

# Stahldrahtseile mit variablen Schlaglängen

von Dipl.- Ing. Roland Verreet

Wenn ein Drahtseil mit gegen Verdrehen gesicherten Enden horizontal in eine Zugprüfmaschine eingebaut und einer Zugkraft unterworfen wird, wird jedes Seilelement der Länge  $\delta L$  durch äußere Zugkräfte  $S$  und durch Drehmomente  $M(S)$  beaufschlagt, die von der äußeren Zugkraft der Seilmacht und dem Seildurchmesser abhängen. (Fig. 1)

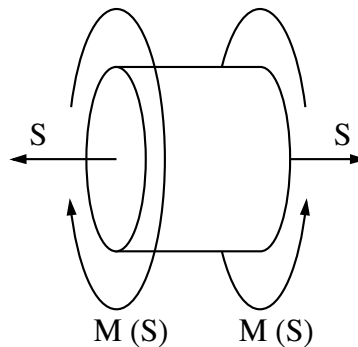


Bild 1: Horizontales Seilelement

Es herrscht ein Kräftegleichgewicht:

$$S - S = 0,$$

und es herrscht ein Gleichgewicht der Momente:

$$M(S) - M(S) = 0.$$

Das Drehmoment eines unverdrehten Drahtseils kann geschrieben werden als

$$(1) \quad M = c_1 \cdot d \cdot S$$

mit

$M$	Seildrehmoment
$c_1$	Konstante
$d$	nominaler Seildurchmesser und
$S$	Seilzugkraft.

Wenn das Seil vor der Belastung verdreht wird, verändert sich sein Drehmoment zu

$$(2) \quad M = c_1 \cdot d \cdot S + c_2 \cdot d^2 \cdot S \cdot \omega + c_3 \cdot G \cdot d^4 \cdot \omega$$

mit

$c_2, c_3$	Konstanten
$G$	Schubmodul
$\phi = \omega \cdot l_R$	Verdrehwinkel des Seiles
$\omega$	Verdrehwinkel pro Längeneinheit
$l_R$	Seillänge

Nun besteht das Drehmoment aus 3 Komponenten, von denen 2 vom Verdrehwinkel pro Seillängeneinheit  $\omega$  und 2 von der Seilzugkraft  $S$  abhängen. Für den Seilbetreiber hat dies folgende Konsequenzen: Wenn das Seil während der Montage oder während des Betriebes *nicht* verdreht wird, wird die Verdrehung pro Seillängeneinheit  $\omega$  null sein, und die Formel (2) reduziert sich zu Formel 1. Formel 1 hängt jedoch nur von der Seilzugkraft  $S$  ab. Dies bedeutet, daß bei unverdrehtem Seil das Seildrehmoment immer dann null sein wird, wenn die Seilzugkraft zu null wird.

Wird jedoch das Seil während der Montage oder während des Einsatzes verdreht, wird der Verdrehwinkel pro Längeneinheit  $\omega$  nicht null sein, und Formel (2) kommt zur Anwendung. Um das in einem unbelasteten, verdrehten Seil herrschende Drehmoment zu berechnen, muß die Seilzugkraft  $S$  in Formel (2) zu null gesetzt werden, und man erhält die folgende Gleichung:

$$(3) \quad M (S=0) = c_3 \cdot G \cdot d^4 \cdot \omega$$

Wie man sieht, kann ein verdrehtes Seil sogar im unbelasteten Zustand ein sehr großes Drehmoment aufweisen. Es wird daher im entlasteten Zustand eine Tendenz aufweisen, sich in eine Schlaufe zu legen. Bei einer erneuten Belastung kann sich diese Schlaufe dann zuziehen. Eine Klankenbildung oder im ungünstigsten Fall sogar ein Seilbruch könnte die Folge sein.

Deshalb darf ein Drahtseil während seiner Handhabung und Montage auf keinen Fall verdreht werden. Zudem müssen die Ablenkwinkel auf Seiltrommeln und Seilscheiben klein gehalten werden, um auch die im Betrieb erzeugten Seilverdrehungen so gering wie möglich zu halten.

