WIRE ROPE
TECHNOLOGY AACHEN

Die technischen Eigenschaften des Albert-Seiles

Die technischen Eigenschaften des Albert-Seiles - ein Vergleich mit modernen Seilkonstruktionen

von Dipl.-Ing. Roland Verreet

Inhalt

1. Einleitung 4

2. Der Aufbau des Albert-Seiles 4

3. Die Herstellung des Versuchsseiles 7

4. Das Tragkraftverhalten des Albert- Seiles 8

5. Das elastische Verhalten des Albert- Seiles 10

6. Das Drehmoment des Albert- Seiles 11

7. Die Biegewechselfestigkeit des Albert- Seiles 12

8. Die Weiterentwicklung des Albert- Seiles 13

9. Summary 14

© 1984, 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. Einleitung

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts fanden im Harzer Erzbergbau sowohl Hanfseile als auch Eisenketten als Fördermittel Verwendung. Die Hanfseile waren sehr teuer, da sie aus dem Ausland bezogen werden mußten. Ihre Verwendung setzte außerdem voraus, daß die Schächte rundum mit Holz verkleidet wurden. Der Einsatz von Eisenketten allerdings vergrößerte die Gefahren unter Tage erheblich, da Kettenbrüche an der Tagesordnung waren.

Die Streitgespräche, welchem Fördermittel nun der Vorzug zu geben sei, zogen sich bereits über Jahrzehnte hin, als sich der Oberbergrat Albert aus Clausthal dieser Problematik widmete. Wie seine Zeitgenossen erkannte er den Vorteil der Hanfseile als einer Parallelschaltung von lasttragenden Elementen gegenüber der Kette, bei der die Kettenglieder in Reihe geschaltet waren, so daß der Bruch eines einzelnen Elementes das Gesamtversagen herbeiführte. Auf der anderen Seite sah er aber auch die höhere Materialfestigkeit des Eisendrahtes, aus dem die Kettenglieder hergestellt wurden.

Was, so könnte man nun zurückblickend sagen, lag also näher, als die Vorzüge der beiden Förderelemente zu vereinen, und ein Seil aus Eisendraht herzustellen? Genau das jedenfalls tat Albert im Jahre 1834, dem Geburtsjahr des Drahtseiles. War also die Erfindung des Drahtseiles keine großartige Leistung, sondern sogar ein naheliegender Schritt? Die weitere Beschäftigung mit der Thematik wird uns sehr schnell vom Gegenteil überzeugen.

2. Der Aufbau des Albert-Seiles

Das erste Seil der Welt bestand aus 3 Litzen, die um einen imaginären Kern verseilt waren. Jede Litze bestand aus 4 gleichen Drähten, deren Durchmesser Oberbergrat Albert mit 0,144 Zolle Calenberger Maaß (= 3,50 mm) überliefert. Die Schlaglängen der Drähte in den Litzen und der Litzen im Seil wählte Albert zu 146 mm. Litzen und Seil waren rechtsgängig verseilt, das erste Seil der Geschichte war somit in Gleichschlag hergestellt. Diese Schlagart bezeichnet man heute noch häufig, zu Ehren des Erfinders, als Albert-Schlag. (Hier sei am Rande vermerkt, daß die Bezeichnung ‚Längsschlag' von dem amerikanischen Erfinder Lang herrührt, der, wahrscheinlich in Unkenntnis des Albert-Seiles, den Gleichschlag zum Patent anmeldete und dieses Patent über viele Jahre hin aufrecht erhielt.)

Abb. 1 zeigt verschiedene Möglichkeiten eines Querschnitts des Albert-Seiles. Bereits diese Darstellungen offenbaren einige fundamentale Unterschiede des ersten Drahtseiles der Geschichte zu modernen Seilkonstruktionen. Heute gefertigte Seilmacharten weisen etwa 50 bis 500 Seildrähte verschiedenen Durchmessers auf. Albert verwendete lediglich 12 Drähte, und diese haben alle den gleichen Durchmesser.

