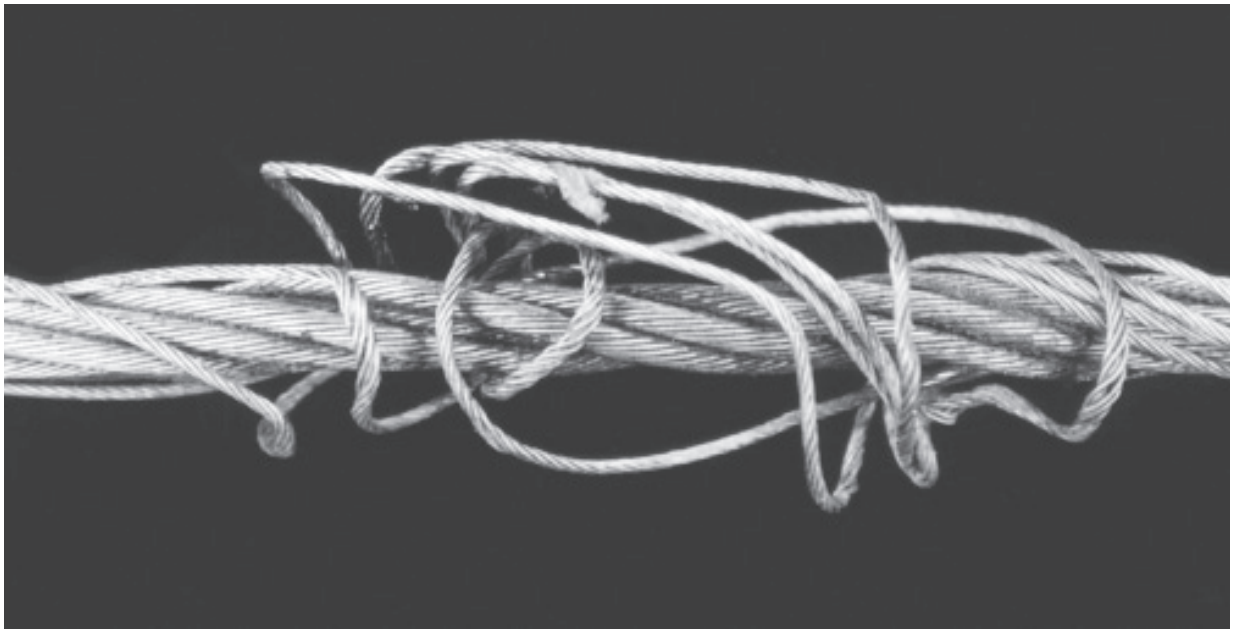


Abb. 38: Längenüberschuß der Innenlitzen, verursacht durch Zudrehen des gleichen Drahtseils

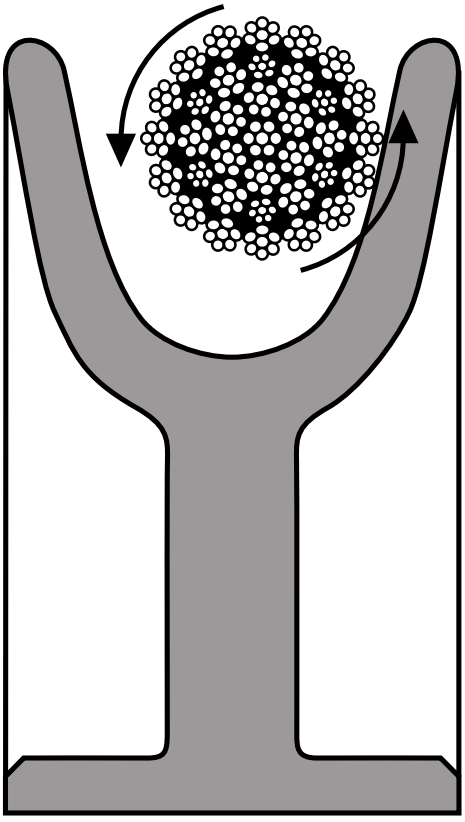


Abb. 39: Das Drahtseil rollt in den Rillengrund hinab. Es wird durch diesen Vorgang verdreht.