Es wird jedoch allgemein als gegeben hingenommen, daß eine Seilverdrehung auf keinen Fall vermieden werden kann, wenn ein Drahtseil vertikal in einem Bergwerkschacht oder auf den Meeresboden hinunterhängt, und zwar selbst dann nicht, wenn beide Seilenden gegen Verdrehen gesichert werden.

Wenn ein derartiges Seil mit einer äußeren Kraft (zum Beispiel mit der Gewichtskraft des Förderkorbes) beaufschlagt wird, wird jedes Seilelement der Länge  $\delta L$  an seinem unteren Ende einer Kraft  $S$  ausgesetzt, die dieser Gewichtskraft und dem Gewicht des unter ihm hängenden Seiles entspricht, an seinem oberen Ende jedoch der gleichen Kraft plus dem Gewicht  $\delta S$  des Seilelementes selbst (Fig. 2).

Wir haben nun immer noch ein Gleichgewicht der Kräfte,

$$S + \delta S - (S + \delta S) = 0$$

aber mit der Ausnahme eines völlig drehungsfreien Drahtseils, bei dem das Drehmoment für jede Zugkraft 0 ist, haben wir kein Momentengleichgewicht mehr:

$$M(S) - M(S + dS) \neq 0$$

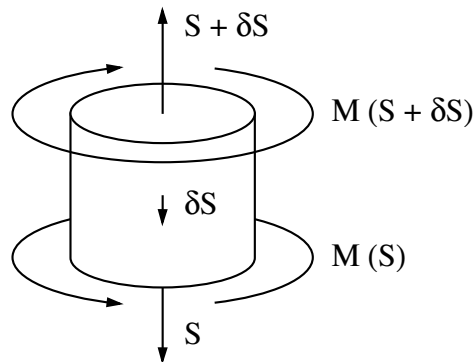


Bild 2: Vertikales Seilelement

Das Drahtseil wird sich daher in Richtung des größeren (oberen) Drehmomentes aufdrehen. Weil jedoch beide Seilenden gesichert sind, kann sich die Zahl der Seilschlaglängen nicht verändern. Die Schlängen werden sich daher bei gleichbleibender Gesamtzahl im oberen Seilbereich verlängern und im unteren verkürzen.

Lediglich an drei Stellen wird die ursprüngliche Schlaglänge erhalten bleiben: an den beiden Seilenden und an einer Stelle nahe (aber nicht genau in) der Mitte des Seiles. Jedes Seilstück wird sich genau so verformen, daß sich sein Verdrehwinkel pro Längeneinheit  $\omega$  proportional mit der Seilkraft so verändert, daß Gleichung (2) erfüllt ist. Bild 3 zeigt eine typische Schlaglängenverteilung.

Im oberen Bereich des Schachtes wird sich das Drahtseil stark aufdrehen, im unteren stark zudrehen. Dies hat folgende Konsequenzen:

1. Bei Seilentlastung wird das Drahtseil versuchen, Schlaufen und Klanken zu bilden. In der Vergangenheit konnte eine große Zahl von Seilrissen auf diesen Mechanismus zurückgeführt werden.

2. Die Seildrähte haben unterschiedliche Längen, abhängig von ihrer Position in den Litzen (die innersten Elemente sind die kürzesten) und abhängig von den Schlaglängen (je kürzer die Schlaglängen, desto länger die Drähte). Eine gegenüber dem Herstellungszustand unveränderte Seilschlaglänge garantiert eine relativ homogene Kraftverteilung zwischen den Seildrähten. Jede Veränderung der Schlaglänge wird Längendifferenzen zwischen den Drähten erzeugen. Eine ungleichmäßige Kraft-