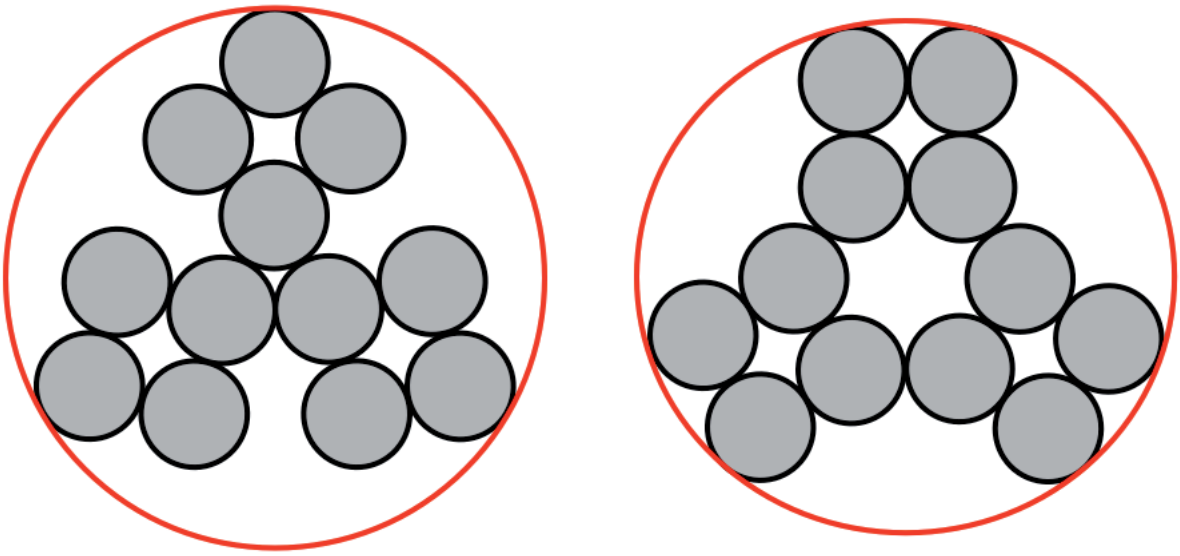

Abb. 1

Diese zunächst unwichtig erscheinende Tatsache ist technisch von fundamentaler Bedeutung. In Europa finden innerhalb eines Drahtseiles nur Drähte gleicher Festigkeit Verwendung. Dies bedeutet, daß innerhalb eines Seiles mit verschiedenen Drahtdurchmessern Drähte unterschiedlichen Vormaterials und unterschiedlicher Zugfolge Verwendung finden müssen. In den USA finden innerhalb eines Seiles nur Drähte gleicher Stahlgüte Verwendung (z.B. plow steel, improved plow steel etc.). Hier führt die Verschiedenartigkeit der Durchmesser zu unterschiedlichen Querschnittsabnahmen und somit zu unterschiedlichen Festigkeiten für Drähte unterschiedlichen Durchmessers. Die Diskussion, welcher der beiden Wege technisch der bessere ist, wird auch in unserer Generation nicht entschieden werden. Oberbergrat Albert jedoch ging mit seinem Erstlingswerk dieser Frage (bewußt?) aus dem Weg. Nur durch die Verwendung eines einzigen Drahtdurchmessers ist es möglich, Drähte nur einer Festigkeit und einer Stahlgüte einzusetzen.

Durch Versuche mit kleinen Handmustern, über die er ausführlich berichtet, erkannte Albert sehr schnell, daß er durch Zusammendrehen gleichartiger Drähte um einen imaginären Kern dem so entstandenen Gebilde die Elastizität einer Spiralfeder geben konnte. Er sah aber auch, daß bei Zusammendrehen von 5, 6 oder mehr Elementen das Gebilde bei Beanspruchung in sich zusammenfiel, daß er auf der anderen Seite aber, wenn er einen Kern einbrachte, um eine Stützwirkung zu erzeugen, eine Parallelschaltung unterschiedlich langer Drahtgebilde erzeugte. Für ein derartiges Gebilde war unter äußerer Belastung kein gleichförmiges Tragen zu erwarten. Er entschloß sich daher, die größtmögliche noch ohne Kern verlitzbare Drahtzahl zu wählen und fertigte eine vierdrähtige Litze.

In dieser Litze haben alle Drähte die gleiche Eisen- bzw. Stahlgüte, die gleiche Festigkeit, den gleichen Durchmesser, die gleiche Länge und, mit einer Viertel Ganghöhe versetzt, die gleiche Lage.

Bei äußerer Beanspruchung eines derartigen Gebildes ist also kein Einzeldraht seinen Nachbarn gegenüber benachteiligt, so daß ein optimales Tragkraftverhalten zu erwarten ist.

Den gleichen Gedanken übertrug Albert nun auf das Seil, indem er drei derartige Drahtgebilde zusammenschlug. Er vermied auch hier durch Weglassen des Kerns das Einbringen zusätzlicher tragender Elemente, die hinsichtlich ihrer geometrischen Lage und insbesondere ihrer Länge und ihrer elastischen Eigenschaften gegenüber den übrigen Elementen benachteiligt wären.

Warum nun wählte Albert den Gleichschlag? Bei Gleichschlagseilen liegen die Außendrähte an der Seiloberfläche stark zur Seilachse geneigt, während sie auf der Innenseite der Außenlitzen nahezu oder exakt in Seilrichtung ausgerichtet sind. Durch die Wahl des Gleichschlags erreichte Albert also, daß die Außendrähte des Seiles im Inneren an den Stellen, wo die Litzen sich auf einander abstützten, in Richtung der Seilachse verliefen und sich somit überschneidungsfrei ineinander verzahnten.

