

**Tragverhalten lösbarer Seilklemmen an  
offenen und vollverschlossenen Spiralseilen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Dipl.-Ing. Martin Bechtold**

aus Groß-Gerau

Tag der mündlichen Prüfung:

Hauptreferent:

Professor Dr.-Ing. H. Saal

Korreferent:

Professor Dr.-Ing. U. Peil

Karlsruhe 2005

## **Lebenslauf**

### **Juli '99 – Juli '05**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Saal an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe (TH)

### **Okt. '92 – Juli '99**

Studium an der Universität Karlsruhe (TH)  
Fachbereich: Bauingenieurwesen, konstruktiver Ingenieurbau

### **Sep. '95 – Juni '96**

Auslandsstudium an der University of Wales in Swansea, GB  
Masterprogramm: Computational Methods in Civil Engineering

### **Aug. '91 – Sep. '92**

Zivildienst im Rehabilitationszentrum für Kinder und Jugendliche in Neckargemünd

### **Mai '91**

Allgemeine Hochschulreife

### **Juli '78 – Juli '82**

Grundschule

### **31.05.1972**

Geboren in Groß-Gerau

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine an der Universität Karlsruhe (TH).

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Saal für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Dissertation und für sechs lehrreiche und prägende Jahre der Zusammenarbeit an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine.

Ich danke meinem Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Peil für die fachlichen Anregungen, die mich durch seine Veröffentlichungen im Fachbereich der Seile und durch den persönlichen Kontakt erreichten.

Ich danke allen Kollegen an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine und am Institut für Stahl- und Leichtmetallbau der Universität Karlsruhe (TH) für das fachliche und persönliche Miteinander.

Ich danke allen Menschen in meinem familiären und privaten Umfeld für ihre Unterstützung in den vielseitigen Aspekten des Lebens.

Ich widme diese Arbeit meiner Schwester Imke.

### **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Tragverhalten lösbarer Seilklemmen an offenen und vollverschlossenen Spiralseilen mit dem Ziel der Bestimmung der seilparallelen Verschiebekraft. Hierfür werden analytische Betrachtungen, Bauteilversuche und numerische Berechnungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente durchgeführt.

Das Tragverhalten lösbarer Seilklemmen ist ein Sachverhalt mit zahlreichen Einflüssen. Deshalb ist es mein erstes Anliegen in dieser Arbeit, diese in ihren Ursachen und Wirkungen darzustellen.

Für Bauteilversuche standen aus verzinkten Drähten aufgebaute offene Spiralseile der Konstruktion 1x37, vollverschlossene Spiralseile mit zwei Lagen Z-Profildrähten in unterschiedlichen Durchmessern und gerade Seilklemmen zur Verfügung. Bauteilversuche fanden somit ausschließlich an gerade verlaufenden Seilen und geraden Seilklemmen statt. Trotz dieser Vereinfachung kann das Ergebnis auch auf gekrümmte Seilklemmen übertragen werden, da eine Umlenkung in der durch die Umlenkung belasteten Klemmschale wie eine erhöhte Klemmkraft wirkt. Somit waren keine Versuche an umgelenkten Seilen nötig. Dies war von großem Vorteil, da Verschiebeversuche an umgelenkten Seilen nur mit großem Aufwand zu realisieren sind. Mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente werden numerische Berechnungen durchgeführt und anhand der Ergebnisse der Bauteilversuche verifiziert. Diese Berechnungen ermöglichen durch die Darstellung der Kontaktzustände zwischen Seil und Seilklemme zusätzliche Erkenntnisse für die Entwicklung der mechanischen Modelle. Zudem konnten weitere, nicht als Bauteilversuche durchgeführte Seilklemmengenometrien untersucht werden. Grundlage für die Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente ist die Festlegung aller phänomenologischen Materialkennwerte für die Abbildung des Seils als homogener, zylindrischer Volumenkörper. Hieraus ergeben sich auch für andere Anwendungen hilfreiche Erkenntnisse, wie zum Beispiel für eine Torsionsbelastung des Seils.

Unter der Berücksichtigung der meist vorhandenen Umlenkkraft werden schließlich alle wesentlichen Einflüsse in ihrer Wirkungsweise durch mechanische Modelle beschrieben. Mit diesen Erkenntnissen wird ein Bemessungskonzept entwickelt und vorgeschlagen.

### **Abstract**

The scope of this thesis is to describe the load carrying behaviour of cable clamps, which are clamped on spiral strands and locked coil strands. For this purpose tests, analytical considerations and numerical calculations with finite elements have been carried out.

As the load carrying behaviour of cable clamps is a very complex issue with various influences my first concern is to give an overview of the causes and effects.

Tests have been performed with spiral strands made of 1x37 wires, locked coil strands with two layers of Z-shaped wires and straight cable clamps. This restriction on straight cable clamps is possible as the influence of deflection forces on cable clamps can be considered as a higher clamping force. This is a big advantage as tests with arcuated cable clamps and deflection forces are difficult as well as expensive.

Calculations with finite elements have been performed and verified with the test results. With the help of the finite element calculations it is possible to get information about the conditions between cable and cable clamp, which helps in developing mechanical models. It was further possible to examine additional geometries of cable clamps numerically. The cable was modelled as a solid cylinder with phenomenological material properties. The knowledge of these phenomenological material properties can be helpful for other applications too. For example the torsion stiffness may be needed for a load case during erection.

Mechanical models have been developed to describe the load carrying behaviour of cable clamps. Finally a design concept is proposed.

## Nomenklatur, Kurzzeichen und Definitionen

### Drähte und Seilaufbau (Der Indize D steht für Draht)

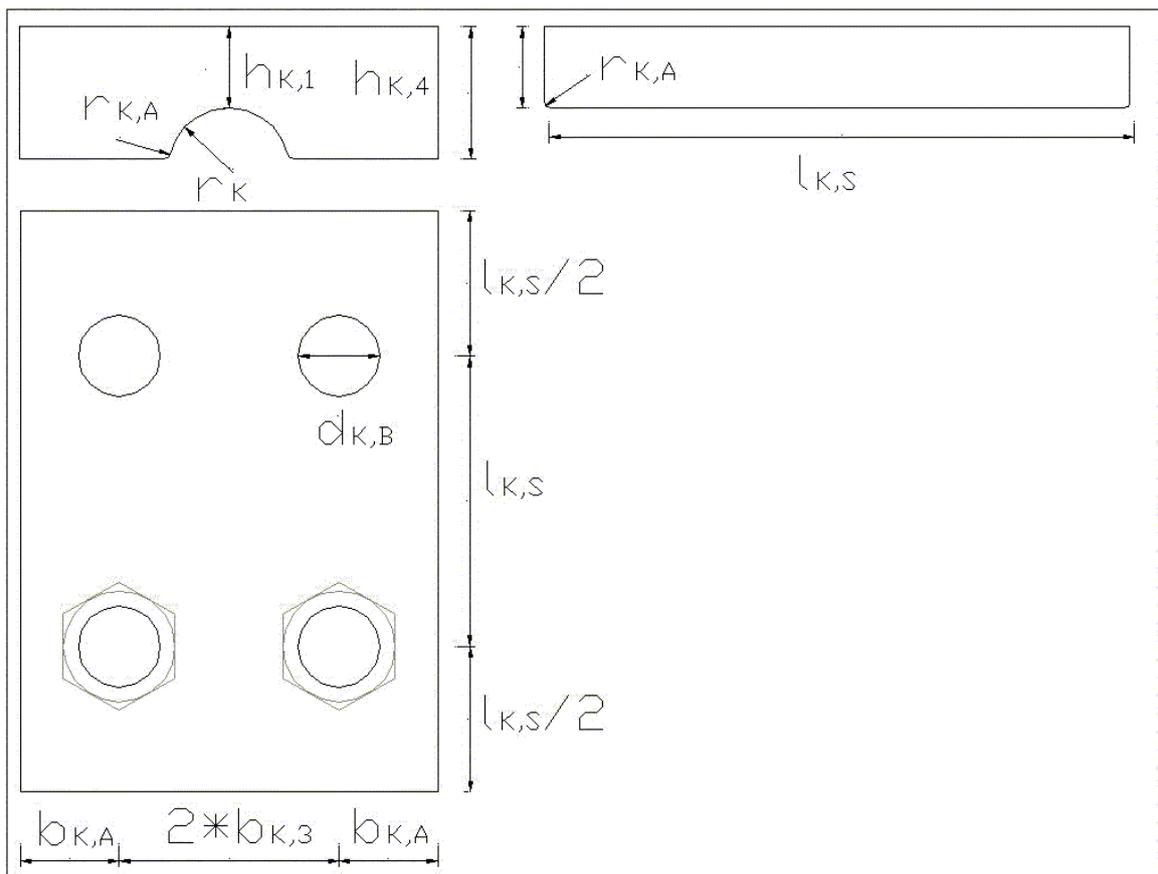
$a_{D,B,i}$	Abstand der Drahtberührungspunkte zwischen einem Draht der Drahtlage i und einem Draht der Drahtlage i+1
$\alpha_D$	Nennwert der Schlagwinkel der Drahtlagen des Seils
$A_{D,i}$	Gesamtfläche aller Drähte der Drahtlage i
$\alpha_{D,Sch,i}$	Schlagwinkel der Drahtlage i
$d_{D,i}$	Durchmesser eines Drahtes der Drahtlage i
$d_{Z,M,i}$	Mittelpunktsdurchmesser der Drahtlage i
$f_{D,u,k}$	Nennfestigkeit des Drahtwerkstoffs
$l_{D,Sch,i}$	Schlaglänge der Drähte in der Drahtlage i
$\mu_D$	Querkontraktionszahl des Drahtwerkstoffs; hier $\mu_D=0,30$
$n_{D,B,i}$	Anzahl der Drahtberührungspunkte je Millimeter Seillänge zwischen den Lagen i und i+1
$n_{D,i}$	Anzahl der Drähte in der Drahtlage i
$n_{D,L}$	Anzahl der Drahtlagen einschließlich Kerndraht
$E_D$	Elastizitätsmodul der Drähte nach Feyrer [9] gilt
	$E_D = 196.000 \frac{N}{mm^2} \text{ für Seildraht aus Kohlenstoffstahl}$
	$E_D = 160.000 \frac{N}{mm^2} \text{ für Seildraht aus nichtrostendem Stahl 1.4310}$
	$E_D = 150.000 \frac{N}{mm^2} \text{ für Seildraht aus nichtrostendem Stahl 1.4401}$
$F_{D,i}$	Normalkraft eines Drahtes der Drahtlage i
$F_{D,B,i}$	Resultierende Belastung der Drahtberührungspunkte
$\sigma_{D,i}$	Normalspannung eines Drahtes der Drahtlage i
$t_{D,Zink}$	Zinkschichtdicke auf den Drähten

### Seil (Der Indize Z steht für Zugglied)

$A_{Z,m}$	metallischer Querschnitt des Seils
$d_Z$	tatsächlicher Durchmesser des Seils
$d_{Z,N}$	Nenndurchmesser des Seils
$\Delta d_{Z,t=\infty}$	den zeitlichen Setzungen äquivalente Verringerung des Seildurchmessers
$\Delta d_{Z,\Delta Z}$	Verringerung des Seildurchmessers bei Seilkrafterhöhung
$\Delta F_Z$	Seilkrafterhöhung
$\Delta F_{Z,K,M}$	mittlere Seilkrafterhöhung im geklemmten Seilabschnitt
$E_r$	phänomenologischer Elastizitätsmodul des Seils in radialer Richtung
$E_\phi$	phänomenologischer Elastizitätsmodul des Seils in tangentialer Richtung
$E_z$	phänomenologischer Elastizitätsmodul des Seils in Längsrichtung
$f_{S,V,t=\infty}$	Faktor zur Ermittlung des Kriechanteils der Zinkschichtdicke auf den Seildrähten
$f_Z$	Füllfaktor des Seils
$F_Z$	Seilkraft
$F_{Z,MBK}$	Mindestbruchkraft des Seils
$F_{Z,RBK}$	Rechnerische Bruchkraft des Seils

$\phi_Z$	Verdrehung des Seils unter Torsionsbelastung
$G_{\phi_Z}$	phänomenologischer Schubmodul des Seils
$G_{r_Z}$	phänomenologischer Schubmodul des Seils
$G_{r_{\phi}}$	phänomenologischer Schubmodul des Seils
$G_{Z,T}$	Torsionsschubmodul des Seils
$I_{Z,T}$	Torsionsträgheitsmoment des Seils
$k_{Z,e}$	Verlustfaktor der Endverbindung des Seils
$k_{Z,s}$	Verseilfaktor des Seils
$\mu_{\phi_Z}$	phänomenologische Querkontraktion des Seils
$\mu_{r_Z}$	phänomenologische Querkontraktion des Seils
$\mu_{r_{\phi}}$	phänomenologische Querkontraktion des Seils
$\mu_Z$	Querkontraktion des Seils
$M_Z$	Torsionsbelastung des Seils
$M_{Z,i}$	Torsionsbelastung der Drahtlage i
$t_{Z,Zink}$	Summe der Zinkschichtdicken aller Drähte im Seilquerschnitt
$V_Z$	Verformungsmodul des Seils
$Z_{R,d}$	Grenzzugkraft des Seils nach DIN 18800 [1]

**Seilklemme** (Der Indize K steht für Seilklemme)



$a_0$	Faktor zur Berechnung von $\gamma_{K,K}$
$a_1$	Faktor zur Berechnung von $\gamma_{K,K}$
$\alpha_K$	Klemmkraftbeiwert
$b_{K,3}$	halber Schraubenabstand rechtwinklig zur Seillängsachse
$b_{K,A}$	Randabstand der Schrauben rechtwinklig zur Seillängsachse
$c_{K,1}$	Konstante für die Herleitung des Klemmkraftbeiwerts $\alpha_K$
$c_{K,2}$	Konstante für die Herleitung der Dehnung $\epsilon_K$ auf dem Seilklemmenscheitel