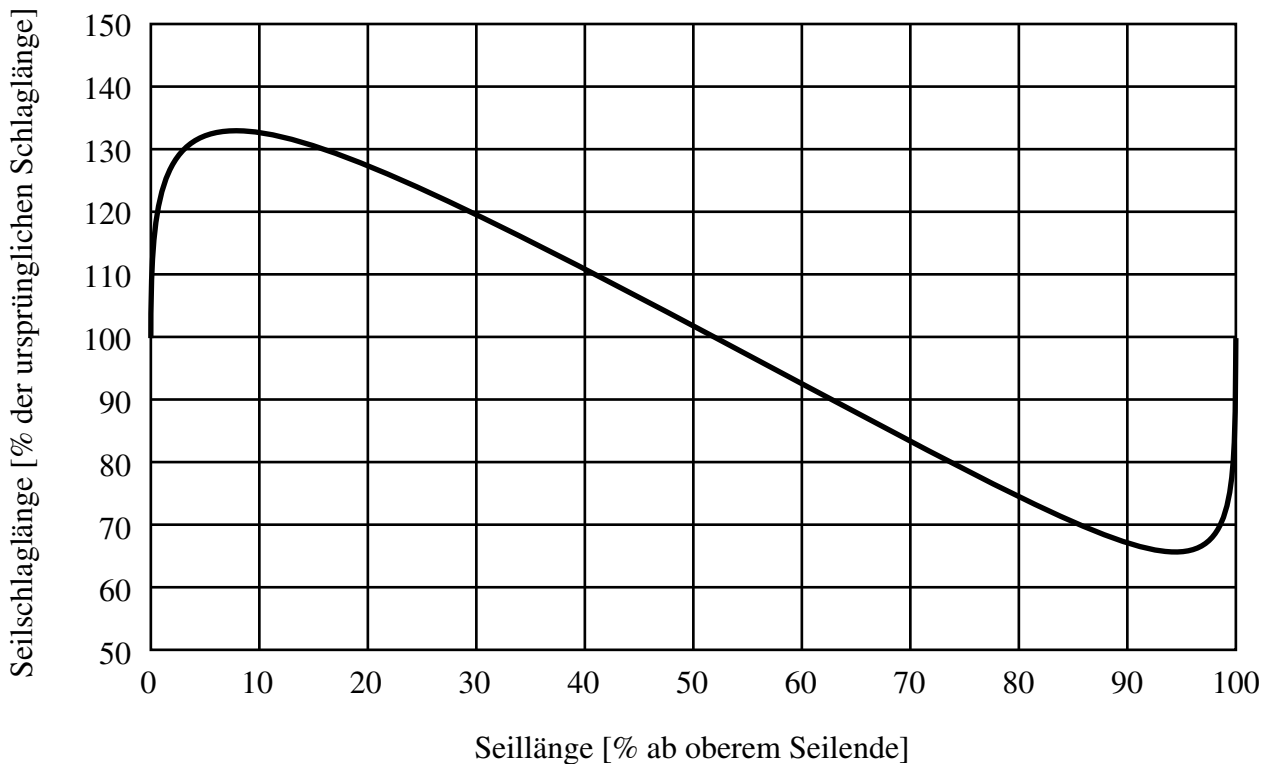


Bild 3: *Seilschlaglänge entlang der Seillänge (schematisch)*

verteilung zwischen den Seildrähten und das vorzeitige Versagen überproportional beanspruchter (in der Regel: innerer) Drähte ist die Folge. Aus diesem Grund erreichen Schachtfördererseile nie die aufgrund ihrer Belastungsgeschichte zu erwartenden Lebensdauern und zerstören sich in der Regel von innen heraus.

3. Parallelschlaglitzten der Macharten Seale, Filler, Warrington oder Warrington-Seale besitzen eine weit größere Ermüdungsfestigkeit als gedeckte (in zwei Arbeitsgängen mit unterschiedlichen Schlaglängen hergestellte) Litzenkonstruktionen, weil sie Drahtüberkreuzungen zwischen aufeinanderfolgenden Drahtlagen vermeiden. Wenn sie jedoch, wie oben beschrieben, in Schachtförderanlagen verdreht werden, erzeugen sie größere Unterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Drahtlagen als die gedeckten Macharten und versagen daher früher. Deshalb können gerade die ermüdungsfestesten Litzenkonstruktionen im Bergbau, und besonders in tiefen Schächten, nicht eingesetzt werden.