Eine Verseilung in Kreuzschlag hätte hier starke Drahtüberkreuzungen erzeugt.

Hat also Albert bei der Wahl des Gleichschlags wieder nur eine glückliche Hand bewiesen, oder ahnte er von den Problemen der Drahtzerstörung im Seilinneren an den Überkreuzungsstellen von Drähten?

Zumindest aber wußte Albert von den Versuchen des Berghauptmanns von Reden, der zu Ende des 18. Jahrhunderts im Harz seilähnliche Gebilde durch Flechten von Drähten hergestellt hatte. Diese Seile hatten sich im Betrieb innerhalb kürzester Zeit an den Überkreuzungsstellen der Drähte zerstört.

Durch die einlagige und kernlose Bauweise *der Litzen*, die einlagige und kernlose Bauweise *des Seiles* und die Schaffung etwa gleicher Winkel an den Berührungsstellen der Außendrähte benachbarter Litzen schuf Albert somit bereits in seinem Erstlingswerk ein Drahtseil, in dem alle Elemente exakt gleich lang waren, aus gleichem Vormaterial bestanden und völlig überschneidungsfrei verseilt waren.

Nach den technischen Angaben des Erfinders hat der Autor das Albert-Seil auf einer modernen Verseilmaschine mit Seildrähten heute üblicher Qualitäten nachempfunden und hinsichtlich seiner technischen Eigenschaften untersucht. Die Ergebnisse zeigen, daß einige der Qualitäten, die das erste Drahtseil der Geschichte aufwies, von keiner der heute gefertigten Seilkonstruktionen mehr erreicht werden.

3. Die Herstellung des Versuchsseiles

Herrn Albert stand nur äußerst unregelmäßig gefertigtes Drahtmaterial mit einer Festigkeit von etwa 50 kp/mm^2 in Längen von 18 bis etwa 38m zur Verfügung. Die beschränkte Fertigungslänge seiner Seildrähte zwang ihn im übrigen auch dazu, mit dem Drahtseil auch gleich den Spleiß zu erfinden.

Um das Albert-Seil im Vergleich mit den modernen Seilkonstruktionen nicht zu benachteiligen, wurde im vorliegenden Fall das Seil aus Seildrähten gemäß DIN 2078 in einer Festigkeit von 180 kp/mm^2 hergestellt.

Die Verlitzung der vier Einzeldrähte erfolgte auf einer Rohrschnellverseilmaschine mit 140 kg Spulenfassung, die Verseilung auf einer Korbverseilmaschine mit 1.000 kg Spulenfassung.

Während der Litzenherstellung und der Endverseilung wurde heißes Schmiermittel aufgebracht. Die Endverseilung erfolgte zunächst mit einer der Rückdrehung überlagerten Vordrehung von 1:16. Hierbei zeigte sich, daß in regelmäßigen Abständen von 48 cm das Seil leichte Verdickungen aufwies. Durch Variation der Vordrehung konnte der Abstand der Verdickungen verändert werden, jedoch traten diese immer wieder regelmäßig auf.

Eine genaue Betrachtung zeigte, daß die Ursache hierfür in der Tatsache zu suchen ist, daß die Litzen des Albert-Seiles eher vierkantige als zylindrische Gebilde sind, die sich in den unterschiedlichsten Konfigurationen anordnen können, wie Abb. 1 zeigt.

Abhängig von der jeweils vorliegenden Lage der Elemente zueinander verändert sich auch der Seildurchmesser. Diese Erscheinung, die in einer exakt arbeitenden Verseilmaschine natürlich sofort zutage tritt, dürfte Herrn Albert nicht bekannt gewesen sein. Da Albert seine Seile manuell herstellte, dürften diese infolge der stark ungleichmäßigen Schlaglängen ohnehin nicht allzu regelmäßige Gebilde gewesen sein.

Nach der Verseilung des Albert-Seiles wurde die hergestellte Länge von 150 m entsprechend den für die Versuche notwendigen Einzellängen abgelängt und mit den erforderlichen Endverbindungen versehen.

4. Das Tragkraftverhalten des Albert- Seiles

Das Albert-Seil hat einen Metallquerschnitt von 115,454 mm². Die rechnerische Bruchlast als Produkt von Drahtfestigkeit und Metallquerschnitt ergibt sich somit zu 20.781 kp = 203,79 kN. Die rechnerische Bruchlast des Albert-Seiles liegt somit höher als die aller DIN-Seile mit Fasereinlage und wird nur von der Seilkonstruktion 6x36 mit Stahleinlage (DIN 3064) und Spezialseilen höherer Füllfaktoren erreicht oder übertroffen (Abb. 2).