Abb. 40 und Abb. 41 zeigen eine Folge von Seilquerschnitten, die in einer Seilscheibe mit einem Rillenöffnungswinkel von 35° (nach US-Norm) hineinlaufen. Wenn das Drahtseil unter einem Ablenkwinkel von 1° in die Scheibe einläuft, berührt es die Flanken der Seilscheibe in einem sehr tiefen Punkt und wird lediglich um 5° verdreht.

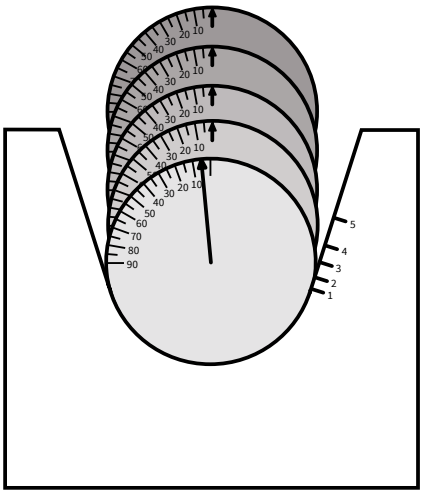


Abb. 40: Rillenöffnungswinkel 35°.Geringe Seilverdrehung bei einem Ablenkwinkel von 1°

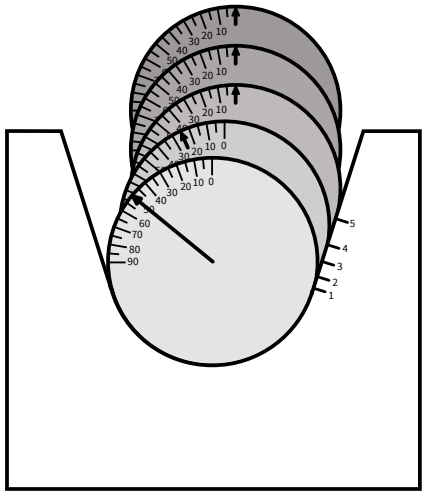


Abb. 41: Rillenöffnungswinkel 35°. Große Seilverdrehung bei einem Ablenkwinkel von 5°

Wenn das Drahtseil in die gleiche Seilscheibe unter einem Ablenkwinkel von 5° einläuft, wird es die Flanke in einer sehr hohen Position berühren und beim Hinabrollen um 50° verdreht werden!

Natürlich wird ein Drahtseil nicht immer wie ein Zahnrad an einer Zahnstange die Flanke hinabrollen. Die Abwärtsbewegung wird immer ein Mischung zwischen Rollen und Gleiten darstellen. Das Maß der Verdrehung, welches hierbei erzeugt wird, wird also sehr stark von der Reibung zwischen Drahtseil und Seilscheibe abhängen.

8.1. Lösung 1: Seilschmierung

Die einfachste Möglichkeit, den Reibungskoeffzienten zwischen Drahtseil und Seilscheibe zu reduzieren, ist, das Drahtseil zu schmieren. Ein gut geschmiertes Drahtseil wird beim Einlaufen in eine Seilscheibe viel weniger verdreht werden als ein trockenes oder korrodiertes Seil.

8.2. Lösung 2: Stahlscheiben anstelle von Kunststoffscheiben

Der Reibungskoeffizient zwischen Stahl und Kunststoff ist höher als der Reibungskoeffizient zwischen Stahl und Stahl. Unter den gleichen geometrischen Bedingungen wird daher ein Drahtseil auf einer Stahlscheibe erheblich weniger verdreht werden als auf einer Kunststoffscheibe. Kunststoffscheiben sollten daher bevorzugt in Positionen eingesetzt werden, wo die Ablenkwinkel klein sind.