Diese Probleme könnten jedoch vermieden werden, wenn das Drahtseil seine Schlaglänge nicht verändern müßte, um in einen Gleichgewichtszustand zu gelangen. Wie könnte dies erreicht werden?

Offensichtlich müßte das Drehmoment des Drahtseils entlang der Seillänge konstant bleiben:

(4) 
$$M = \text{const.}$$

Wenn dies ohne Verdrehung des Drahtseils erzielt werden müßte ( $\omega = 0$ ), könnte die Gleichung (2) für das Drehmoment reduziert werden zu

$$(5) \quad M = c_1 \cdot d \cdot S = \text{const.}$$

Eine erste Lösung für diese Gleichung wäre ein völlig drehungsfreies Seil ( $c_1 = 0$ ). In einem derartigen Seil wäre das Drehmoment immer 0, unabhängig davon, wie groß der Seildurchmesser wäre und unabhängig davon, wie stark die Last  $S$  entlang der Seillänge anstiege. Drehungsarme und drehungsfreie Seile zeigen jedoch in der Schachtförderung andere Nachteile, weshalb normalerweise nicht-drehungsarme Drahtseile bevorzugt werden.

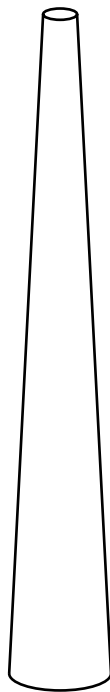


Bild 4: *Im Durchmesser abgestuftes Drahtseil mit konstantem Drehmoment entlang der Seillänge*



Bild 5: *Im Durchmesser abgestuftes Drahtseil mit konstantem Sicherheitsbeiwert entlang der Seillänge*

Da die Seilzugkraft zum oberen Seilende hin ansteigt, könnte ein konstantes Drehmoment entlang der Seillänge dadurch erzielt werden, daß der Seildurchmesser nach oben hin im gleichen Maße abnähme wie die Seilkraft zunimmt. Das Resultat wäre ein im Durchmesser abgestuftes Drahtseil, welches verrückterweise am unteren Ende, wo die Zugkräfte klein sind, einen großen Durchmesser aufweist, am oberen Ende jedoch, wo die Zugkräfte groß sind, einen kleinen Durchmesser (Bild 4).

Wollten wir ein Drahtseil mit konstanten Zugspannungen (konstantem Sicherheitsbeiwert) entlang der Seillänge konstruieren, erhielten wir genau die entgegengesetzte Lösung: ein im Durchmesser abgestuftes Drahtseil mit einem kleinen Durchmesser

am unteren Ende (wo die Zugkräfte klein sind) und einem großen Durchmesser am oberen Ende (wo die Zugkräfte groß sind) (Bild 5).

Offensichtlich schließen die beiden Lösungen einander aus.

Mit der sich hieraus ergebenden weiteren Einschränkung, daß der Seildurchmesser  $d$  konstant bleiben muß, gibt es für Gleichung (5) nur noch eine weitere praktikable Lösung: der Faktor  $c_1$  muß sich entlang der Seillänge in dem gleichen Maße *verringern*, wie sich die Seilkraft  $S$  *vergrößert*. Der Faktor  $c_1$  jedoch hängt von der Seilgeometrie ab und verändert sich im wesentlichen mit der Schlaglänge des Drahtseils. Die einfachste Lösung besteht daher darin, während der Seilherstellung die Schlaglänge des Seiles entlang der Seillänge kontinuierlich (oder in Stufen) so zu verändern, daß für die durchschnittlichen Belastungsbedingungen des Seiles an jeder Stelle  $x$  entlang der Seilelänge das Produkt des Drehmomentfaktors  $c_1(x)$ , multipliziert mit der an dieser Stelle wirkenden Seilkraft  $S(x)$ , den gleichen Wert ergibt:

$$c_1(x) \cdot S(x) = \text{const.}$$

Wenn zum Beispiel die durchschnittlichen Seilkräfte zwischen 80% des mittleren Zugkraftwertes (am unteren Seilende) und 120% des mittleren Zugkraftwertes (am oberen Seilende) variieren, sollte der Drehmomentfaktor  $c_1$  des Seiles zwischen 120% (am unteren Seilende) und 80% (am oberen Seilende) des "normalen" Drehmomentfaktors variieren.

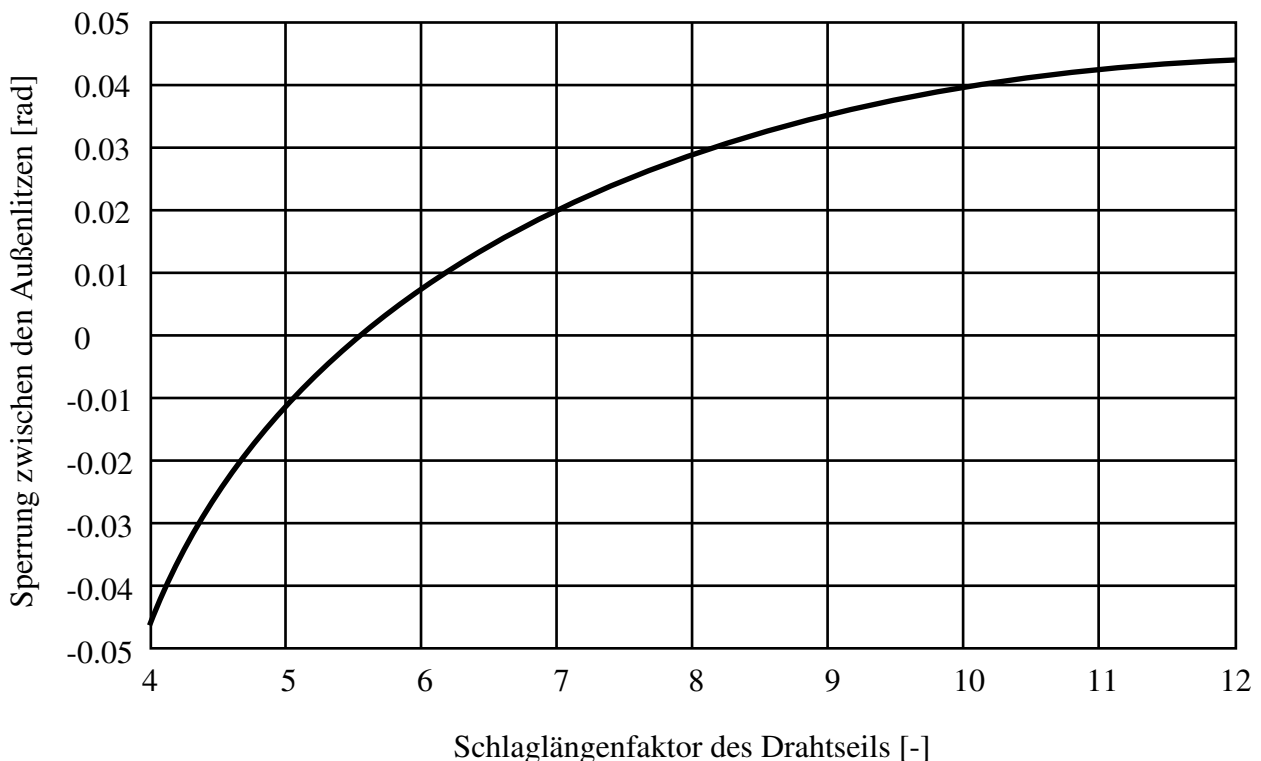


Bild 6: Sperrungen zwischen den Außenlitzen in Abhängigkeit von der Seilschlaglänge

Auf den ersten Blick scheint es schwierig zu sein, ein derartiges Seil herzustellen. In Verseilmaschinen älterer Bauart sorgt ja üblicherweise ein mechanisches Getriebe zwischen Verseilkorb und Auszugsscheiben für eine *konstante* Schlaglänge. Die Schlaglänge kann hier durch Auswechseln von Zahnrädern verändert werden.