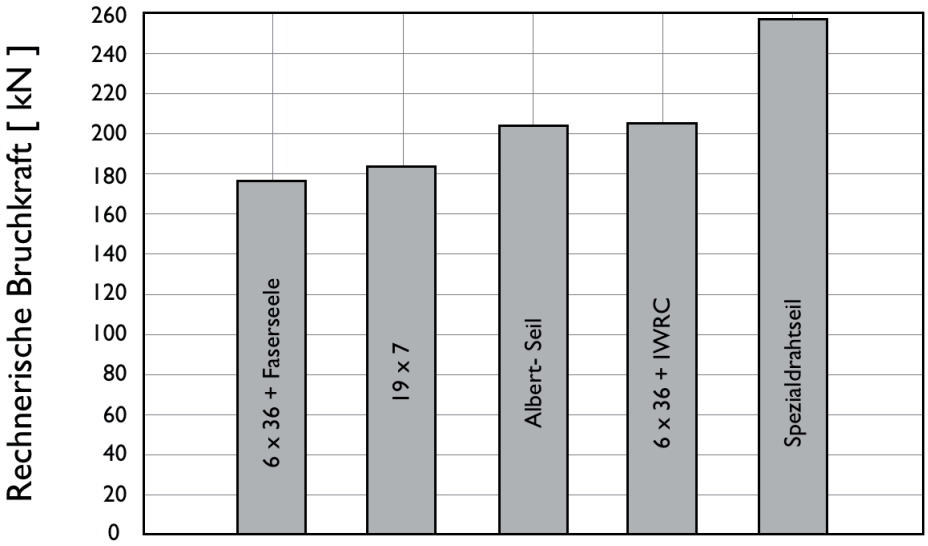

Abb. 2

Die ermittelte Bruchlast des Versuchsseiles als Produkt der Einzeldrahtbruchlast und der Drahtzahl lag bei 21.791,3 kp = 213,7 kN.

Zur Ermittlung der wirklichen Bruchlast und der elastischen Eigenschaften des Albert-Seiles wurden Proben von 10 m Länge beidseitig vergossen in eine liegende Prüfmaschine eingebaut und zyklisch be- und entlastet, wobei die Last bei jedem Zyklus um einen konstanten Betrag erhöht wurde. Abb. 3 zeigt das Kraft-Dehnungs-Diagramm eines solchen Versuches.

Die wirkliche Bruchlast des Albert-Seiles lag mit 204,5 kN 3,44 % über der rechnerischen Bruchlast und nur 4,3 % unter der ermittelten Bruchlast. Ein Vergleich mit modernen Seilkonstruktionen zeigt, daß der Verseilfaktor des Albert-Seiles in Größenordnungen liegt, die von keinem der heutigen Seile erreicht werden (Abb. 4).

Dieses sensationelle Ergebnis erklärt sich aus der absolut gleichförmigen Beanspruchung aller Seilelemente unter einachsigem Zug, die sicherstellt, daß keine Seilelemente infolge Überbeanspruchung vorzeitig reißen.