8.3. Lösung 3: Seilscheiben mit größeren Öffnungswinkeln

Wenn die Seilscheibe einen größeren Öffnungswinkel besitzt, läuft das Drahtseil unter einem Ablenkwinkel viel tiefer in die Rille hinein, bevor es den Flansch berührt.

Abb. 42 zeigt eine Folge von Seilquerschnitten, die in eine Rille mit einem Öffnungswinkel von 60° unter einem Ablenkwinkel von 5° einlaufen. Das Drahtseil berührt die Flanke in einer deutlich tieferen Position als in Bild 39 und wird lediglich um 25° verdreht. Durch eine Vergrösserung des Öffnungswinkels von 35° auf 60° wird somit das Maß der Verdrehung um 50% reduziert.

Deshalb sollten Seilscheiben mindestens einen Öffnungswinkel von 45° aufweisen, wie in DIN 15061 festgelegt. Ein Öffnungswinkel von 52° (wie in British Standard) ist noch besser.

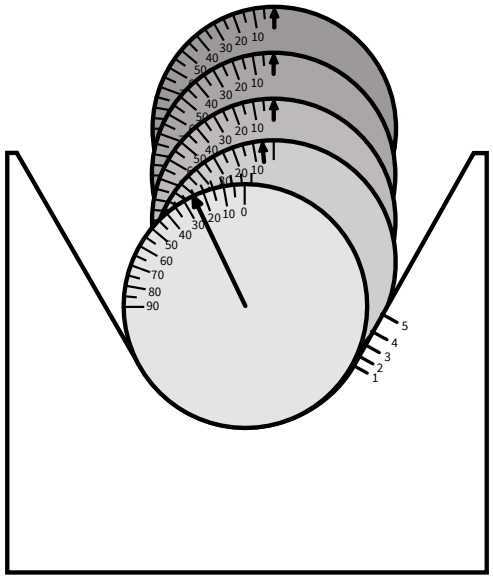


Abb. 42: Rillenöffnungswinkel 60°. Deutlich verringerte Seilverdrehung bei einem Ablenkwinkel von 5°

8.4. Lösung 4: Benutzen Sie Drahtseile mit einer Kunststoffzwischenlage!

Drahtseile mit einer Kunststoffzwischenlage sind erheblich widerstandsfähiger gegen die Lockerung von Einzellitzen und gegen Korbbildungen als Drahtseile anderer Machart.

8.5. Lösung 5: Vermeiden Sie zu enge Seilrillen!

Litzenlockerungen und Korbbildungen können auch durch zu enge Rillen verursacht werden. Wenn der Rillenradius zu klein ist (Abb. 43), wird das Drahtseil beim Auflaufen auf die Seilscheibe oder die Seiltrommel komprimiert werden. Anschließend werden die Aussenlitzen für den verringerten Seildurchmesser zu lang sein, und die überflüssige Litzenlänge wird zu einem Punkt hin verschoben werden. An dieser Stelle (üblicherweise ist dies der Endpunkt der Bewegung) werden wir schließlich Litzenlockerungen oder eine Korbbildung vorfinden.