---

$c_{K,3}$	Konstante für die Herleitung des Klemmkraftbeiwerts $\alpha_K$
$c_{K,4}$	Konstante für die Herleitung der Dehnung $\varepsilon_K$ auf dem Seilklemmenscheitel
$d_{K,B}$	Durchmesser der Bohrungen für die Schrauben
$\varepsilon_K$	Dehnung auf dem Seilklemmenscheitel
$E_K$	Elastizitätsmodul des Materials der Seilklemme
$f_K$	Verhältnis zwischen dem Wert $p_{K,K}$ und dem Wert $p_{K,1}$
$f_{K,y,k}$	Streckgrenze des Klemmenwerkstoffs
$G$	seilparallele Verschiebekraft der Seilklemme auf dem Seil
$G_{R,d}$	Bemessungswert der seilparallelen Verschiebekraft der Seilklemme auf dem Seil
$\gamma_K$	vom Scheitel ausgehender Winkel in der Seilklemme
$\gamma_{K,K}$	maximaler Kontaktwinkel in der Seilklemme
$\gamma_{K,max}$	maximal möglicher Kontaktwinkel in der Seilklemme
$h_{K,1}$	Höhe der Seilklemme im Scheitel
$h_{K,4}$	Höhe der Seilklemmenschale
$K_{K,N}$	Nachgiebigkeit der Seilklemme aus der Kraft $N_{K,1}$
$K_{K,M}$	Nachgiebigkeit der Seilklemme aus der Biegung
$K_{K,R}$	Nachgiebigkeit der Seilklemme aus der Ringzugkraft gemäß [8]
$K_S$	Nachgiebigkeit der Schraube
$K_{S+K}$	Nachgiebigkeit der Schraube und der Seilklemme
$K_{S+R}$	Nachgiebigkeit der Schraube und der Seilklemme gemäß [8]
$l_K$	Gesamte Länge der Seilklemme in Seillängsrichtung
$l_{K,S}$	Einflusslänge der Schrauben in Seillängsrichtung
$M_{K,1}$	Moment im Seilklemmenscheitel
$\mu_{Z,K}$	Reibbeiwert zwischen Seil und Seilklemme
$N_{K,1}$	Normalkraft im Seilklemmenscheitel
$p_K$	Seilpressung in der Seilklemmennut
$p_{K,1}$	Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut
$p_{K,K}$	Seilpressung am maximalen Kontaktwinkel in der Seilklemmennut
$P_{K,\perp}$	Summe aller Seilpressungen in der Seilklemmennut
$q_K$	Querpressung
$s_{K,1}$	Maximalwert der dreiecksförmigen Ersatzstreckenlast
$r_K$	Radius der Seilklemmennut
$r_{K,A}$	Ausrundungsradius an den Seilaustrittsstellen
$r_U$	Radius der Seilumlenkung
$\Sigma l_{K,S}$	Summe der Einflusslängen aller Schrauben (entspricht der Seilklemmenlänge)
$\sigma_K$	Spannung auf dem Seilklemmenscheitel
$t_{K,Zink}$	Zinkschichtdicke in der Seilklemmennut
$v_K$	Passungsverhältnis zwischen Seilklemme und Seil; Quotient aus zweifachem Radius der Seilklemmennut $r_K$ und dem Seildurchmesser $d_z$
$w_{K,S,eqv}$	Durchbiegung an der Stelle $b_{K,3}$ aufgrund der dreiecksförmigen Ersatzstreckenlast
$t_{Zink}$	Gesamtdicke des Zinks im geklemmten Querschnitt

**Schrauben** (Der Indize S steht für Schraube)

$A_{S,Sp}$	Spannungsquerschnitt der Schrauben
$anz_S$	Anzahl der Schrauben
$d_{S,Sp}$	Spannungsdurchmesser der Schrauben
$\Delta F_{S,V,t=\infty}$	Abnahme der Vorspannkraft der Schrauben durch zeitliche Setzungen
$\Delta F_{S,V,\Delta Z}$	Abnahme der Vorspannkraft der Schrauben durch Seilkrafterhöhung
$E_S$	Elastizitätsmodul des Materials der Schrauben
$f_{S,u,k}$	Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffs
$f_{S,V,t=\infty}$	Faktor zur Ermittlung des Kriechens der Zinkschichtdicke auf den Seildräh- ten nach dem Anziehen der Schrauben
$F_{S,V}$	Vorspannkraft der Schrauben
$K_S$	Nachgiebigkeit der Schrauben
$l_{S,K}$	Dehnlänge der Schrauben

**Sonstige**

OSS	offenes Spiralseil
VVS	vollverschlossenes Spiralseil
RLS	Rundlitzenseil

**Bezeichnungen zur Relaxationsfunktion**

$E_0$	Anfangswert in der Relaxationsfunktion
$\bar{E}_0$	Endwert in der Relaxationsfunktion
$E_1$	Wert in der Relaxationsfunktion
$\bar{E}_1$	Differenz zwischen dem Anfangs- und dem Endwert in der Relaxationsfunk- tion
$\eta_{1,i}$	Wert zur Berechnung der Dämpfung in der Relaxationsfunktion
$\bar{\eta}_{1,i}$	Wert der Dämpfung in der Relaxationsfunktion
$t$	Zeit
$\bar{\tau}_{1,i}$	Zeit nach der 63% der Relaxation stattgefunden hat

**Bezeichnungen nach Bild 3-6**

$\alpha$	Richtungswinkel zwischen Seilrichtung und Sattelneigung in Radiant (Be- zeichnung aus DIN V ENV 1993-2 [6]) und (prEN 1993-1-11 [7])
$\alpha_K$	Klemmkraftbeiwert (Bezeichnung aus DIN 18800 Teil 1 [1])
$\alpha_U$	Umlenkkräftebeiwert (Bezeichnung aus DIN 18800 Teil 1 [1])
$d_Z$	Seildurchmesser
$F$	charakteristischer Wert der Klemmkraft (Bezeichnung aus DIN V ENV 1993-2 [6] und DIN V ENV 1993-2 [6])
$F_{Ed,  }$	parallel zum Seil wirkende Komponente der Bemessungslast (Bezeichnung aus prEN 1993-1-11 [7])
$F_{Ed,\perp}$	rechtwinklig zum Seil wirkende Komponente der Bemessungslast (Bezeich- nung aus prEN 1993-1-11 [7])
$F_{Ed,1}$	größere der beiden am Sattel angreifenden Bemessungswerte der Seilkraft (Bezeichnung aus prEN 1993-1-11 [7])
$F_{Ed,2}$	kleinere der beiden am Sattel angreifenden Bemessungswerte der Seilkraft (Bezeichnung aus prEN 1993-1-11 [7])

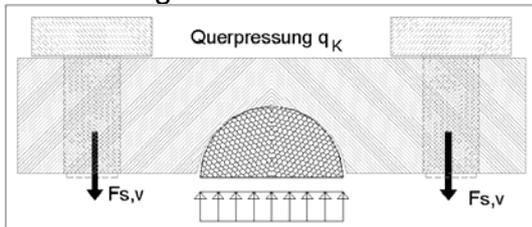
---

$F_r$	Klemmkraft (prEN 1993-1-11 [7])
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert
$G_{R,d}$	Grenzgleitkraft
$k$	Beiwert zur Berücksichtigung der Kraftübertragung durch die Sattelschale ( $k=1$ ) oder durch die Sattelschale mit zusätzlicher Klemmung ( $k=2$ ) (Bezeichnung aus DIN V ENV 1993-2 [6])
$K$	Summe der Klemmkräfte (Bezeichnung aus DIN 18800 Teil 1 [1])
$\mu$	Reibbeiwert
$P_d$	parallel zum Seil wirkende Komponente der charakteristischen äußeren Kraft (Bezeichnung aus DIN V ENV 1993-2 [6])
$q_{R,d}$	Grenzquerpressung
$T$	rechtwinklig zum Seil wirkende Komponente der charakteristischen äußeren Kraft (Bezeichnung aus DIN V ENV 1993-2 [6])
$T_{1d}$	größere der beiden am Sattel angreifenden Bemessungswerte der Seilkraft (Bezeichnung aus DIN V ENV 1993-2 [6])
$T_{2d}$	kleinere der beiden am Sattel angreifenden Bemessungswerte der Seilkraft (Bezeichnung aus DIN V ENV 1993-2 [6])
$U$	Summe der Umlenkkräfte (Bezeichnung aus DIN 18800 Teil 1 [1])

## Definitionen

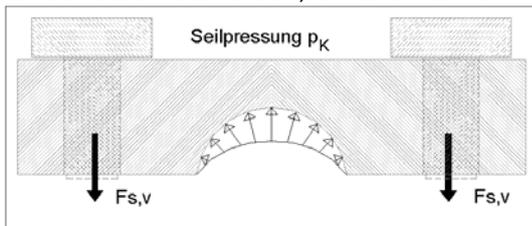
### Querpressung $q_K$

Die Querpressung ist definiert als die konstante Flächenlast, die sich aus dem Bezug aller Schraubenvorspannkraften auf den Seildurchmesser und die Länge der Seilklemme ergibt.



### Seilpressung $p_K$

Die Seilpressung ist definiert als die Pressung, die zwischen dem als Zylinder mit glatter Oberfläche idealisierten Seil und der Seilklemmennut auftritt. Die Seilpressung ist in ihrer Größe abhängig von dem vom Seilklemmenscheitel ausgehenden Winkel in der Seilklemmennut. Trägt man die Seilpressung über die abgewinkelte, geklemmte Seiloberfläche auf, erhält man ein sogenanntes Pressungsgebirge.

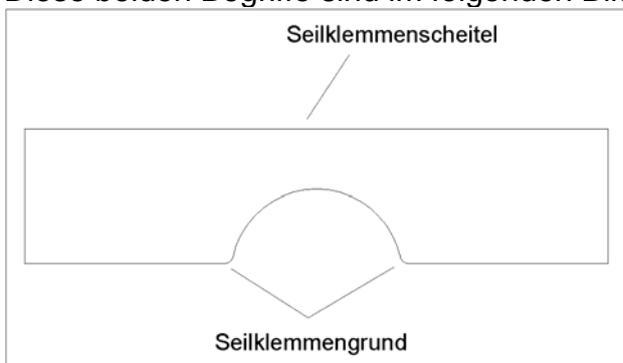


### Klemmkraftbeiwert $\alpha_K$

Der Klemmkraftbeiwert ist definiert als der Quotient aus der Summe der Seilpressungen und der zugehörigen Schraubenvorspannkraften. Der Klemmkraftbeiwert berücksichtigt somit gegenüber der Summe der Schraubenkräfte zusätzlich aktivierte Kräfte, die aufgrund der runden Form der Seilklemmennut auftreten.

### Seilklemmenscheitel und Seilklemmengrund

Diese beiden Begriffe sind im folgenden Bild erläutert.



---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Anwendung von Seilklemmen .....	1
1.2	Umfang und Ziel der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Überblick über die Einflussgrößen</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>7</b>
3.1	Baupraxis .....	7
3.2	Normung .....	8
3.3	Forschung .....	13
<b>4</b>	<b>Analytische Betrachtungen</b> .....	<b>15</b>
4.1	Seilpressung, Klemmkraftbeiwert und Scheiteldehnung .....	15
4.2	Schraubenvorspannkraft bei veränderlicher Seilkraft.....	21
4.2.1	Wirkungsweise .....	21
4.2.2	Mechanisches Modell.....	24
4.3	Zeitabhängige Setzungen .....	29
4.3.1	Ursachen und Einflüsse .....	29
4.3.2	Relaxationsgesetz .....	30
4.4	Torsionssteifigkeit .....	32
4.5	Folgerungen.....	35
<b>5</b>	<b>Bauteilversuche</b> .....	<b>37</b>
5.1	Überblick .....	37
5.2	Versuchsmaterialien für die Versuche mit Seilklemmen .....	37
5.2.1	Seile .....	37
5.2.2	Seilklemmen.....	38
5.3	Messgrößen und Messtechnik .....	38
5.3.1	Überblick .....	38
5.3.2	Schraubenkräfte .....	39
5.3.3	Dehnung auf dem Seilklemmenscheitel .....	40
5.3.4	Kontaktwinkel zwischen Seil und Seilklemme .....	40
5.3.5	Seilkraft .....	41
5.3.6	Verschiebekraft .....	41
5.3.7	Verschiebeweg.....	41
5.3.8	Messanlage .....	41
5.4	Verschiebeversuche an den offenen Spiralseilen .....	41
5.4.1	Versuchsaufbau .....	41
5.4.2	Versuchsdurchführung .....	42
5.5	Setzungsversuche an den offenen Spiralseilen .....	43
5.6	Setzungs- und Verschiebeversuche an den vollverschlossenen Spiralseilen.....	43
5.6.1	Versuchsaufbau .....	43
5.6.2	Versuchsdurchführung .....	45
5.7	Untersuchungen an belasteten Drahtberührungsstellen .....	45
5.8	Torsionsversuche an den offenen Spiralseilen .....	48
5.8.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	48
<b>6</b>	<b>Berechnungen mit der Methode der Finiten Elementen</b> .....	<b>50</b>
6.1	Berechnungsprogramm, Rechenannahmen und Elemente .....	50
6.2	Modellierung der Seile .....	51
6.2.1	Transversale Orthotropie.....	51
6.2.2	Phänomenologische Materialkennwerte.....	52
6.2.2.1	Materialkennwerte $E_z$ , $\mu_{rz}$ und $\mu_{0z}$ .....	52

6.2.2.2	Materialkennwert $G_{\theta z}$ .....	53
6.2.2.3	Materialkennwert $E_{\theta}$ .....	53
6.2.2.4	Materialkennwerte $E_r, G_{rz}, G_{r\theta}, \mu_{r\theta}$ .....	56
6.2.2.5	Zusammenfassung der Materialkennwerte .....	57
6.2.3	Überprüfung des Modells .....	57
6.3	Definition eines Reibgesetzes.....	57
6.4	Parameterstudie zur Entwicklung einer Gleichung für den Kontaktwinkel....	59
6.4.1	Berechnungen.....	59
6.4.2	Kontaktwinkel $\gamma_{K,K} \leq \gamma_{K,max}$ .....	60
6.4.3	Kontaktwinkel $\gamma_{K,K} \geq \gamma_{K,max}$ .....	61
6.4.4	Berechnung der Verschiebekraft.....	61
<b>7</b>	<b>Vergleich zwischen Bauteilversuchen, Analytik und Numerik.....</b>	<b>62</b>
7.1	Scheiteldehnung .....	62
7.2	Verschiebekraft .....	63
7.3	Kontaktbereich und Seilpressung.....	66
7.4	Torsionsversuche.....	68
<b>8</b>	<b>Herleitung weiterer Gesetzmäßigkeiten .....</b>	<b>70</b>
8.1	Zeitliches Setzungsverhalten der Klemmkraft .....	70
8.1.1	Experimentelle Untersuchung der Drahtberührungspunkte.....	70
8.1.2	Untersuchung der Seilklemmungen .....	72
8.2	Klemmkraft bei veränderlicher Seilkraft.....	73
8.3	Einfluss einer zusätzlichen Umlenkung.....	74
<b>9</b>	<b>Vorschläge zur Gestaltung und Berechnung.....</b>	<b>78</b>
9.1	Geometrie .....	78
9.1.1	Ausrundungsradien .....	78
9.1.2	Seilklemmennut.....	78
9.1.3	Scheiteldicke .....	78
9.2	Klemmkraftbeiwert .....	78
9.3	Sicherheitsbeiwert.....	79
9.4	Anziehen der Schrauben.....	79
9.5	Reibbeiwert .....	79
9.6	Berechnung.....	80
<b>10</b>	<b>Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>83</b>
10.1	Kontaktwinkel zwischen Seil und Seilklemmennut.....	83
10.2	Klemmkraftbeiwert .....	83
10.3	Dimensionierung des Scheitelbereichs .....	83
10.4	Reibbeiwert .....	84
10.5	Steifigkeit der Klemmverbindung .....	84
10.6	Zeitliche Setzungen in der Klemmverbindung.....	84
10.7	Setzungen in der Klemmverbindung durch Erhöhung der Seilkraft.....	84
10.8	Querpressung und Seilpressung.....	84
10.9	Temperatur .....	85
10.10	Finite-Element-Berechnungen.....	85
<b>11</b>	<b>Schrifttum.....</b>	<b>86</b>
<b>12</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>89</b>
12.1	Übersicht über die Versuchsseile.....	89
12.1.1	Offene Spiralseile .....	90
12.1.2	Vollverschlossene Spiralseile.....	91
12.2	Übersicht über die Versuchsklemmen.....	92
12.2.1	Allgemeines.....	92
12.2.2	Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=12 mm.....	92