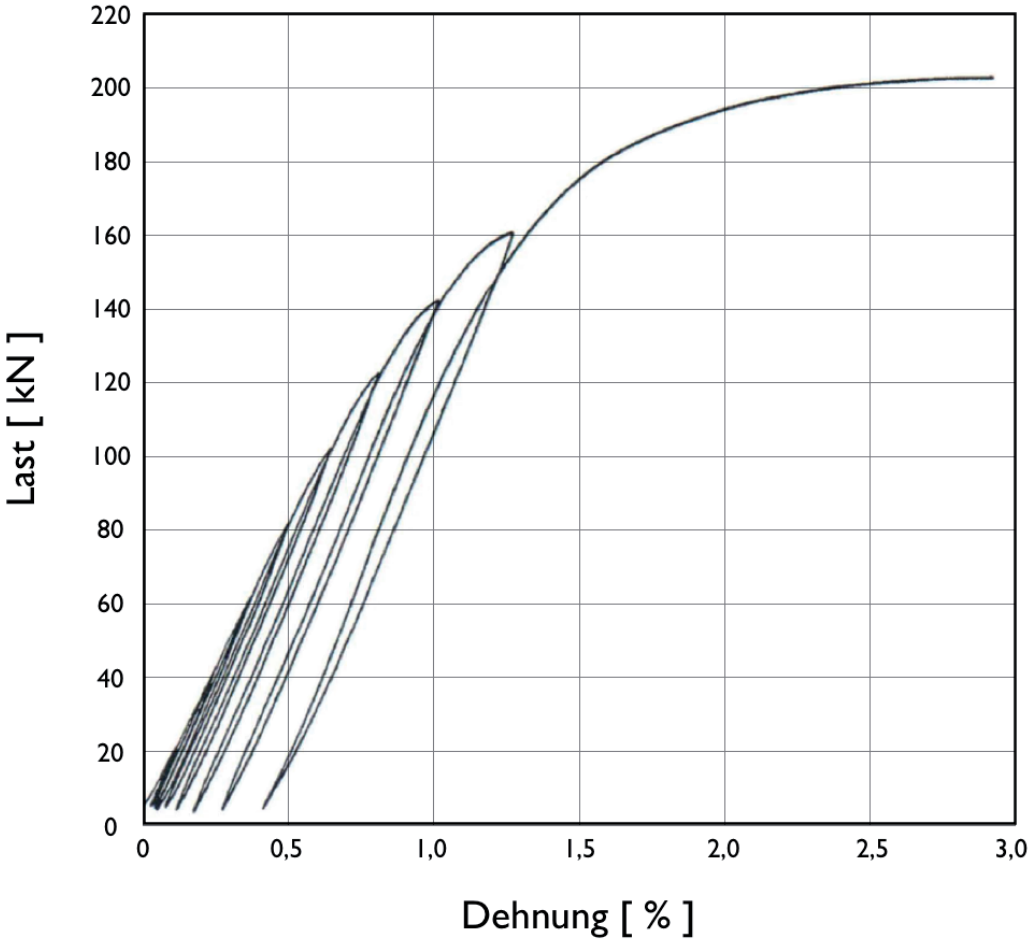
Last [kN]
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
Dehnung [%]

Abb. 3

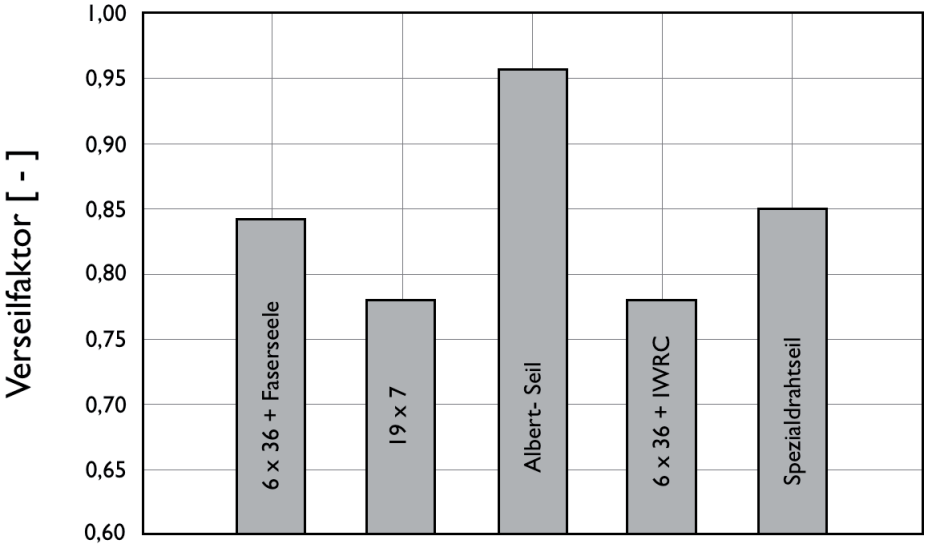
Verseilfaktor [-]
1,00
0,95
0,90
0,85
0,80
0,75
0,70
0,65
0,60
6 x 36 + Faserseele
19 x 7
Albert- Seil
6 x 36 + IWRC
Spezialdrahtseil

Abb. 4

5. Das elastische Verhalten des Albert- Seiles

Durch die zyklische Be- und Entlastung im Ganzzerreißversuch werden Vorreckeffekte erzielt, die den Elastizitätsmodul des Seiles asymptotisch gegen einen Grenzwert anwachsen lassen, den das Seil auch nach entsprechenden Setzeffekten im Betrieb annimmt. Abb. 5 zeigt den Elastizitätsmodul des Albert-Seiles im Vergleich mit verschiedenen modernen Seilkonstruktionen. Die heute üblichen Drahtseile weisen Elastizitäts-Moduln zwischen 0,95 und 1,25 x 105 N/mm^2 auf. Seile mit Fasereinlage liegen an der unteren Grenze dieser Bandbreite, Vollstahlseile an der oberen. Der Elastizitätsmodul des Albert-Seiles liegt etwa 40 % höher als die Werte aller modernen Seile und liegt damit im Bereich der heute üblicherweise eingesetzten Litzenkonstruktionen.