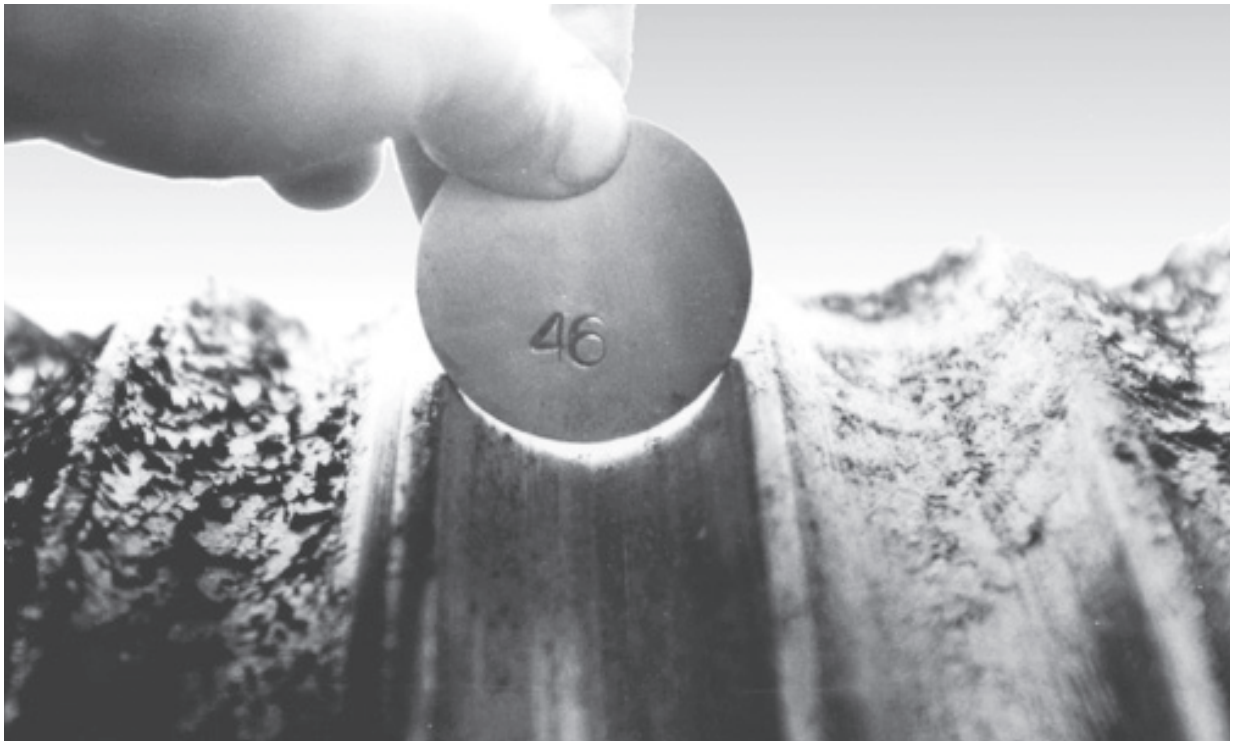


Abb. 43: Zu enge Seilrille

Die Seilrille sollte einen Radius von 0,53 bis 0,54 mal Seilnenndurchmesser besitzen. Wenn der Rillenradius kleiner ist, sollte die Seilscheibe oder Seiltrommel nachgearbeitet oder ersetzt werden. Wenn dies nicht möglich ist, sollte ein Seil mit gleicher Bruchkraft, aber geringerem Seilnenndurchmesser eingesetzt werden, für das die geforderten Bedingungen dann wieder gelten.

9. Problem: Beschädigung der Drahtseile auf der Seiltrommel

Drahtseile werden häufig auf der Trommel mechanisch beschädigt. Unter dem Einfluß eines Ablenkwinkels kann das auf- oder ablaufende Drahtseil beispielsweise gegen eine Nachbarwindung gezogen werden (Abb. 44). Hierbei können die Außendrähte an den Berührungspunkten beschädigt werden.

Abb. 44: Unter dem Einfluß eines Ablenkwinkels wird das Drahtseil gegen seine Nachbarwindung gezogen. Die Außendrähte werden an der Berührungsstelle beschädigt.

9.1. Lösung 1: Gerillte Seiltrommeln und eine Lebus-Spulung

Gerillte Seiltrommeln sollten gegenüber ungerillten Trommeln bevorzugt werden. Bei Mehrlagenspulung sollte das Lebus-Spulsystem benutzt werden.

9.2. Lösung 2: Drahtseile in Gleichschlagausführung mit verdichteten Außenlitzen

Die Außendrähte zweier benachbarter Seilwindungen eines Kreuzschlagseiles können sich ineinander verzahnen (Abb. 45), weil sie an der Seiloberfläche in Richtung der Seilachse liegen. Wenn eine der beiden Windungen sich in einer Abwärtsbewegung in die Trommel hineinlegt oder in einer Aufwärtsbewegung die Trommel verläßt, werden die verzahnten Außendrähte einander beschädigen.