---

12.2.3	Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=16 mm.....	93
12.2.4	Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=20 mm.....	93
12.2.5	Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=24 mm.....	94
12.2.6	Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=28 mm.....	94
12.2.7	Seilklemmen am vollverschlossenen Spiralseil VVS-2 d=34 mm.....	95
12.2.8	Seilklemmen am vollverschlossenen Spiralseil VVS-2 d=34 mm.....	95
12.3	Ergebnisse der Verschiebeversuche und –berechnungen.....	96
12.3.1	Scheiteldehnung .....	96
12.3.2	Verschiebekraft .....	109
12.3.3	Seilpressung .....	135
12.4	Ergebnisse der Torsionsversuche.....	145
12.5	Ergebnisse der Setzungsversuche.....	150
12.5.1	Zeitliche Setzungen am gespannten Seil .....	150
12.5.2	Zeitliche Setzungen über lange Zeiträume.....	171
12.5.3	Setzungen aus einer Seilkrafterhöhung .....	174

## 1 Einleitung

### 1.1 Anwendung von Seilklemmen

Mit der Erfindung des zunächst hauptsächlich in der Fördertechnik genutzten Drahtseils im Jahre 1834 begann auch das Bauen mit Seilen. Zu Beginn dieser langen Tradition nutzte man Drahtseile in Brückenbauwerken als tragende Elemente. Die Anwendungen wurden dann immer zahlreicher und umfassen heute auch abgespannte Masten sowie Überdachungen, Hallen und Fassaden. Der deutsche Pavillon auf der Weltausstellung in Montreal im Jahre 1967 und das Olympiadach in München aus dem Jahr 1972 haben das Bauen mit Seilen in starkem Maße vorangebracht.

Das Bauen mit Seilen eignet sich sowohl für Zweckbauten als auch für repräsentative Bauwerke, da mit dem Einsatz von Spiralseilen ein effektives, materialsparendes und architektonisch anspruchsvolles, da filigranes Bauen möglich ist. Diese Vielseitigkeit verspricht dem Bauen mit Seilen eine große Zukunft.

Um Seile als tragende Elemente einsetzen zu können, ist es in jedem Fall erforderlich, diese mit Endverbindungen als Verankerungsmöglichkeit zu versehen. Zudem können Kräfte an durchlaufenden Spiralseilen über zweischalige Seilklemmen mittels Reibschluss eingeleitet und/oder Spiralseile über gekrümmte Seilklemmen umgelenkt werden. Dies dient der Minimierung der Anzahl der Endverbindungen und dem einfacheren Vorspannen und hat zudem ästhetische Gründe. Seilklemmen werden z.B. für den Anschluss der Hängerseile an das Tragseil einer Hängebrücke, als Anschlussmöglichkeit an den Randseilen von Netzen, in stabilisierenden Unter- und Überspannungen und in den Kreuzungspunkten der aussteifenden Seile in Gitterschalen benötigt (Bild 1-1). Die in sie eingeleiteten seilparallelen Kräfte müssen dauerhaft übertragen werden, um das Verschieben der Seilklemme zu verhindern und somit das vorgesehene Tragverhalten sicherzustellen.

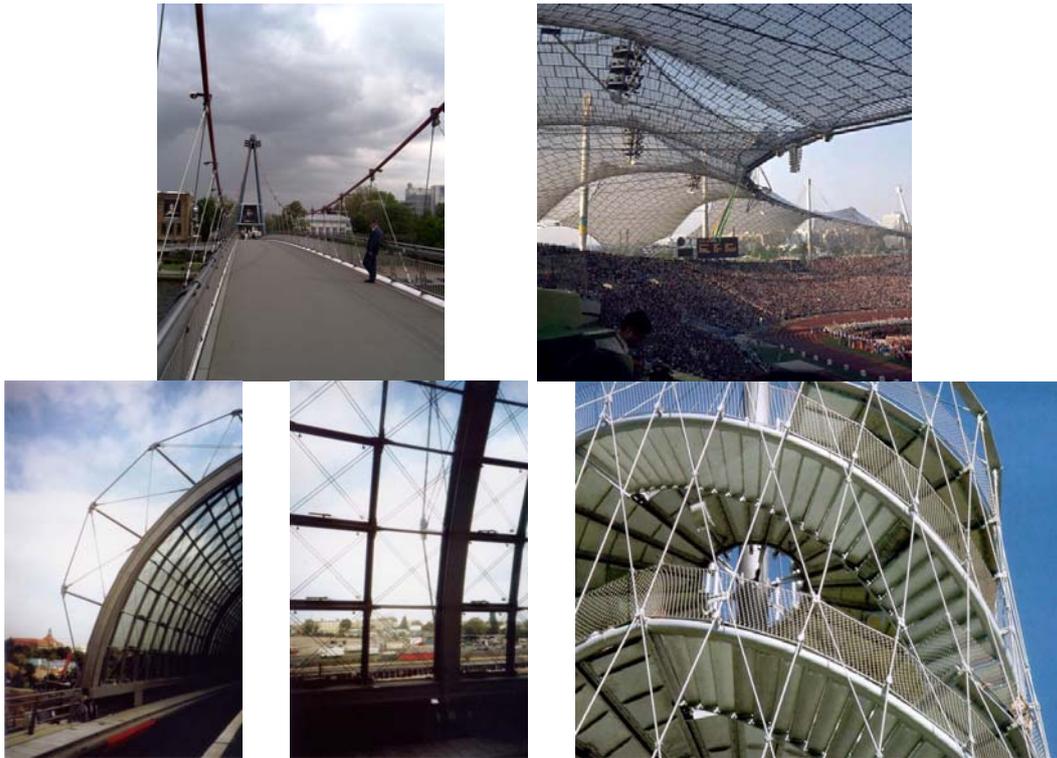


Bild 1-1: Beispiele für den Einsatz von Seilklemmen (Fußgängerbrücke „Holbeinsteg“ Frankfurt, Olympiastadion München, Hauptbahnhof Lehrter Bahnhof Berlin (2x), Killesbergturm Stuttgart)

Endverbindungen in vergossener sowie verpresster oder aufgerollter Ausführung wurden in den letzten 30 Jahren für Spiralseile ausführlich untersucht und einige Ausführungen haben sich in Form von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen auf dem Markt durchgesetzt. Seilklemmen sind in der Regel keine standardisierten Bauteile, da die Einsatzbedingungen von Fall zu Fall stark variieren. Sie werden deshalb meistens für jedes Bauwerk neu entworfen. Bei der Durchsicht des Schrifttums fällt auf, dass die Mechanismen und Einflussgrößen weitgehend unbekannt sind. Die vorhandenen Regelungen in der aktuellen Normung erfassen das Tragverhalten von Seilklemmen lediglich in Ausnahmefällen.

Diese Umstände machen es wünschenswert, das Tragverhalten von Seilklemmen zu untersuchen und möglichst allgemeingültig zu formulieren.

## 1.2 Umfang und Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Tragverhalten lösbarer Seilklemmen an offenen und vollverschlossenen Spiralseilen.

Ziel der Arbeit ist es, alle wesentlichen Einflüsse auf die seilparallele Verschiebekraft in ihrer Wirkungsweise durch mechanische Modelle zu erfassen und eine Berechnung mit Formeln, Tabellen oder Diagrammen zu ermöglichen. Hierzu gehören die zutreffende und allgemeingültige mechanisch fundierte Bestimmung der Beiwerte  $\alpha_K$  für die Klemmkraft und  $\alpha_U$  für die Umlenkraft sowie die Einflüsse auf die Schraubenvorspannkraft durch zeitabhängige Setzungen der nachgiebigen Klemmverbindung und durch Veränderung der Seilkraft.

Die Arbeit beginnt in Kapitel 2 mit einem Überblick über die Einflüsse auf das Tragverhalten lösbarer Seilklemmen im Hinblick auf die seilparallele Verschiebekraft und deren Ursachen und Wirkungen. Ein Schaubild soll dem Leser bei Bedarf immer wieder eine schnelle Orientierung ermöglichen. In Kapitel 3 wird auf den Stand der Technik eingegangen. Der Übersichtlichkeit halber werden diese in die Bereiche Normung, Baupraxis und Forschung unterteilt.

Zur Untersuchung der Thematik werden in Kapitel 4 zunächst analytische Betrachtungen dargestellt. Zu deren Überprüfung und zur Klärung offener Punkte werden Bauteilversuche und Berechnungen mit der Methode der Finiten Elementen durchgeführt.

In Kapitel 5 werden die Bauteilversuche beschrieben. Sie werden mit aus verzinkten Drähten aufgebauten, offenen Spiralseilen der Konstruktion 1x37, vollverschlossenen Spiralseilen mit zwei Lagen Z-Profildrähten und geraden Seilklemmen durchgeführt.

In Kapitel 6 werden die Grundlagen für die Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente und deren Ergebnisse betrachtet. Die numerischen Berechnungen werden anhand der Ergebnisse der Bauteilversuche verifiziert. Diese Berechnungen ermöglichen durch die Darstellung der Kontaktzustände zwischen Seil und Seilklemme zusätzliche Erkenntnisse für die Entwicklung der mechanischen Modelle. Grundlage für die Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente ist die Festlegung aller phänomenologischen Materialkennwerte für die Abbildung des Seils als homogener, zylindrischer Volumenkörper.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den drei vorab erwähnten Kapiteln zusammenfassend verglichen und bewertet. Anschließend werden in Kapitel 8 weitere Gesetzmäßigkeiten hergeleitet. Kapitel 8.3 befasst sich mit dem Einfluss einer zusätzlichen Umlenkung.

In Kapitel 9 werden auf der Basis der Gesetzmäßigkeiten aus den Kapiteln 7 und 8 Vorschläge zur Gestaltung und Bemessung unterbreitet.

Mit Kapitel 10 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse, Schlussfolgerungen und einem Ausblick.

Der Einfluss der Temperatur auf die Schraubenvorspannkraft ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

## 2 Überblick über die Einflussgrößen

Der Überblick über die Einflussgrößen auf die seilparallele Verschiebekraft von Seilklemmen wird anhand eines Schaubilds und Erläuterungen gegeben. In Bild 2-1 ist eine Seilklemme abgebildet.