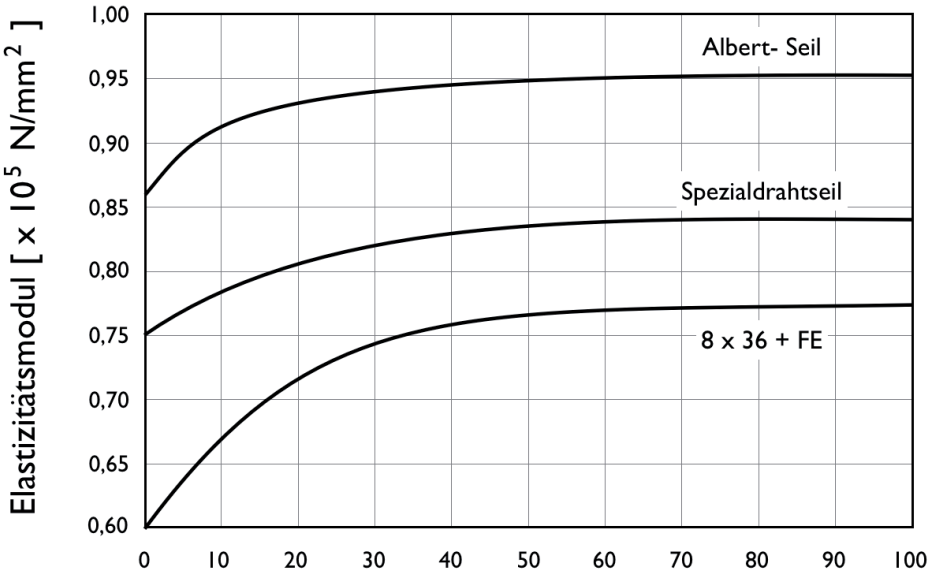

Abb. 5

In Abb. 6 ist die Dehnung des Albert-Seiles unter Last und die im Seil verbleibende Verlängerung nach Entlastung in Abhängigkeit von der Last im Vergleich mit modernen Seilkonstruktionen aufgetragen. Charakteristisch für moderne Seilkonstruktionen ist eine deutlich überproportionale Dehnung im Bereich geringer Belastung. Dieser Sachverhalt erklärt sich aus der Tatsache, daß einzelne aufgrund ihrer geometrischen Position oder ihrer Länge benachteiligte Seilelemente bei einer äußeren Belastung zunächst stark überproportional beansprucht werden, während andere Seilelemente der äußeren Dehnung durch Veränderung ihrer Helixform nachgeben können, ohne Kraft aufzunehmen. Im Albert-Seil sind nun allerdings, wie oben erläutert, alle Elemente absolut gleichartig beansprucht, so daß dieser Effekt hier nicht zu beobachten sein dürfte.

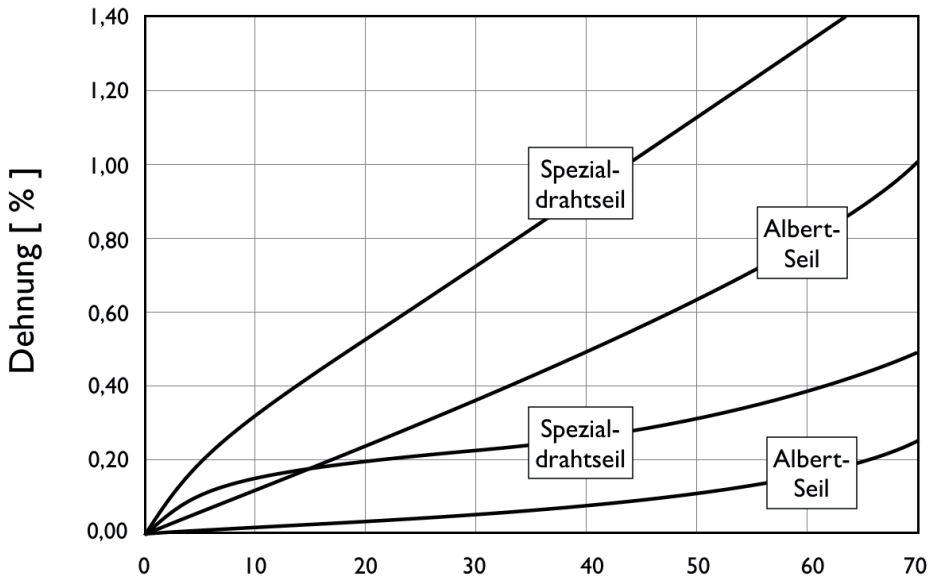

Abb. 6

Abb. 6 bestätigt diese Vermutung. Im unteren Lastbereich zeigt das Albert-Seil unter Last etwa 50 % geringere Dehnungen als die modernen Seilmacharten, die nach Entlastung im Seil verbleibende Dehnung liegt sogar etwa 75 % niedriger.