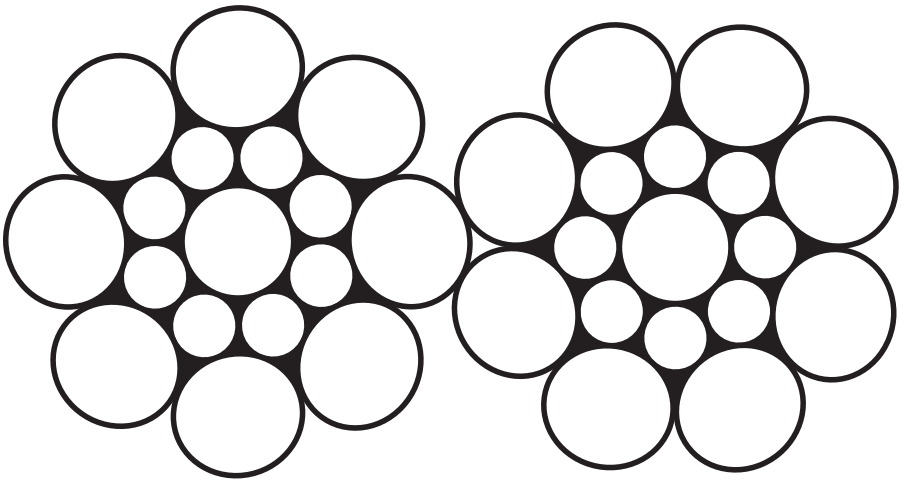


Abb. 45: Die Außendrähte zweier benachbarter Windungen eines Kreuzschlagseils können sich ineinander verzahnen.

Wenn Gleichschlagseile verwendet werden, können sich die Außendrähte zweier Nachbarwindungen nicht ineinander verzahnen, weil sie in der Berührungsstelle an der Seiloberfläche auf der einen Seite aufwärts und auf der anderen Seite abwärts gerichtet liegen. Deshalb werden sich die Außendrähte von Gleichschlagseilen gegenseitig beim Auf- und Abspulen erheblich weniger beschädigen.

Verdichtete Außenlitzen zeigen weitere Vorteile (Abb. 46): Die Berge und Täler der Außendrähte sind abgeflacht und geglättet. Zudem weisen die Außendrähte einen erheblich höheren Metallquerschnitt auf und besitzen somit einen vergrösserten Widerstand gegen Abrieb und mechanische Beschädigung.

Für Trommeln mit Mehrlagenbewicklung sollten lediglich Drahtseile in Gleichschlagausführung mit verdichteten Aussenlitzen verwendet werden.

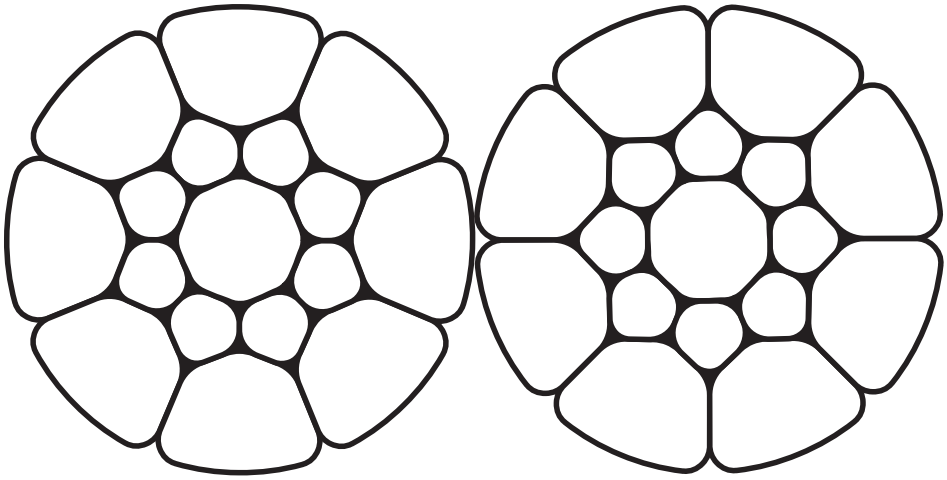


Abb. 46: Die Berge und Täler verdichteter Außenlitzen sind abgeflacht und geglättet. Der Metallquerschnitt ist erhöht, um Abrieb und mechanischer Beschädigung besser zu widerstehen.