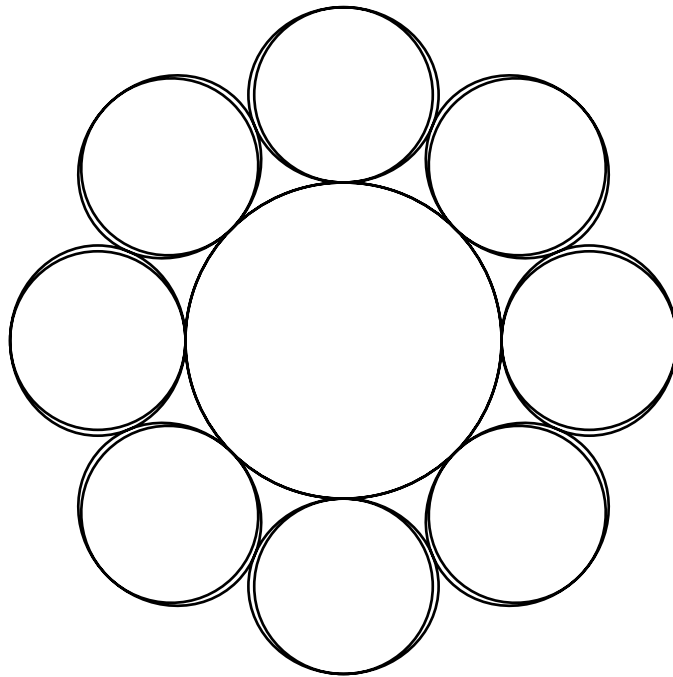


Bild 7: Achtlitziges Seil mit Schlaglängenfaktoren zwischen 12 und 5.5.

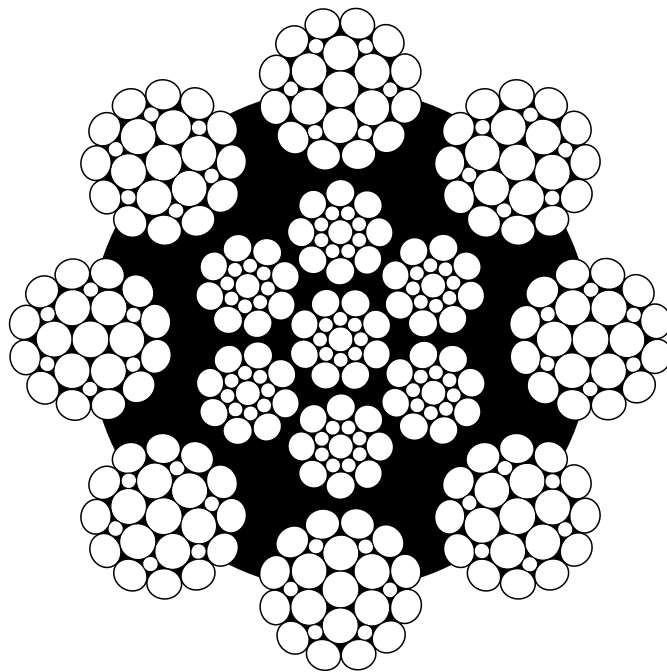


Bild 8: Achtlitziges Seil mit Kunststoffzwischenlage und Kunststoffstegen zwischen den Außenlitzten. Die Stege halten die Litzen bei jeder Schlaglänge auf Abstand (Casar Stratoplast).