Infolge der geringen Dehnungen dürfte sich das Albert-Seil hervorragend für Abspannkonstruktionen eignen, bei dynamischer Beanspruchung allerdings dürfte sich der extrem hohe Elastizitätsmodul eher als nachteilig erweisen.

6. Das Drehmoment des Albert- Seiles

In einem Drahtseil liegen die Litzen unter einem Winkel zur Seilachse. Durch eine äußere Last wird somit innerhalb der Litze eine Kraftkomponente geweckt, die mit dem Hebelarm des Abstandes dieser Litze von der Seilmitte ein Drehmoment erzeugt. Dieses Drehmoment übt zusätzliche Beanspruchungen auf die Seilendbefestigungen aus und kann ungeführte Lasten verdrehen.

Das Drehmoment des Albert- Seiles wurde während der Ganzzerreißversuche an der Endbefestigung gemessen. Der sogenannte Drehmomentfaktor als Quotient aus Drehmoment und dem Produkt von Last und Durchmesser ist in Abb. 7 in Abhängigkeit von der Last für das Albert-Seil und verschiedene moderne Seilkonstruktionen dargestellt.

Überraschenderweise ist das Albert-Seil den modernen 8-litzigen und 6-litzigen Seilkonstruktionen und sogar der drehungsarmen Machart 18x7 (DIN 3069) deutlich überlegen. Die Ursache hierfür dürfte in der 3-litzigen Machart begründet liegen, für die der Hebelarm der Einzellitzen minimal wird.

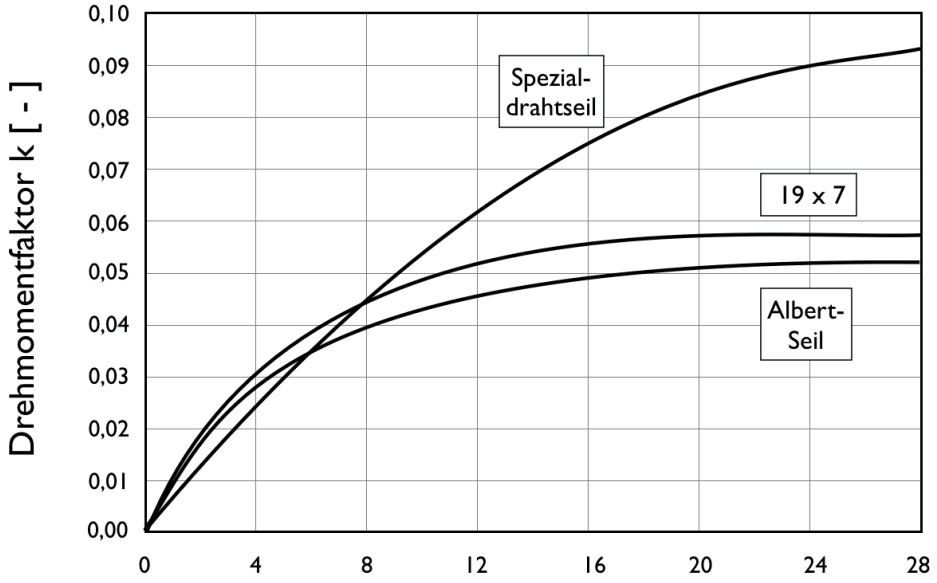

Abb. 7

7. Die Biegewechselfestigkeit des Albert- Seiles

Zur Ermittlung seiner Biegewechselfestigkeit wurde das Albert- Seil auf einer Dauerbiegemaschine im einfachen Biegewechsel und im Gegenbiegewechsel geprüft. Im einfachen Biegewechsel erreichte das Albert-Seil 8.120 Lastspiele, der erste Drahtbruch trat nach 6.060 Lastspielen auf. Wie die Gegenüberstellung in Abb. 8 zeigt, erreicht eine moderne Seilkonstruktion mit einer 25 mal höheren Drahtzahl als das Albert-Seil etwa die 50-fache Biegewechselzahl. Das Versagen kündigt sich gegenüber dem Albert-Seil erheblich sicherer an.

Im Gegenbiegewechselversuch brach das Albert-Seil nach 4.124 Gegenbiegewechseln, der erste Drahtbruch trat nach 2.912 Gegenbiegewechseln auf. Moderne Seilkonstruktionen erreichen, wie Abb. 8 zeigt, etwa die 70-fache Laufzeit.

Eine Durchführung der Dauerbiegeversuche mit größeren D/d- Verhältnissen hätte nicht so deutliche Unterschiede zwischen den Seilkonstruktionen erbracht. Trotzdem dürfte auch Herr Albert mit der Ermüdungsfestigkeit des ersten Drahtseiles der Weltgeschichte nicht zufrieden gewesen sein. Er erkannte die Notwendigkeit, das Biegewechselverhalten von Drahtseilen unter Ausschluß nicht erfaßbarer Einflußfaktoren prüfen zu müssen und schuf die erste Dauerbiegemaschine für Drahtseile.