10. Problem: Gute Drahtseile sind teuer.

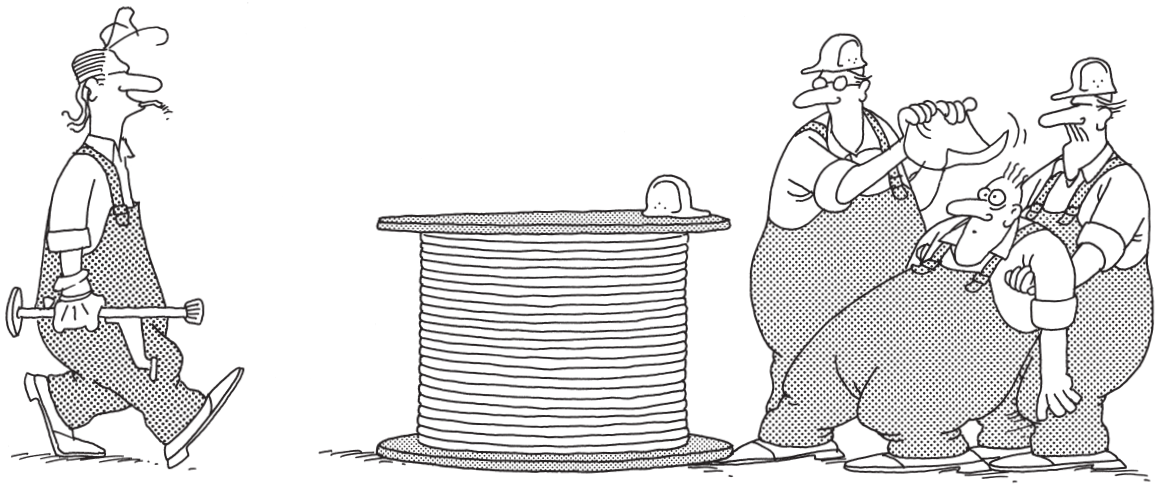
Hochwertige Drahtseile sind teurer als konventionelle 08/15-Konstruktionen.

10.1. Lösung: Berechnen Sie die Gesamtkosten!

Schlechte Seile sind billiger als gute Seile. Aber nach einer gewissen Zeit werden Sie feststellen, dass Sie drei schlechte Seile gekauft haben, wo ein gutes genügt hätte.

Der Transport eines schlechten Seiles zur Baustelle kostet soviel wie der Transport eines guten Seiles, und die Montage eines schlechten Seiles kostet so viel wie die Montage eines guten Seiles. Nur dass diese Kosten bei Verwendung schlechter Seile eventuell dreimal so oft anfallen wie bei Verwendung von guten Spezialdrahtseilen.

Sie sparen eine Menge Geld, wenn Sie direkt ein hochwertiges Produkt kaufen. Für Drahtseile gilt das noch mehr als für jedes andere Maschinenelement.



Für jedes Seilproblem gibt es eine Lösung: Rufen Sie uns an!

Der Autor: Dipl.-Ing. Roland Verreet
Ingenieurbüro für Fördertechnik
Grünenthaler Str. 40a • 52 072 Aachen
Tel. 0241- 173147 • Fax 0241- 12982
E-mail: R.Verreet@t-online.de

Ingenieurbüro für Fördertechnik
Dipl.-Ing. Roland Verreet

Grünenthaler Str. 40a • 52072 Aachen
Tel.: 0241- 173147 • Fax: 0241- 12982
Mail: R.Verreet@t-online.de
www.seile.com