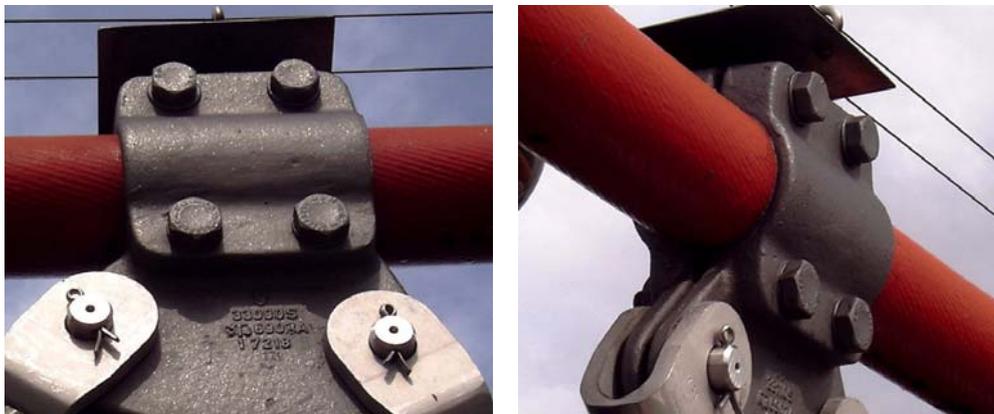


Bild 2-1: Beispiel einer Seilklemme

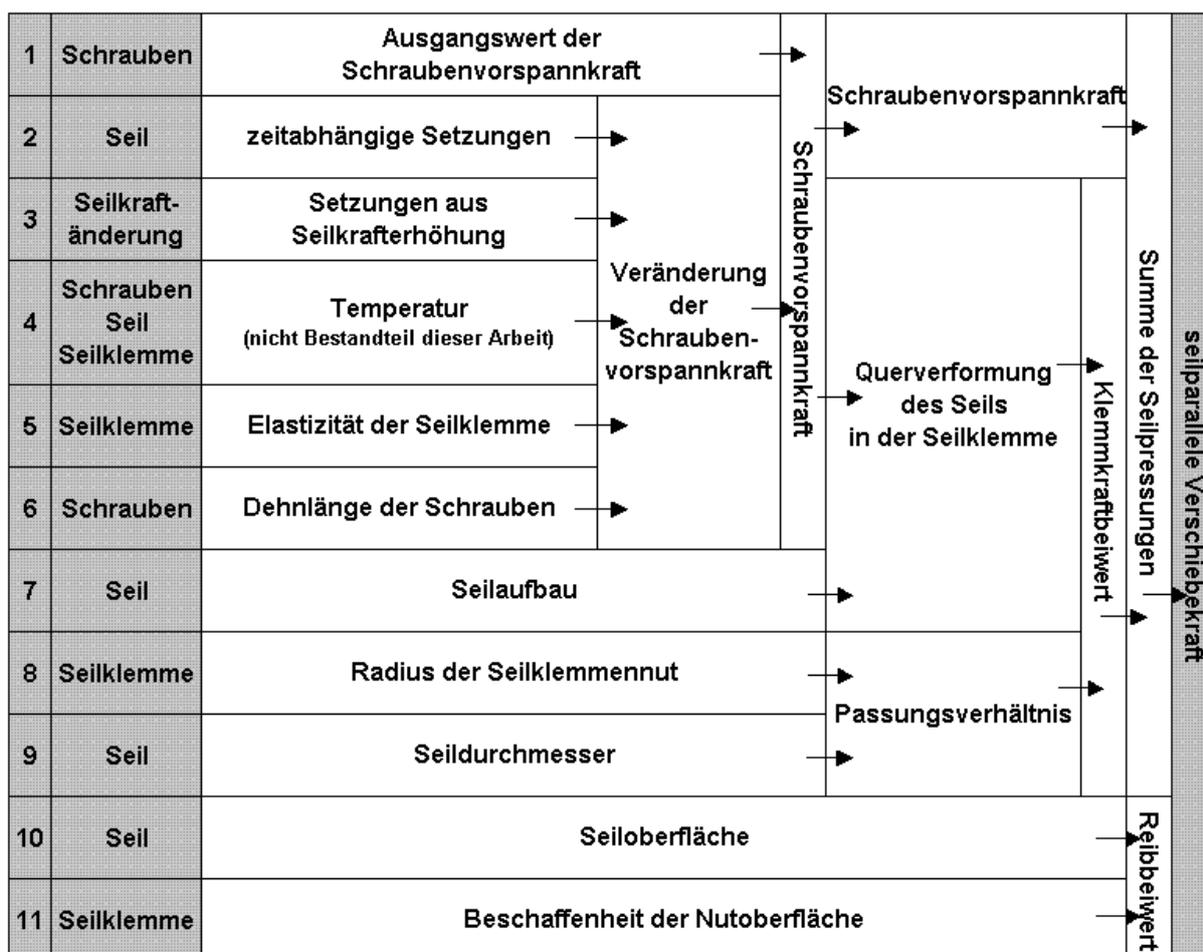


Bild 2-2: Einflüsse auf die Verschiebekraft

Nach Abschluss der Montage der Seilklemme liegt ein Ausgangswert der Schraubenvorspannkraft vor (Zeile 1 von Bild 2-2). Zeitabhängige Setzungen im geklemmten Seilabschnitt (Zeile 2 von Bild 2-2), die bei einer Seilkraftänderung auftretende

Seilquerkontraktion mit reversiblen und irreversiblen Anteilen (Zeile 3 von Bild 2-2) und Temperaturänderungen (Zeile 4 von Bild 2-2) führen zu einer Veränderung der Schraubenvorspannkraft. Die Elastizität der Seilklemme (Zeile 5 von Bild 2-2) und die Dehnlänge der Schrauben (Zeile 6 von Bild 2-2) beeinflussen die Größe dieser Veränderung.

Zusammen mit dem Seilaufbau (Zeile 7 von Bild 2-2) bestimmt die Schraubenvorspannkraft die Größe der Querverformung des Seils in der Seilklemme. Die Größe des Radius der Seilklemmennut (Zeile 8 von Bild 2-2) und des Seildurchmessers (Zeile 9 von Bild 2-2) bestimmen das Passungsverhältnis. Die Querverformung des Seils in der Seilklemme und das Passungsverhältnis bestimmen die Größe des Klemmkraftbeiwerts zwischen Seil und Seilklemme. In Bild 2-3 ist dies an zwei in Finite-Element-Berechnungen ermittelten Pressungsgebirgen verdeutlicht. Die berechnete Seilpressung ist über die abgewinkelte Seiloberfläche aufgetragen. Die mit der Bezeichnung „längs“ beschriftete Achse liegt in Seillängsrichtung. Der abgebildete Bereich ist in dieser Richtung etwas größer als die Länge der Seilklemme. Die mit der Bezeichnung „quer“ beschriftete Achse entspricht der Seilumfangsrichtung. Der abgebildete Bereich entspricht in dieser Richtung dem halben Seilumfang. Die dargestellte abgewinkelte Seiloberfläche ist demnach so groß, dass die gesamte Seilpressung zwischen dem Seil und der Seilklemmennut einer Seilklemmenschale dargestellt werden kann. Die skalierte Achse zeigt die Größe der Seilpressung an. Im linken Bild passt das Seil exakt in die Seilklemmennut, im rechten Bild ist die Seilklemmennut 5% größer.

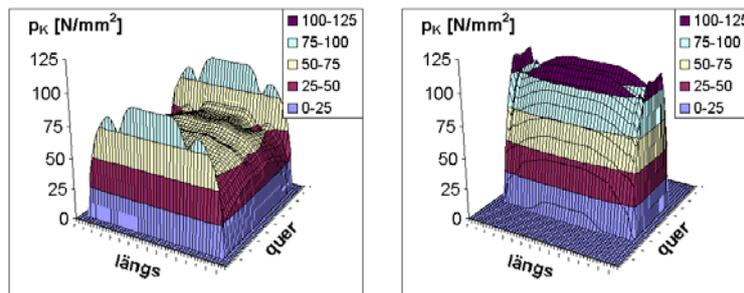


Bild 2-3: Pressungsgebirge auf der Seiloberfläche

Zusammen mit der Schraubenvorspannkraft beeinflusst der Klemmkraftbeiwert die Summe der Seilpressungen.

Die Seiloberfläche (Zeile 10 von Bild 2-2) und die Rauigkeit der Nutoberfläche (Zeile 11 von Bild 2-2) bestimmen die Größe des Reibbeiwerts. Das Produkt aus der Summe der Seilpressungen und dem Reibbeiwert ergibt die seilparallele Verschiebekraft.

In DIN 18800-7 [3] ist das Anziehen von planmäßig vorgespannten Schraubenverbindungen geregelt. Für Sechskantschraubengarnituren der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 werden Regelvorspannkraft und zugehörige Anziehdrehmomente für das Drehmomentenverfahren angegeben. In allen anderen Fällen sind Verfahrensprüfungen zur Kalibrierung des verwendeten Vorspannverfahrens vorgesehen. DIN V ENV 1090-1 [4] und DIN V ENV 1993-1-1 [5] legen den Mindestwert der Vorspannkraft für Sechskantschraubengarnituren der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 fest und fordern in allen Fällen eine Kalibrierung des verwendeten Vorspannverfahrens an Hand einer Verfahrensprüfung. An diesen Regelungen und nicht an der berechneten Grenzzugkraft der Schraube orientiert sich der maximal einstellbare Wert der Schraubenkraft.

---

Aufgrund der Nachgiebigkeit der Seilklemme wird sie sich beim Anziehen der Schrauben so verformen, dass der Schraubenkopf nicht mehr eben aufliegt und die Schraube auf Biegung belastet wird. Dies ist zu begrenzen, da es die Zuordnung von Drehmoment zu Schraubenkraft verfälscht und zu einem vorzeitigen Versagen der Schrauben führen kann.

Die Schraubenkraft führt zu einer Querbelastung des Seils, der sogenannten Seilpressung, die zu beschränken ist, um das Seil zu schützen.

### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Baupraxis

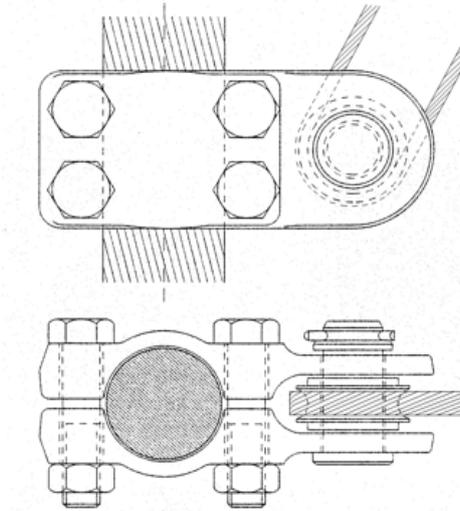


Bild 3-1: Randseilklemme eines Seilnetzes



Bild 3-2: Überspannter Binder



Bild 3-3: Anschlussseilklemme für Hängerseile am Tragseil einer Hängebrücke

An Einzelseilen haben sich zweischalige Seilklemmen mit auf beiden Seiten angeordneten Schraubenreihen als Anschlusselemente durchgesetzt. Anwendung finden diese Seilklemmen zum Beispiel als Randseilklemmen von Seilnetzen (Bild 3-1) (z.B. Münchner Olympiastadion), als Binderseilklemmen in unter- und überspannten Bindern Bild 3-2 (z.B. Lehrter Bahnhof in Berlin) oder als Anschlussseilklemmen für Hängerseile am Tragseil einer Hängebrücke (Bild 3-3). Durch den einseitigen Anschluss eines Zug- oder Druckelements an der Seilklemme erfährt das geklemmte Seil auch eine Umlenkung. Ist diese besonders groß, wird die Seilklemme gekrümmt ausgebildet.

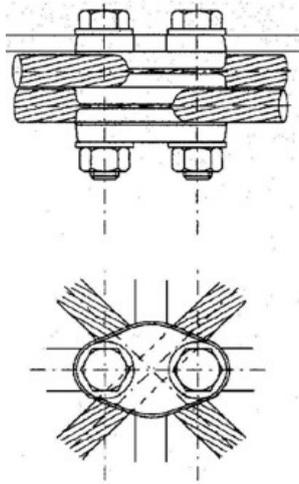


Bild 3-4: Netzseilklemme Einzelseile

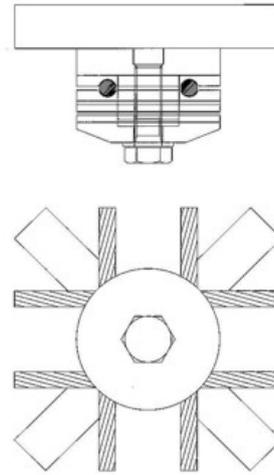


Bild 3-5: Netzseilklemme Doppelseile

Bei Gitterschalen, die zur freien Formbildung aus Stabvierecken gebildet werden, ist eine Aussteifung dieser Gelenkvierecke erforderlich. Die große Festigkeit von Seilen gibt den Ausschlag für deren Verwendung, da in der Regel leichte, transparente Lösungen gesucht werden. An den Stabknoten werden einander kreuzende Einzelseile, die in festem Winkel zueinander stehen, üblicherweise mit übereinanderliegenden zweischaligen Seilklemmen mit zwei oder vier Schrauben kraftschlüssig geklemmt (Bild 3-4).

Ist der Winkel zwischen den einander kreuzenden Seilen variabel, müssen die übereinanderliegenden, zweischaligen Seilklemmen bei der Montage beliebig gegeneinander drehbar sein. In diesem Fall werden zur Gewährleistung beliebiger Winkel statt der Einzelseile zwei parallel verlaufende Seile angeordnet, die mittels übereinanderliegender zweischaliger Seilklemmen nach der Ausrichtung durch eine zentral angeordnete Schraube kraftschlüssig geklemmt werden (Bild 3-5).

Seilklemmen an offenen Spiralseilen können grundsätzlich ähnlich wie aufgerollte, verpresste und gehämmerte Endverbindungen nichtlösbar mit dem Seil verbunden werden. Diese Klemmverbindungen haben ein im Vergleich zu den lösbaren Klemmverbindungen sehr unterschiedliches Tragverhalten und sind wegen der notwendigen Montage am Boden nicht universal einsetzbar. Sie wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Ziel des Einsatzes der Seilklemmen ist die dauerhafte Übertragung der Kräfte in Seillängsrichtung bei möglichst geringer Beeinflussung der Tragfähigkeit des Seils. Dafür geben die zur Zeit zur Verfügung stehenden Vorschriften DIN 18800 [1] und Eurocode 3 [6] und [7] nur in Ausnahmefällen eine Nachweismöglichkeit.

### 3.2 Normung

Die Norm DIN 18800 Teil 1 [1], die Vornorm DIN V ENV 1993-2 [6] und die Entwurfsnorm prEN 1993-1-11 [7] befassen sich mit Umlenkungen und Klemmungen an Seilen. In Bild 3-6 sind die wesentlichen Inhalte gegenübergestellt.

		DIN 18800 Teil 1 [1]	DIN V ENV 1993-2 [6]	prEN 1993-1-11 [7]
	Abschnitte	Abschnitt 5.3.3 Abschnitt 9.3	Anhang A	Abschnitt 3.6 Abschnitt 6.3
Umlenkler und Sattel	Umlenkradius	$\geq 30 \cdot d_z$ <sup>2)1)</sup> $\geq 20 \cdot d_z$ <sup>3)1)</sup>	$\geq 30 \cdot d_z$ <sup>4)</sup>	$\geq 30 \cdot d_z$ <sup>2)1)</sup> $\geq 20 \cdot d_z$ <sup>3)1)</sup>
	Weitere Angaben zur Geometrie	Endausrundungsradius $\geq 20\text{mm}$ Auflagerungsbreite $\geq 60\%$	Endausrundungsradius $\geq 3\text{mm}$	Endausrundungsradius $\geq 20\text{mm}$ <sup>1)</sup> Auflagerungsbreite $\geq 60\%$
Klemmen und Schellen	Angaben zur Geometrie	Auflagerungsbreite $\geq 60\%$ qualitative Ausführungsgrundsätze	Endausrundungsradius $\geq 3\text{mm}$	Auflagerungsbreite $\geq 60\%$ qualitative Ausführungsgrundsätze
	Grenzquerpressung	nur für VVS <sup>1)</sup> $40/f_{YM} \leq q_{R,d} \leq 100/f_{YM}$ <sup>3)</sup> Runddrahtkern $q_{R,d} \leq 200/f_{YM}$	OSS: $25/f_{YM} \leq q_{R,d} \leq 60/f_{YM}$ <sup>3)</sup> VVS: $40/f_{YM} \leq q_{R,d} \leq 100/f_{YM}$ <sup>3)</sup>	OSS: $25/f_{YM} \leq q_{R,d} \leq 60/f_{YM}$ <sup>3)</sup> VVS: $40/f_{YM} \leq q_{R,d} \leq 100/f_{YM}$ <sup>3)</sup>
Gleiten	Grenzgleitkraft	$G_{R,d} = \mu^* (U \cdot \alpha_U + K \cdot \alpha_K) / \gamma_M$	Klemme: $\Sigma P_d = \Sigma (T+F) \cdot \mu / \gamma_M$ Sattel: $\frac{T_{1d} - \frac{k \cdot F \cdot \mu}{\gamma_M}}{T_{2d}} \leq e^{\left[ \frac{\mu \cdot \alpha}{\gamma_M} \right]}$	Klemme: $F_{Ed,II} = (F_{Ed,I} + F_r) \cdot \mu / \gamma_M$ Sattel: $\frac{F_{Bd1} - \frac{k \cdot F_r \cdot \mu}{\gamma_M}}{F_{Bd2}} \leq e^{\left[ \frac{\mu \cdot \alpha}{\gamma_M} \right]}$
	$\alpha_U$ und $\alpha_K$	keine Angaben	$k = 1,0$ oder $2,0$	$k = 1,0$ oder $2,0$
	Reibbeiwert	0,10 für VVS	0,10 für VVS 0,20 für OSS 0,25 für RLS	0,10 für VVS
	Teilsicherheitsbeiwert	1,65 für Sättel 1,10 für Klemmen	2,0 wenn Reibung die Sicherheit erhöht 0,9 wenn Reibung die Sicherheit verringert	1,65 für Sättel 1,10 für Klemmen
Klemmkraftänderung	qualitative Erwähnung	elastische und plastische Seileinschnürung Dicke der Klemmen und Schellen im Scheitelbereich	Langzeitkriechen Querkontraktion durch Seilkrafterhöhung Reduzierung der effektiven Klemmkraft durch äußere Kräfte Zusammendrückung oder Setzungen der Zugglieder Temperaturdifferenz	Langzeitkriechen Querkontraktion durch Seilkrafterhöhung Reduzierung der effektiven Klemmkraft durch äußere Kräfte Zusammendrückung oder Setzungen der Zugglieder Temperaturdifferenz
	quantitative Angaben	keine	Querkontaktionszahl: 0,9 für OSS 0,8 für VVS Formel	Querkontaktionszahl: 0,9 für OSS 0,8 für VVS