In modernen Verseilmaschinen sind Verseilkorb und Abzugsscheiben jedoch elektronisch gekoppelt. Hier kann die Seilproduktion mit einer Schlaglänge begonnen werden, die kleiner ist als die normale Seilschlaglänge (unteres Seilende) und dann kontinuierlich verlängert werden, bis am anderen Ende des Seiles (oberes Seilende) die maximal erforderliche Schlaglänge erreicht ist.

Wenn die Verseilmaschine keine kontinuierliche Veränderung der Schlaglänge während der Fertigung erlaubt, kann das Seil in Stufen mit zunehmenden oder abnehmenden Schlaglängen gefertigt werden. Die Seilverdrehung im Betrieb wird dann gegenüber dem Seil mit konstanter Schlaglänge um etwa den Faktor der Stufenzahl reduziert, aber nicht vollständig eliminiert werden. Ein in 10 Stufen gefertigtes Drahtseil wird beispielsweise nur noch ein zehntel der Verdrehungen des Seiles mit konstanter Schlaglänge aufweisen.

Der optimale Litzen- und Herzseildurchmesser wird sich mit der Schlaglänge entlang der Seillänge verändern. Die Seilelemente können jedoch, wie der Autor ermittelt hat, trotzdem mit konstantem Durchmesser gefertigt werden. Bild 6 zeigt, wie sich die Sperrungen zwischen den Außenlitzen eines achtlitzigen Seiles verändern, wenn die Durchmesser der Außenlitzen und des Herzseiles konstant gehalten werden, die Schlaglängenfaktoren jedoch variieren. Wenn das Seil so berechnet wurde, daß sich die Außenlitzen bei einem Schlaglängenfaktor unter  $5.5 \cdot \text{Seilnenndurchmesser}$  berühren, nimmt die Sperrung mit zunehmender Schlaglänge zu und erreicht für einen Schlaglängenfaktor von  $12 \cdot \text{Seilnenndurchmesser}$  einen Wert von  $0.045 \text{ rad}$ .

Bild 7 zeigt schematisch den Querschnitt eines derartigen Seiles mit den Hüllkreisen der Außenlitzen für Schlaglängenfaktoren  $5.5 \cdot \text{Seilnenndurchmesser}$  (gegenseitige Berührung) und  $12 \cdot \text{Seilnenndurchmesser}$  (Sperrung  $0.045 \text{ rad}$ ).

In einer sehr vorteilhaften Ausführungsform kann das Seil mit variabler Schlaglänge eine Kunststoffzwischenlage zwischen Herzseil und Außenlitzen besitzen, deren nach außen hervorstehenden Kunststoffstege die Außenlitzen selbst bei großen Sperrungen auf Abstand voneinander halten.

Das Konzept der variablen Schlaglängen verspricht große Vorteile: Es wird die Gefahr des Seilrisses bei Schlappseilbildung beseitigen und die Lebensdauer von Schachtförderseilen, insbesondere bei großen Teufen, vergrößern, da es die Verwendung von ermüdungsfesteren Parallelschlaglitzen erlaubt.

Die ersten Seile mit variablen Schlaglängen wurden bereits hergestellt und werden zur Zeit getestet.

Zu beachten ist aber, daß Drahtseile mit variablen Schlaglängen nur bei Trommelförderung eingesetzt werden können. Bei Treibscheibenförderung würden sie die halbe Zeit verkehrt herum arbeiten müssen, und dann würden sich alle ihre Vorteile in Nachteile verwandeln.



## Literatur:

Kollros, W.: Der Zusammenhang zwischen Torsionsmoment, Zugkraft und Verdrillung in Seilen. Internationale Berg- und Seilbahnrundschau 18. (1974)

Rebel, G.: The torsional behaviour of triangular strand steel wire ropes for drum winders. Dissertation, University of Witwatersrand, Johannesburg. (1997)

van Zyl, M.: Triangular Strand Ropes for Deep Shaft Operations - An Initial Study

Verreet, R.: The Rotation Characteristics of Steel Wire Ropes, Casar publication