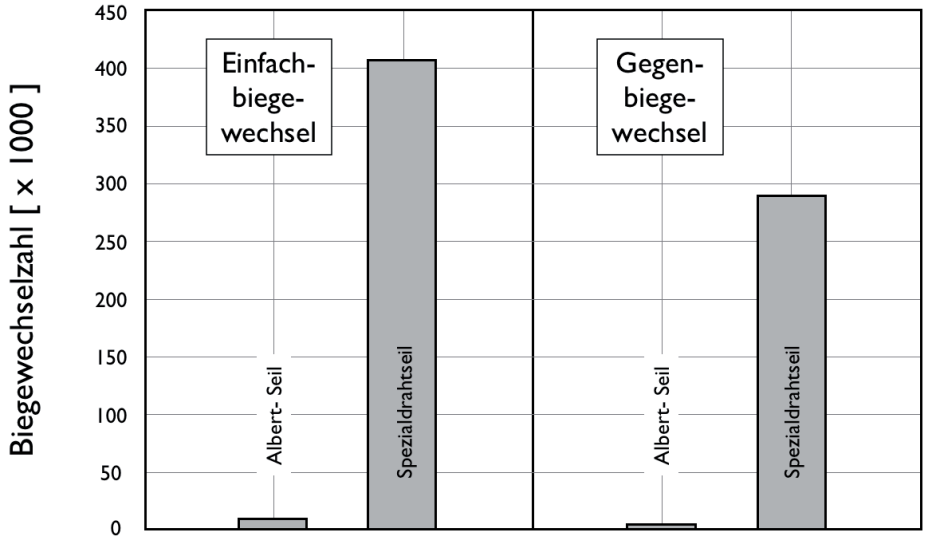

Abb. 8

Albert erkannte sehr schnell , daß er selbst bei unveränderter Gesamtdrahtzahl das Dauerbiegeverhalten des Seiles durch Erhöhung der Litzenzahl verbessern konnte. Als zweites Seil der Geschichte schuf Albert bereits eine 4-litzige Konstruktion, bestehend aus je 3 Drähten, und zeichnete somit schon den Weg vor, durch höhere Litzenzahlen und bessere Auflageverhältnisse in den Seilscheiben das Dauerbiegeverhalten von Drahtseilen zu verbessern.

Eine weitere Ursache für das schlechte Abschneiden des Albert-Seiles im Dauerbiegeversuch ist im hohen Durchmesser der Einzeldrähte des Seiles und den daraus resultierenden hohen Biegespannungen beim Lauf über Seilscheiben zu suchen.

8. Die Weiterentwicklung des Albert- Seiles

Die nach Albert folgenden Generationen von Seilherstellern unternahmen folgerichtig den Schritt zu höheren Draht- und Litzenzahlen und kleineren Drahtdurchmessern. Der Schritt zur mehrlagigen Litze aber zwang die Hersteller, zwischen zwei möglichen Wegen zu entscheiden.

Der eine Weg bestand darin, die verschiedenen Lagen zur Vermeidung von Überschneidungen aus Drähten unterschiedlicher Stärke und daraus resultierend aus unterschiedlichem Vormaterial, vor allem aber aus Drähten unterschiedlicher Länge herzustellen.

Der andere Weg bestand darin, Litzen aus gleichen Drahtstärken und gleichen Längen der Drähte in den verschiedenen Lagen herzustellen, was aber zu unzähligen Überkreuzungen zwischen den Drähten führte.

Man entschied sich für die zweite Möglichkeit und verfolgte ein Jahrhundert lang einen technischen Irrweg. Erst die Erfindung der Parallelschlaglitze durch Tom Seale bewies der Branche, daß der Nachteil unterschiedlicher Längen und unterschiedlicher Vormaterialien und Drahtabmessungen innerhalb einer Litze stark überkompensiert wird durch den Vorteil hervorragender Berührungsverhältnisse aller Drähte zueinander. Mit der Parallelschlaglitze begann die Geschichte des modernen Drahtseiles.

Die ersten Drahtseile der Geschichte allerdings sind die einzigen geblieben, bei denen wirklich alle Elemente gleichartig beansprucht werden. Sie werden damit ihren Platz unter den technischen Meisterleistungen der Neuzeit behalten.

9. Summary

The Albert-rope was manufactured on modern machines and tested for its technical qualities. The first wire rope in history has very poor service life. On the other hand, due to some unique details in its composition, the Albert-rope shows some outstanding load bearing characteristics no longer achieved by modern wire ropes.

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