<sup>1)</sup> Bei Einhaltung mindert die Umlenkung oder die Querpressung die Bruchlast des freien Seils um nicht mehr als 3%.  
<sup>2)</sup> Lagerung auf Stahl  
<sup>3)</sup> Lagerung auf Weichmetalleinlage oder Spritzverzinkung mit einer Dicke von mindestens 1 mm  
<sup>4)</sup> Bei Einhaltung mindert die Umlenkung oder die Querpressung die Bruchlast des freien Seils um nicht mehr als 5%.

Bild 3-6: Übersicht über die Regelungen in der Normung

In den Normen werden die Begriffe Umlenkler, Sattel, Klemmen und Schellen verwendet. Die Begriffe Umlenkler und Sattel bezeichnen den gleichen Gegenstand. Er kann aus nur einer Schale bestehen, besitzt aber stets eine längs der Seilachse gekrümmte Nut, in der das Seil geführt und umgelenkt wird. Das Seil kann in diesem Fall mit einer zweiten Schale zusätzlich geklemmt sein. Die Begriffe Klemmen und Schellen bezeichnen ebenfalls den gleichen Gegenstand. Er hat immer eine Seilklemmenut mit gerader Achse und umschließt das Seil mit zwei Schalen in der Regel nahezu vollständig und mit längs der Achse nahezu konstantem Querschnitt. Der Umlenkradius von Sätteln wird in [1] und [7] bei Lagerung auf Stahl auf den 30-fachen Seildurchmesser und bei Lagerung auf einer Weichmetalleinlage auf den 20-fachen Seildurchmesser beschränkt. Damit wird die Bruchlast des freien Seils um nicht mehr als 3% gemindert. [6] sieht in allen Fällen eine Beschränkung auf den 30-fachen Seildurchmesser vor und gibt an, dass die Minderung der Bruchlast des freien Seils maximal 5% beträgt. In von mir durchgeführten Bauteilversuchen haben sich diese Minderungen als deutlich auf der sicheren Seite liegend herausgestellt.

Eine weitere Beschreibung der Geometrie von Sätteln erfolgt in allen drei Normen über den Endausrundungsradius, der in [1] und [7] mindestens 20 mm betragen soll. In [6] wird lediglich ein Wert von 3 mm gefordert. [1] und [7] fordern zusätzlich, dass die Auflagerungsbreite des Seils im Querschnitt mindestens 60% des Seildurchmessers betragen soll.

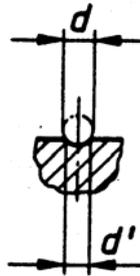


Bild 3-7: Auflagerungsbreite

Diese Auflagerungsbreite wird in [1] und [7] auch für Klemmen gefordert. In allen Normen wird darauf hingewiesen, dass der Kontakt scharfer Kanten mit dem Seil zu vermeiden ist. Lediglich in [6] wird der Endausrundungsradius von Klemmen mit einem konkreten Mindestwert von 3 mm angegeben.

Ein Grund, Endausrundungsradien bei Sätteln und Klemmen vorzusehen, ist, dass der Kontakt scharfer Kanten mit der äußeren Drahtlage des Seils vermieden werden soll. Hierfür ist ein Ausrundungsradius von 3 mm für alle Seildurchmesser ausreichend, da die Drahtdurchmesser lediglich zwischen 3 mm und 7 mm variieren, also in einer kleineren Bandbreite als die Seildurchmesser. Ein weiterer Grund, Endausrundungsradien bei Sätteln vorzusehen, ist die Entschärfung möglicher Wechselbiegebelastungen am Austritt des Seils aus dem Sattel. Diese Wechselbiegebelastungen können aufgrund von durch unterschiedliche Lasten hervorgerufenen Lageänderungen der außerhalb des Sattels frei im Raum verlaufenden Seillängsachse hervorgerufen werden. Durch einen Auslaufradius kann die Biegung am Austritt des Seils aus dem Sattel auf einen größeren Seillabschnitt verteilt werden, so dass die Seilkrümmung kleiner wird. Die Notwendigkeit und die Wirksamkeit dieser Maßnahme hängen jedoch von der Biegesteifigkeit des Seils und von den Gegebenheiten im Tragwerk wie der Seillänge, dem Seildurchhang und den Laständerungen ab. Der Endausrundungsradius sollte deshalb nicht mit einem festen Wert angegeben werden.

Die Grenzquerpressung durch Klemmendruck wird in allen drei Normen für vollverschlossene Spiralseile mit den selben Werten angegeben. In [6] und [7] werden zusätzlich Werte für offene Spiralseile angegeben. Es wird jeweils zwischen der Lagerung auf Stahl und der Lagerung auf einer Weichmetalleinlage unterschieden. In [6] wird darauf hingewiesen, dass größere Klemmkräfte aufgenommen werden können, wenn die Zugkraft des Zuggliedes nicht voll ausgenutzt wird. Dies ist jedoch in Versuchen nachzuweisen. In [1] wird angegeben, dass die beschränkte Querpressung die Bruchlast des Seils um nicht mehr als 3% mindert. Eine Berücksichtigung des Umlenkdrucks ist in allen drei Normen in diesem Nachweis nicht vorgesehen, da dieser durch die Begrenzung des Umlenkradius behandelt wird. Die folgende Betrachtung zeigt, wie groß die Querpressung aus einer Umlenkung sein kann:

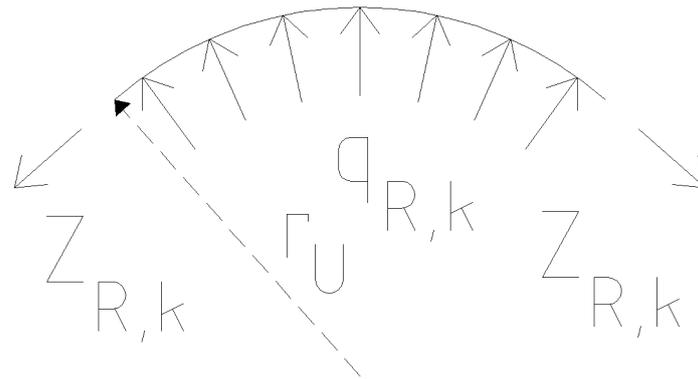


Bild 3-8: Querpressung durch Umlenkung

Die maximale charakteristische Zugkraft des Seils berechnet sich zu

$$Z_{R,k} = f * \frac{\pi * d_Z^2}{4} * f_{u,k} * k_S * k_e \quad (3-1)$$

Mit der Kesselformel und Gl. (3-1) kann die Querpressung wie folgt ermittelt werden

$$q_{R,k} = \frac{Z_{R,k}}{r_U * d_Z} = \frac{\pi * d_Z}{4 * r_U} * f * f_{u,k} * k_S * k_e \quad (3-2)$$

Mit den Kennwerten für ein vollverschlossenes Spiralseil mit drei Lagen Z-Profildrähten

$$f = 0,88$$

$$k_S = 0,95$$

$$f_{u,k} = 1570 \text{ N/mm}^2$$

$$k_e = 1,00$$

ergibt sich der Wert der charakteristischen Querpressung für einen Umlenkradius von 30-fachem Seildurchmesser zu

$$q_{R,k} = 34 \text{ N/mm}^2$$

und für einen Umlenkradius vom 20-fachen Seildurchmesser zu

$$q_{R,k} = 52 \text{ N/mm}^2.$$

Die Werte der durch eine Umlenkung hervorgerufenen Querpressung können somit die Größenordnung von der bei Klemmung zugelassenen Querpressung erreichen.

Die Berechnung der Grenzgleitkraft in [6] und [7] ist gleichwertig. Es ist eine Gleichung für Klemmen und eine Gleichung für Sättel vorgesehen. In der Gleichung für Klemmen werden die rechtwinklig zum Seil wirkenden Klemmkraften und die rechtwinklig zum Seil wirkende Komponente der an der Seilklemme angreifenden äußeren Kraft mit dem Reibbeiwert multipliziert. Der Umlenkkraftbeiwert wird mit 1,0 vorausgesetzt, der Klemmkraftbeiwert mit 1,0 oder 2,0. Der größere Wert darf nur angesetzt werden, wenn die beiden Klemmschalen mechanisch miteinander verbunden sind.

Der Gleichung für Sättel liegt aufgrund der Seilumlenkung die Gleichung für die Seilhaftung nach Euler zu Grunde. Bei einer zusätzlichen Klemmung kommt der Anteil der Klemmkraft im Sinne der Gleichung für die Klemmen hinzu.

In [1] wird lediglich eine Gleichung für Klemmen und Sättel angegeben. Im Beuth-Kommentar [2] zu Abschnitt 9.3.2 von DIN 18800 Teil 1 [1] wird angegeben, dass mit der Umlenkkraft für den Fall eines konstanten Krümmungsradius das Produkt aus Umlenkkraft je Längeneinheit und der Bogenlänge im Sinne der Kesselformel zu verstehen ist. Die Umlenkkraft je Längeneinheit berechnet sich aus dem Quotienten von Seilkraft und Umlenkradius. Nimmt man bei unterschiedlichen Seilkräften den Mittelwert der beiden angreifenden Seilkräfte ist die Gleichung aus [1] in diesem Punkt

gleichwertig mit denen aus [6] und [7]. In [1] sind der Klemmkraftbeiwert und der Umlenkraftbeiwert vorgesehen, werden jedoch nicht mit Werten versehen. Im Beuth-Kommentar [2] wird hierzu angegeben, dass die Beiwerte berücksichtigen, dass durch die entsprechende Formgebung der Sättel und Klemmen die Umlenk- bzw. Klemmkräfte mehrfach aktiviert werden können. Auf der sicheren Seite werden die Werte  $\alpha_u = 1$  und  $\alpha_k = 2$  genannt, ohne darauf hinzuweisen, dass für letzteren eine Verzahnung der beiden Klemmschalen erforderlich ist. Mit Bild 3-9 wird ein Beispiel für einen größeren Umlenkraftbeiwert gegeben.

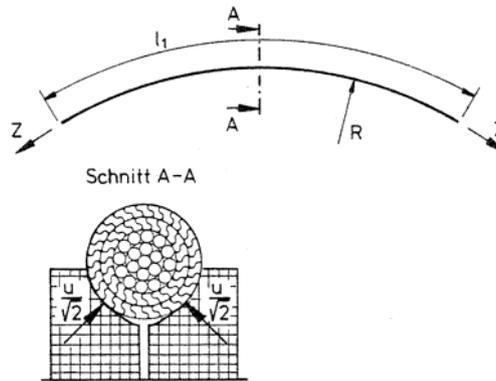


Bild 3-9: Umlenkraft und Beiwert  $\alpha_u$

Die Umlenkraft je Längeneinheit wirkt über die Länge des Sattels zweimal mit dem  $(1/\sqrt{2})$ -fachen Teil auf die beiden unter  $90^\circ$  zueinander stehenden Auflagerflächen. Damit wird  $\alpha_u = 2/\sqrt{2} = \sqrt{2}$ . Meines Erachtens ist eine solche Seilklemmenform im Querschnitt unzulässig, da sie das Seil bewusst ungleichmäßig belastet und lokal große Querpressungen hervorruft, die durch den Nachweis der Grenzquerpressung nicht erfasst werden.

Der Reibbeiwert wird in allen drei Normen für vollverschlossene Spiralseile mit dem selben Werten angegeben. In [6] werden zusätzlich Werte für offene Spiralseile und Rundlitzenseile angegeben mit dem Hinweis, dass die Reibbeiwerte bevorzugt durch Versuche bestimmt werden sollen. Die Reibbeiwerte in [6] gelten für mit Zink beschichtete Sättel und Klemmen. In den anderen Normen werden keine Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit der Sättel und Klemmen gemacht. Es scheint sich somit um einen auf der sicheren Seite liegenden Reibbeiwert für alle Oberflächenzustände zu handeln. Dies belegen auch die im Schrifttum in [18], [20], [21] und [22] aufgeführten und die von mir in Bauteilversuchen ermittelten Ergebnisse.

Der Teilsicherheitsbeiwert wird in [1] und [7] für Sättel mit  $1,50 \cdot 1,10 = 1,65$  im Gegensatz zu  $1,10$  für Klemmen angesetzt. Bei Sätteln sind die Umlenkkräfte mit dem Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkung behaftet. Dieser beträgt maximal  $1,50$ . In [6] wird in diesem Punkt nicht zwischen Sätteln und Klemmen unterschieden, sondern danach, ob die Reibung die Sicherheit des Tragwerks erhöht oder verringert. Für Umlenkkräfte müssen also die charakteristischen Werte angesetzt werden. Der Teilsicherheitsbeiwert für eine Seilklemme kann in [6] damit fast doppelt so groß wie in [1] und [7] sein. Die Sicherheitsphilosophie der Normen sieht bei einem Nachweis gegen die Streckgrenze einen Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,1$  vor und bei einem Nachweis gegen die Zugfestigkeit einen Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,25$ . Die Größe des Teilsicherheitsbeiwerts ist mit dem Wert  $\gamma_M = 1,1$  meines Erachtens im Sinne dieser Sicherheitsphilosophie angesetzt, da es sich sinngemäß um einen Nachweis gegen die Streckgrenze handelt, da bei einer Überschreitung der übertragbaren Kraft große Verformungen und somit eine Lastumlagerung im Tragwerk möglich sind.

Die Festlegung von Sicherheitsbeiwerten bei Bauwerken mit vorgespannten Bauelementen besitzt aber noch weitere Besonderheiten, die darin liegen, dass es sich um Systeme handeln kann,

- die bei zusätzlicher Belastung nur geringe Änderungen der inneren Kräfte aufweisen, d.h. Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite bewirken dann kaum Änderungen der inneren Kräfte oder
- die ein starkes nichtlineares Verhalten aufweisen, d.h. je nach Laststeigerung entstehen über- oder unterproportionale innere Kräfte.

In Element (725) von DIN 18800-1 steht, dass, wenn die Beanspruchung gegen Änderungen von Einwirkungen wenig empfindlich sind, die Beanspruchungen mit dem 0,9-fachen Bemessungswerten der Einwirkungen zu berechnen sind und der Tragsicherheitsnachweis mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M = 1,2$  zu führen ist. Dies gilt natürlich auch für Sättel und Seilklemmen.

In [6] und [7] wird recht umfassend auf Klemmkraftänderungen hingewiesen. Als Hilfestellung für die Berechnung werden jedoch lediglich Querkontraktionszahlen angegeben. Die Ausführungen in [1] hierzu sind sehr vage. Es wird der Hinweis gegeben, dass der Abbau der Klemmkräfte durch elastische und plastische Seileinschnürung zu berücksichtigen ist und dass die Dicke der Klemmen und Schellen im Scheitelbereich so zu begrenzen ist, dass dieser Abbau möglichst gering ist. Es werden jedoch keine quantitativen Größen angegeben.

Zusammenfassend kann zu den Regelungen der drei Normen folgendes festgehalten werden:

- 1) Die Form der Seilklemmennut im Querschnitt sollte genauer beschrieben werden. Dabei sollte auch darauf eingegangen werden, dass die Seilklemmennut nicht wie im Beuth-Kommentar [2] vorgeschlagen und in Bild 3-9 dargestellt unterschritten sein darf, sondern einen konstanten Radius haben sollte und wie gut das Seil in eine solche kreisrunde Seilklemmennut passen muss.
- 2) Angaben zur Dimensionierung des Seilklemmenscheitels sollten ergänzt werden.
- 3) Die Einflüsse auf die Schraubenvorspannkraft sollten genauer beschrieben werden. Außerdem sollte geklärt werden, wie groß die Einflüsse auf die Schraubenvorspannkraft sind und wie sie ermittelt werden können.
- 4) Die in den Normen vorgesehenen Versuche zur Bestimmung des Reibbeiwerts und der Grenzgleitkraft sollten genauer beschrieben werden. Zur Zeit gibt es keine einheitlichen und verbindlichen Richtlinien.
- 5) In allen drei Normen fehlen Regeln, mit denen die dauerhaft vorhandene Klemmkraft berechnet werden kann. Eine Bemessung ist somit nur in Ausnahmefällen möglich. Für die vorgesehenen Versuche zur Bestimmung der fehlenden Kenngrößen gibt es zur Zeit keine einheitlichen, verbindlichen Richtlinien.

### 3.3 Forschung

Das Schrifttum zum Thema ist zahlreich. Leider findet man jedoch selten Ansätze zu mechanischen Modellen, so dass viele Untersuchungen nur für den speziellen Einzelfall nützlich sind. Oftmals ist die Dokumentation von Versuchen unvollständig. Bei den meisten Untersuchungen fehlt die genaue Angabe des Seildurchmessers und des Radius der Seilklemmennut. Oft sind lediglich der Söldurchmesser ohne Angaben von Toleranzen und Istwerten für den Nenndurchmesser des Seils und den Radius der Seilklemmennut dokumentiert. Über den Einfluss des Passungsverhältnisses und über die Größe des Beiwertes  $\alpha_K$ , wie er in DIN 18800 [1] vorgesehen ist, kann bei diesen mangelhaften Angaben keine Aussage mehr getroffen werden. Ebenfalls fehlen meistens quantifizierte Angaben zur Oberflächenrauigkeit der Seilklemmennut.

Die zahlreichen Untersuchungen aus dem Bereich der Fördertechnik waren im Bezug auf die Herangehensweisen inspirierend, sind aber aufgrund der Verwendung von im Bauwesen nicht üblichen Seilkonstruktionen und wegen der bei laufenden Seilen oftmals geringeren Querpressungen als den im Bauwesen üblichen Werten nur begrenzt anwendbar.

Wertvolle und umfangreiche Überblicke über den Stand der Seiltechnik bieten Feyrer [9] mit dem Schwerpunkt in der Fördertechnik und Peil [10] mit dem Schwerpunkt im Bauwesen. Beide geben für eine Seilklemme ähnlich der Randseilklemme des Münchner Olympiastadions eine Gleichung zur Scheiteldickenbegrenzung und eine Gleichung zur Berechnung des Einflusses einer veränderlichen Seilkraft auf die Schraubkraft an, die auf Arbeiten von Gabriel ([8] und [11]) beruht. Die Begrenzung der Scheiteldicke soll die Federwirkung des Seilklemmenscheitels garantieren und damit den Einflusse der veränderlichen Seilkraft auf die Schraubkraft minimieren. Die Gleichung zur Berechnung des Einflusses einer veränderlichen Seilkraft auf die Schraubkraft beruht auf dem Prinzip, dass die Klemmverbindung aus drei Federn besteht.

Peil [12] hat zum Bauvorhaben „Messeturm Neue Messe München“ Untersuchungen an Seilklemmen durchgeführt, die mittragende Bestandteile der auf Druck und Biegung belasteten Ringe sind und somit die Vielfältigkeit der Seilklemmen verdeutlichen. Im Rahmen meiner Tätigkeit an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine wurden umfangreiche Untersuchungen an den dort eingesetzten Seilklemmen durchgeführt und in [13] veröffentlicht.

In [14] wurde ein Seil bestehend aus einem Kerndraht und sechs spiralförmig darum angeordneten Drähten in einem Finite-Element-Modell mit Volumenelementen abgebildet. Dieses einfachste Seil benötigt bereits enorme Rechnerleistung.

Donandt [15] behandelt bei seinen Untersuchungen zur Treibfähigkeit von Treibscheiben für die Verteilung der Querpressung im Querschnitt die Ansätze von Reye [16] und Leloutre [17] als Grenzfälle. Beisteiner [18] verwendet diese Ansätze zur Abschätzung unterer und oberer Grenzwerte der Reibzahlen bei der Auswertung von Versuchsergebnissen.

Häberle [19] bestimmt die Pressung laufender Drahtseile auf Seilscheiben mit einer doppelt gekrümmten Sensormatrix in Form der Seilrille für Rundlitzenseilen mit Faser- und Stahleinlage experimentell und leitet eine Regressionsgleichung für den Kontaktwinkel zwischen Seil und Rille in Abhängigkeit von der Belastung und dem Passungsverhältnis der Rille her.

Untersuchungen im Bereich des Bauwesens wurden im Sonderforschungsbereich 64 der Deutsche Forschungsgemeinschaft in Verbindung mit dem Bau des Münchner Olympiastadions durchgeführt. Von Altmann [20] und Mayr [21] werden die Versuche an der Münchner Randseilklemme des Olympiastadions dargestellt. Die beiden Quellen beschreiben nur die beobachteten Phänomene, enthalten jedoch weder physikalische Modelle noch Ansätze zu einer Verallgemeinerung der Ergebnisse.

In [22] werden von Roth Reibwerte zwischen Seil und Klemme für die Seilklemmen von Umlaufseilbahnen untersucht.

In [23] werden Reibwerte zwischen Drahtseil und Treibscheibenrillen aus Grauguss und nichtmetallischen Werkstoffen durch Messung der übertragbaren Reibkräfte in Abhängigkeit vom Anpressdruck ermittelt.

## 4 Analytische Betrachtungen

### 4.1 Seilpressung, Klemmkraftbeiwert und Scheiteldehnung

Anhand eines ebenen mechanischen Modells und einer Annahme zur Seilpressungsverteilung werden die Seilpressung und der Klemmkraftbeiwert über Kräftegleichgewichte ermittelt. Aus den resultierenden Schnittkräften im Seilklemmscheitel wird die Dehnung auf dessen Außenseite berechnet.

Donant [15] beschreibt die Seilpressungsverteilung zwischen Seil und Treibscheibe rechtwinklig zur Seillängsrichtung mit einer kosinusförmigen Verteilung. Häberle [19] bestätigt dies durch Messungen. In Richtung der Seillängsachse wird die Seilpressungsverteilung als konstant angenommen. Diese Seilpressungsverteilung wird in den folgenden Betrachtungen zugrunde gelegt.

Bild 4-1 und Bild 4-2 zeigen den Querschnitt einer halben Seilklemmschale mit einer kosinusförmigen Seilpressungsverteilung  $p_K$ , die ihr Maximum  $p_{K,1}$  bei  $0^\circ$  hat und die bis zum Kontaktwinkel  $\gamma_{K,K}$  auf den Wert Null ausläuft. In Bild 4-1 ist der Kontaktwinkel kleiner als der maximal mögliche Kontaktwinkel  $\gamma_{K,max}$ . In Bild 4-2 ist der Kontaktwinkel gleich dem maximal möglichen Kontaktwinkel. In Bild 4-3 läuft die kosinusförmige Seilpressungsverteilung nicht auf den Wert Null aus. Das Verhältnis des Werts  $p_{K,K}$  bei  $\gamma_{K,K}$  zum Wert  $p_{K,1}$  wird mit  $f_K$  bezeichnet.

$$f_K = \frac{p_{K,K}}{p_{K,1}} \quad (4-1)$$

In Bild 4-4 ist eine gleichförmige Seilpressungsverteilung dargestellt bei der  $f_K = 1$  gilt.

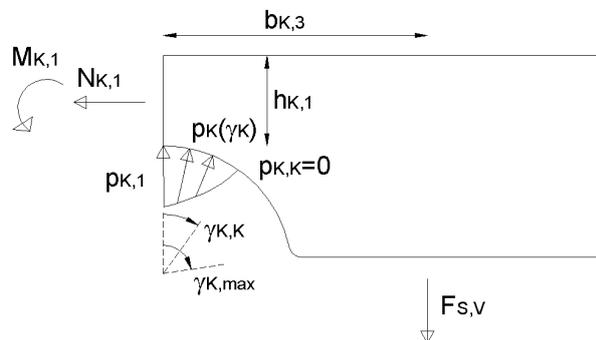


Bild 4-1: Kosinusförmige Seilpressungsverteilung mit  $\gamma_{K,K} < \gamma_{K,max}$  und  $f_K = 0$

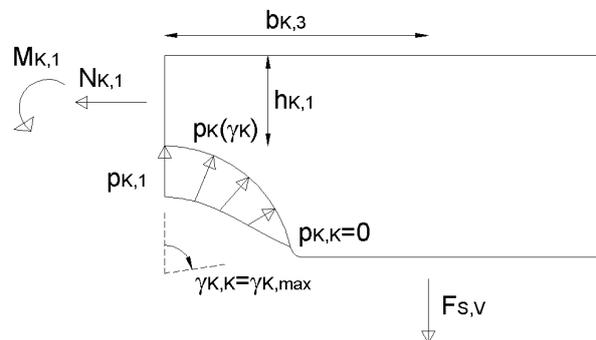


Bild 4-2: Kosinusförmige Seilpressungsverteilung mit  $\gamma_{K,K} = \gamma_{K,max}$  und  $f_K = 0$

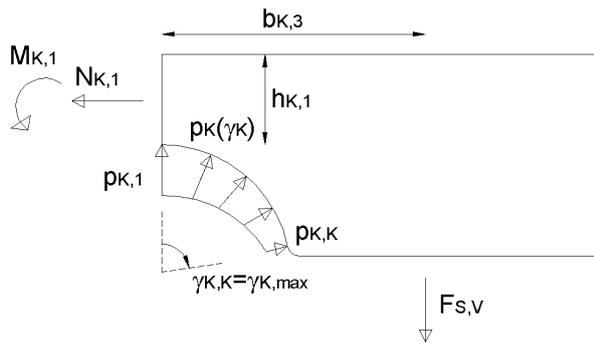


Bild 4-3: Kosinusförmige  
Seilpressungsverteilung mit  
 $\gamma_{K,K} = \gamma_{K,max}$  und  $0 < f_K < 1$

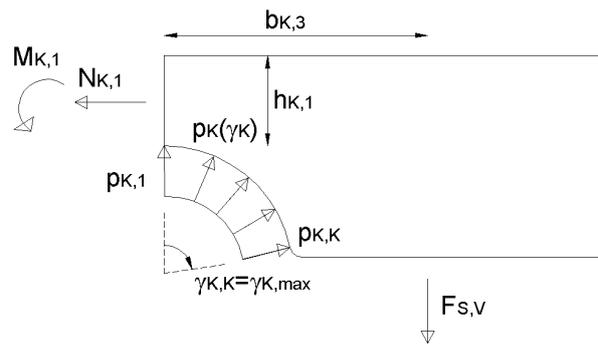


Bild 4-4: Kosinusförmige  
Seilpressungsverteilung mit  
 $\gamma_{K,K} = \gamma_{K,max}$  und  $f_K = 1$

Vorab werden der Übersicht halber später benötigte Integrale berechnet und wiederkehrende Terme aufgeführt und benannt.

$$\begin{aligned}
 c_{K,1} &= \int_0^{\gamma_{K,K}} \cos \gamma_K * \cos \left( \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K \right) * d\gamma_K = \\
 &= \frac{\sin \left[ \left( 1 - \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} \right) * \gamma_{K,K} \right]}{2 * \left( 1 - \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} \right)} + \frac{\sin \left[ \left( 1 + \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} \right) * \gamma_{K,K} \right]}{2 * \left( 1 + \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} \right)} = \\
 &= \frac{1}{2} * \left( \frac{\sin \left( \gamma_{K,K} - \frac{\pi}{2} \right)}{1 - \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}} + \frac{\sin \left( \gamma_{K,K} + \frac{\pi}{2} \right)}{1 + \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}} \right) \tag{4-2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{K,2} &= \int_0^{\gamma_{K,K}} \sin \gamma_K * \cos\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K\right) * d\gamma_K = \\
&= \left[ -\frac{\cos\left[\left(1 + \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}\right) * \gamma_K\right]}{2 * \left(1 + \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}\right)} - \frac{\cos\left[\left(1 - \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}\right) * \gamma_K\right]}{2 * \left(1 - \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}\right)} \right]_0^{\gamma_{K,K}} = \\
&= -\frac{\cos\left(\gamma_{K,K} + \frac{\pi}{2}\right)}{2 * \left(1 + \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}\right)} - \frac{\cos\left(\gamma_{K,K} - \frac{\pi}{2}\right)}{2 * \left(1 - \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}\right)} + \\
&\quad + \frac{1}{2 * \left(1 + \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}\right)} + \frac{1}{2 * \left(1 - \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}\right)} = \\
&= \frac{1}{2} * \left( \frac{1 - \cos\left(\gamma_{K,K} + \frac{\pi}{2}\right)}{1 + \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}} + \frac{1 - \cos\left(\gamma_{K,K} - \frac{\pi}{2}\right)}{1 - \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}}} \right) \tag{4-3}
\end{aligned}$$

$$c_{K,3} = f_K * \sin \gamma_{K,K} + (1 - f_K) * c_{K,1} \tag{4-4}$$

$$c_{K,4} = f_K * (\cos \gamma_{K,K} - 1) - (1 - f_K) * c_{K,2} \tag{4-5}$$

$$\int_0^{\gamma_{K,K}} \cos\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K\right) * d\gamma_K = \frac{2 * \gamma_{K,K}}{\pi} * \sin\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_{K,K}\right) = \frac{2 * \gamma_{K,K}}{\pi} \tag{4-6}$$

Die Seilpressungsverteilung lässt sich für alle oben gezeigten Zustände wie folgt beschreiben:

$$p_K(\gamma_K) = p_{K,K} + (p_{K,1} - p_{K,K}) * \cos\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K\right) \tag{4-7}$$

Mit Gl. (4-1) lautet sie

$$\begin{aligned}
 p_K(\gamma_K) &= f_K * p_{K,1} + (p_{K,1} - f_K * p_{K,1}) * \cos\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K\right) = \\
 &= f_K * p_{K,1} + (1 - f_K) * p_{K,1} * \cos\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K\right) = \\
 &= p_{K,1} * \left( f_K + (1 - f_K) * \cos\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K\right) \right) \quad (4-8)
 \end{aligned}$$

Mit dem vertikalen Kräftegleichgewicht kann der Wert  $p_{K,1}$  bestimmt werden. Die Pressung wird zunächst über die infinitesimal kleinen Abschnitte „du“ entlang der Klemmeninnenseite integriert. Dieses Integral wird dann in ein Integral über den Winkel  $\gamma_K$  übergeführt.

$$\begin{aligned}
 \sum V = 0 &= \\
 &= \frac{F_{S,V}}{l_{K,S}} - \int p_K(\gamma_K) * \cos \gamma_K * du = \\
 &= \frac{F_{S,V}}{l_{K,S}} - \int_0^{\gamma_{K,K}} p_K(\gamma_K) * \cos \gamma_K * r_K * d\gamma_K = \\
 &= \frac{F_{S,V}}{l_{K,S}} - r_K * f_K * p_{K,1} * \int_0^{\gamma_{K,K}} \cos \gamma_K * d\gamma_K - \\
 &\quad - r_K * (1 - f_K) * p_{K,1} * \int_0^{\gamma_{K,K}} \cos\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K\right) * \cos \gamma_K * d\gamma_K = \\
 &= \frac{F_{S,V}}{l_{K,S}} - r_K * f_K * p_{K,1} * \sin \gamma_{K,K} - r_K * (1 - f_K) * p_{K,1} * c_{K,1} = \\
 &= \frac{F_{S,V}}{l_{K,S}} - p_{K,1} * r_K * (f_K * \sin \gamma_{K,K} + (1 - f_K) * c_{K,1}) \quad (4-9)
 \end{aligned}$$

Diese Gleichung lässt sich nach  $p_{K,1}$  auflösen.

$$p_{K,1} = \frac{F_{S,V}}{l_{K,S} * r_K * c_{K,3}} \quad (4-10)$$

Mit der unter der Berücksichtigung der maximal möglichen Auflagerbreite berechneten Querpressung

$$q_K = \frac{F_{S,V}}{l_{K,S} * r_K * \sin \gamma_{K,\max}} \quad (4-11)$$

lautet Gl. (4-10)

$$p_{K,1} = \frac{q_K * \sin \gamma_{K,\max}}{c_{K,3}} \quad (4-12)$$

Als nächstes wird der Klemmkraftbeiwert über das Verhältnis zwischen der Schraubenvorspannkraft und der Summe aller Seilpressungen in der Seilklemmennut  $P_{K,\perp}$  bestimmt.

$$\begin{aligned}
P_{K,\perp} &= \int p_K(\gamma_K) * du = \int_0^{\gamma_{K,K}} p_K(\gamma_K) * r_K * d\gamma_K = \\
&= f_K * p_{K,1} * r_K * \int_0^{\gamma_{K,K}} d\gamma_K + \\
&\quad + (1 - f_K) * p_{K,1} * r_K * \int_0^{\gamma_{K,K}} \cos\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K\right) * d\gamma_K = \\
&= p_{K,1} * r_K * \left( f_K * \gamma_{K,K} + (1 - f_K) * \frac{2 * \gamma_{K,K}}{\pi} \right) = \\
&= p_{K,1} * r_K * \gamma_{K,K} * \left( f_K + (1 - f_K) * \frac{2}{\pi} \right) \tag{4-13}
\end{aligned}$$

Mit Gl. (4-10) folgt

$$\begin{aligned}
P_{K,\perp} &= \frac{F_{S,V}}{c_{K,3}} * \gamma_{K,K} * \left( f_K + (1 - f_K) * \frac{2}{\pi} \right) = \\
&= F_{S,V} * \frac{\gamma_{K,K} * \left( f_K + (1 - f_K) * \frac{2}{\pi} \right)}{c_{K,3}} \tag{4-14}
\end{aligned}$$

Der Klemmkraftbeiwert für zwei miteinander verzahnte Seilklemmschalen beträgt demnach

$$\alpha_K = \frac{2 * P_{K,\perp}}{F_{S,V}} = \frac{2 * \gamma_{K,K} * \left( f_K + (1 - f_K) * \frac{2}{\pi} \right)}{c_{K,3}} \tag{4-15}$$

Zur Berechnung der Scheitelspannung werden die Schnittgrößen im Seilklemmscheitel mit dem horizontalen Kräftegleichgewicht und mit dem Momentengleichgewicht ermittelt.

Das horizontale Kräftegleichgewicht lautet

$$\begin{aligned}
\sum H = 0 &= N_{K,1} - \int p_K(\gamma_K) * \sin \gamma_K * du = \\
&= N_{K,1} - \int_0^{\gamma_{K,K}} p_K(\gamma_K) * \sin \gamma_K * r_K * d\gamma_K \tag{4-16}
\end{aligned}$$

Mit Gl. (4-8) folgt

$$\begin{aligned}
\sum H = 0 &= N_{K,1} - r_K * f_K * p_{K,1} * \int_0^{\gamma_{K,K}} \sin \gamma_K * d\gamma_K - \\
&\quad - r_K * (1 - f_K) * p_{K,1} * \int_0^{\gamma_{K,K}} \cos\left(\frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K\right) * \sin \gamma_K * d\gamma_K = \\
&= N_{K,1} + r_K * f_K * p_{K,1} * (\cos \gamma_{K,K} - 1) - r_K * (1 - f_K) * p_{K,1} * c_{K,2} = \\
&= N_{K,1} + r_K * p_{K,1} * \left( f_K * (\cos \gamma_{K,K} - 1) - (1 - f_K) * c_{K,2} \right) \tag{4-17}
\end{aligned}$$

Mit Gl. (4-5) und Gl. (4-10) folgt

$$\sum H = 0 = N_{K,1} + F_{S,V} * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \tag{4-18}$$

Die Normalkraft im Seilklemmscheitel beträgt

$$N_{K,1} = -F_{S,V} * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \quad (4-19)$$

Das Momentengleichgewicht lautet

$$\begin{aligned} \sum M = 0 &= M_{K,1} - F_{S,V} * b_{K,3} + \int r_k * \sin \gamma_K * p_K(\gamma_K) * \cos \gamma_K * du + \\ &+ \int \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K - r_K * \cos \gamma_K \right) * p_K(\gamma_K) * \sin \gamma_K * du = \\ &= M_{K,1} - F_{S,V} * b_{K,3} + \int_0^{\gamma_{K,K}} r_K^2 * \sin \gamma_K * p_K(\gamma_K) * \cos \gamma_K * d\gamma_K + \\ &+ \int_0^{\gamma_{K,K}} \frac{h_{K,1}}{2} * r_K * p_K(\gamma_K) * \sin \gamma_K * d\gamma_K + \int_0^{\gamma_{K,K}} r_K^2 * p_K(\gamma_K) * \sin \gamma_K * d\gamma_K - \\ &- \int_0^{\gamma_{K,K}} r_K^2 * \cos \gamma_K * p_K(\gamma_K) * \sin \gamma_K * d\gamma_K = \\ &= M_{K,1} - F_{S,V} * b_{K,3} + r_K * \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \int_0^{\gamma_{K,K}} p_K(\gamma_K) * \sin \gamma_K * d\gamma_K \end{aligned} \quad (4-20)$$

Mit Gl. (4-8) folgt

$$\begin{aligned} \sum M = 0 &= M_{K,1} - F_{S,V} * b_{K,3} + r_K * \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * p_{K,1} * \\ &* \left( \int_0^{\gamma_{K,K}} f_K * \sin \gamma_K * d\gamma_K + \int_0^{\gamma_{K,K}} (1 - f_K) * \cos \left( \frac{\pi}{2 * \gamma_{K,K}} * \gamma_K \right) * \sin \gamma_K * d\gamma_K \right) = \\ &= M_{K,1} - F_{S,V} * b_{K,3} + r_K * \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * p_{K,1} * \\ &* \left( -f_K * (\cos \gamma_{K,K} - 1) + (1 - f_K) * c_{K,2} \right) \end{aligned} \quad (4-21)$$

Mit Gl. (4-5) und Gl. (4-10) folgt

$$\begin{aligned} \sum M = 0 &= M_{K,1} - F_{S,V} * b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \frac{F_{S,V}}{c_{K,3}} * c_{K,4} = \\ &= M_{K,1} - F_{S,V} * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) \end{aligned} \quad (4-22)$$

Das Moment im Seilklemmscheitel beträgt

$$M_{K,1} = F_{S,V} * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) \quad (4-23)$$

Mit der unter der Berücksichtigung der maximal möglichen Auflagerbreite berechneten Querpressung aus Gl. (4-11) lautet Gl. (4-23)

$$M_{K,1} = q_K * l_{K,S} * r_K * \sin \gamma_{K,\max} * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) \quad (4-24)$$

Die Spannung auf dem Seilklemmscheitel setzt sich aus den Anteilen der Normalkraft und des Moments zusammen. Dabei wird ein linearer Spannungsverlauf im Seilklemmscheitel zugrundegelegt.

Im ebenen Spannungszustand lautet die verwendete Spannungs-Dehnungs-Beziehung

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} * (\sigma_x - \nu * \sigma_y)$$

Da planmäßig keine Spannungen  $\sigma_y$  vorhanden sind vereinfacht sie sich zu

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

Im ebenen Verzerrungszustand lautet die Spannungs-Dehnungs-Beziehung

$$\varepsilon_x = \frac{1-\nu^2}{E} * \left( \sigma_x - \frac{\nu}{1-\nu} * \sigma_y \right)$$

Da planmäßig keine Spannungen  $\sigma_y$  vorhanden sind vereinfacht sie sich zu

$$\varepsilon_x = \frac{1-\nu^2}{E} * \sigma_x$$

mit

$$\nu=0,30$$

ergibt sich für den ebenen Verzerrungszustand

$$\varepsilon_x = 0,91 * \frac{\sigma_x}{E}$$

In den Gleichungen (4-27) und (4-29) wird der geringfügig auf der sicheren Seite liegende ebene Spannungszustand zugrundegelegt.

$$\begin{aligned} \sigma_K &= 6 * \frac{M_{K,1}}{l_{K,S} * h_{K,1}^2} + \frac{N_{K,1}}{l_{K,S} * h_{K,1}} = \\ &= \frac{6}{l_{K,S} * h_{K,1}^2} * \left( M_{K,1} + \frac{h_{K,1}}{6} * N_{K,1} \right) \end{aligned} \quad (4-25)$$

Mit Gl. (4-19) und Gl. (4-23) folgt

$$\begin{aligned} \sigma_K &= F_{S,V} * \frac{6}{l_{K,S} * h_{K,1}^2} * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} - \frac{h_{K,1}}{6} * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) = \\ &= F_{S,V} * \frac{6}{l_{K,S} * h_{K,1}^2} * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{3} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) \end{aligned} \quad (4-26)$$

Die Dehnung auf dem Seilklemmenscheitel beträgt

$$\varepsilon_K = \frac{\sigma_K}{E_K} = F_{S,V} * \frac{6}{E_K * l_{K,S} * h_{K,1}^2} * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{3} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) \quad (4-27)$$

Mit der unter der Berücksichtigung der maximal möglichen Auflagerbreite berechneten Querpressung aus Gl. (4-11) lauten Gl. (4-26) und Gl. (4-27) wie folgt.

$$\sigma_K = \frac{6 * q_K * r_K * \sin \gamma_{K,\max}}{h_{K,1}^2} * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{3} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) \quad (4-28)$$

$$\varepsilon_K = \frac{6 * q_K * r_K * \sin \gamma_{K,\max}}{E_K * h_{K,1}^2} * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{3} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) \quad (4-29)$$

## 4.2 Schraubenvorspannkraft bei veränderlicher Seilkraft

### 4.2.1 Wirkungsweise

Eine Veränderung der Seilkraft beeinflusst die Schraubenvorspannkraft aufgrund der im Seil auftretenden Querkontraktion. Es wird jedoch nicht der gesamte Teil der Seil-

kraftänderung eine Seilquerkontraktion hervorrufen können, da ein Teil der Seilkraftänderung im Bereich der Seilklemme über Reibung in diese eingeleitet wird und somit gar keine Seilquerkontraktion hervorruft. Dies wird im folgenden an einem einfachen, ebenen Reibproblem qualitativ veranschaulicht.

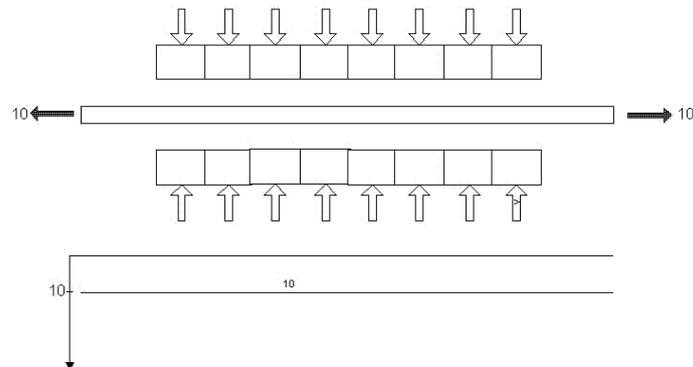


Bild 4-5: Mit der Kraft 10 gespanntes längliches Element

Das mit der Zugkraft 10 gespannte, längliche Element in Bild 4-5 wird von oben und von unten mit je einer aus 8 Segmenten bestehenden Platte mit je 8 Druckkräften der Größe 5 belastet. Im darunter abgebildeten Diagramm ist die Zugkraft über die Länge der Platten aufgetragen.

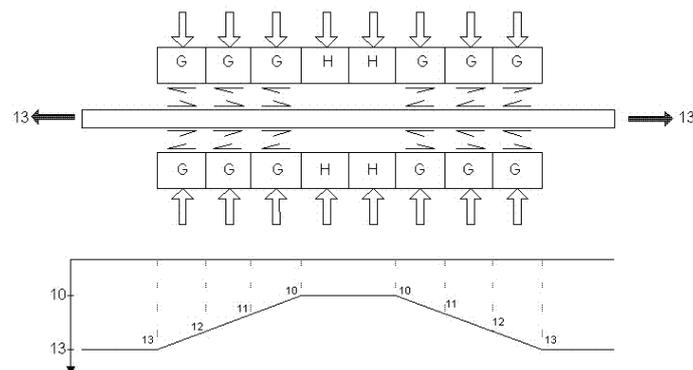


Bild 4-6: Mit der Kraft 13 gespanntes, längliches Element

Der Reibbeiwert zwischen dem gespannten, länglichen Element und den beiden Platten wird zu 0,1 angesetzt. In jedem Segment der Platten kann somit die Kraft 0,5 über Reibung übertragen werden. Was bei einer Erhöhung der Zugkraft auf 13 geschieht, ist in Bild 4-6 dargestellt. Aus den darunter abgebildeten Diagrammen mit der über die Länge der Platten aufgetragenen Zugkraft kann deren Verlauf abgelesen werden. Es ist ersichtlich, dass, wenn man Querkontraktionseffekte im gespannten, länglichen Element berücksichtigen will, diese über die Länge der Platten veränderlich sind.

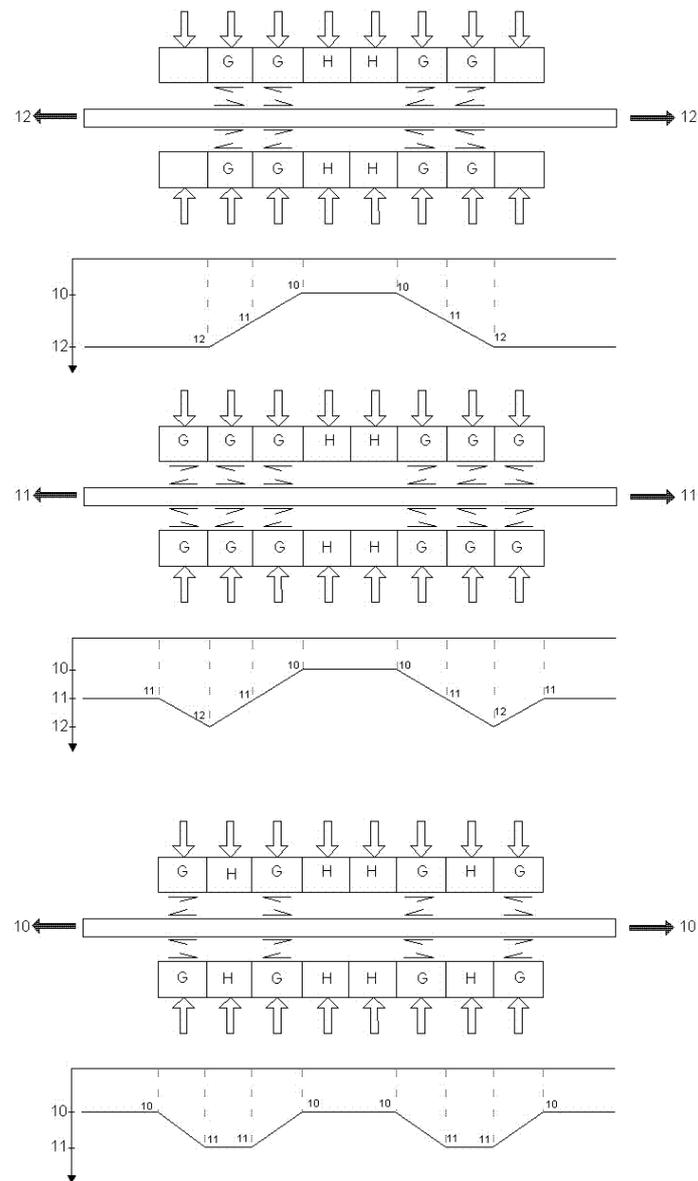
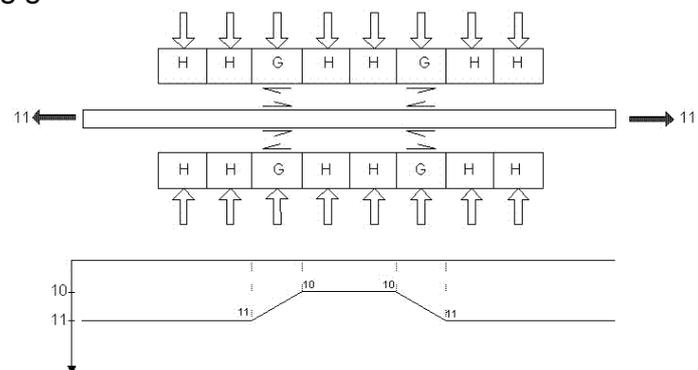


Bild 4-7: Auf die Zugkraft 10 entlastetes, längliches Element

Bild 4-7 zeigt, dass, wenn die Zugkraft wieder auf 10 eingestellt wird, der Ausgangszustand nicht wiederhergestellt wird. Der Verlauf der Zugkraft ist also von der Lastgeschichte abhängig.



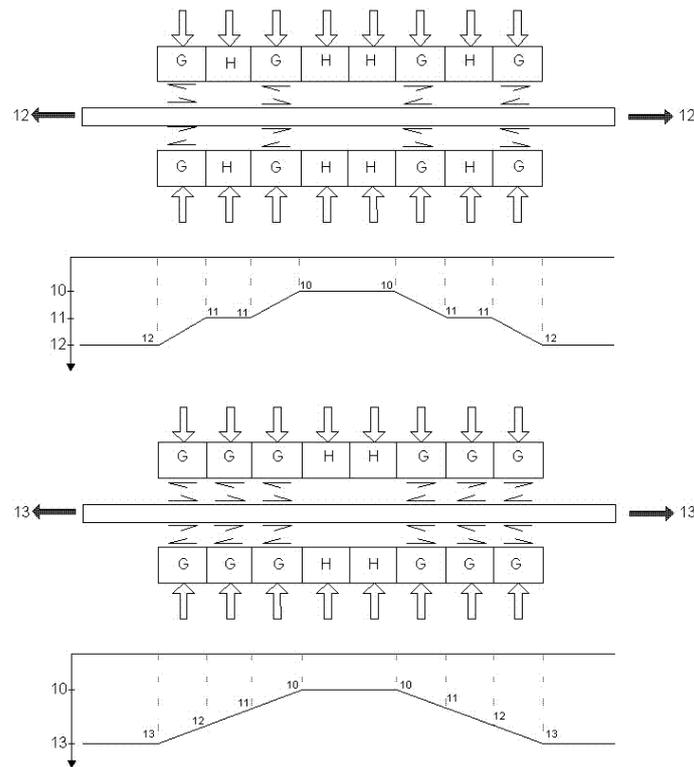


Bild 4-8: Wiederholte Belastung des länglichen Elements auf 13

Eine erneute Belastung auf eine Zugkraft von 13 stellt den Zustand der Erstbelastung auf den Wert 13 wieder her (Bild 4-8).

Anhand dieses einfachen Beispiels wurde gezeigt, dass der Spannungszustand im gespannten, länglichen Element von der Lastgeschichte abhängig ist, wenn die Belastung unterhalb der bis zu diesem Zeitpunkt aufgebrauchten Höchstlast liegt. Bei der Höchstlast oder einer weiteren Steigerung der Last ist der Spannungszustand unabhängig von der Lastgeschichte. Dies entspricht dem Verhalten elastisch-plastischer Querschnitte.

Dieses Verhalten, wird qualitativ auch an einer auf ein Seil geklemmten Seilklemme auftreten, so dass z. B. nach einer Be- und Entlastung des Seils der Zustand des Klemmpakets nicht mehr dem Ausgangszustand entspricht.

#### 4.2.2 Mechanisches Modell

In [8] wird eine Gleichung zur Berechnung des Abfalls der Schraubenkraft bei einer Zunahme der Seilkraft für eine Seilklemme, deren Form der in Bild 3-1 entspricht, angegeben. Mit den in der vorliegenden Arbeit und auch im folgenden verwendeten Bezeichnungen lautet sie

$$\Delta F_{S,V} = \pi * \frac{2 * r_K * \Delta F_Z}{V_Z * A_{Z,m}} * \mu_Z * \frac{1}{\frac{\pi * 2 * r_K}{l_{K,S} * h_{K,l} * E_K} + \frac{2 * I_{S,K}}{E_S * A_{S,Sp}}} \quad (4-30)$$

Das Gl. (4-30) zugrundeliegende mechanische Modell besteht aus zwei in Seilumfangsrichtung wirkenden Federn in Reihenschaltung, die die Reduzierung des Seilumfangs aufgrund der Querkontraktion aufnehmen. Eine Feder stellt die Nachgiebigkeit der Schrauben dar. Ihre Nachgiebigkeit ergibt sich aus

$$K_S = \frac{E_S * A_{S,Sp}}{l_{S,K}} \quad (4-31)$$

Die Dehnlänge der Schrauben wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als die Summe aus der freien Schraubenlänge, der halben Höhe des Schraubenkopfs und der halben Höhe der Mutter angesetzt.

Die zweite Feder stellt die Nachgiebigkeit der Seilklemme dar. In Gl. (4-30) wird die Annahme getroffen, dass sich ein Ringzug einstellt, der der Schraubenkraft entspricht. Diese Nachgiebigkeit ergibt sich aus

$$K_{K,R} = \frac{l_{K,S} * h_{K,1} * E_K}{\pi * 2 * r_K} \quad (4-32)$$

Da die beiden Federn in Gl. (4-30) in Reihe geschaltet sind, ergibt sich die Gesamtnachgiebigkeit zu

$$K_{S+R} = \frac{1}{\frac{2}{K_S} + \frac{1}{K_{K,R}}} \quad (4-33)$$

Die Reduzierung des Seildurchmessers aufgrund der Querkontraktion wird in Gl. (4-30) wie folgt berücksichtigt:

$$\Delta d_{Z,\Delta Z} = \frac{2 * r_K * \Delta F_Z}{V_Z * A_{Z,m}} * \mu_Z \quad (4-34)$$

Mit dem Faktor  $\pi$  wird daraus die Umfangsänderung berechnet.

Gl. (4-30) lieferte im Vergleich zu Versuchen stets unrealistische, bis um das zehnfache zu große Werte. Dies liegt an den drei im weiteren näher erläuterten Gründen:

- 1) Die Gleichung wurde für biegeeweiche Seilklemmen entwickelt.
- 2) Die Nachgiebigkeiten aus Schraube und Seilklemme werden über den Umfang wirkend angesetzt. Dabei wird die Nachgiebigkeit der Schraube um den Faktor  $\pi$  unterschätzt.
- 3) Die Biegenachgiebigkeit der Seilklemmenschalen bleibt als Federwirkung unberücksichtigt.
- 4) Die Seilkrafterhöhung im geklemmten Bereich ist kleiner als die rechnerisch angesetzte Seilkrafterhöhung.

zu 1)

Gl. (4-30) wurde für Seilklemmen gemäß Bild 3-1 mit einer Scheiteldickenbeschränkung entwickelt. Die Seilklemmen haben gegenüber dem Seilklemmenscheitel versetzt liegende Schrauben und eine im Scheitelbereich gleichbleibende Dicke. Die in [8] angegebene Beschränkung der Scheiteldicke ergibt sich aus

$$h_{K,1} \leq \frac{F_{S,V}}{f_{K,y,k} * l_{K,S}} * \sqrt{\frac{4 * f_{K,y,k} * l_{K,S} * (b_{K,3} - r_K)}{F_{S,V}} + 1} \quad (4-35)$$

In [8] wird diese Gleichung weder hergeleitet noch in ihrer physikalische Bedeutung erläutert. Berechnet man für die in dieser Arbeit verwendeten Seilklemmen bei der maximalen Scheiteldicke nach Gl. (4-35) die Scheiteldehnung nach Gl. (4-27), ergeben sich Werte, die für die üblichen Werkstoffe im plastischen Bereich liegen.

Aufgrund der Biegeweichheit der Seilklemme mit einer längs des Seilumfangs auch in der weiteren Umgebung des Scheitels konstanten Dicke (Bild 3-1) wird die Schraubenkraft als Ringzug eingeleitet. Biegeverformungen im Bereich des Seilklemmenscheitels können bei einer Seilklemme, bei der der Radius der Seilklemmennut größer als der halbe Seildurchmesser ist, zu einer unebenen

Schraubenkopf- und Mutternauflage und zu Berührungen der Schraube mit der Bohrungswandung führen. Eine solche Situation ist in Bild 4-9 an einem Viertelquerschnitt einer Klemmverbindung veranschaulicht. Sie kann die Zuordnung des Anziehdrehmoments zur Vorspannkraft der Schrauben beeinflussen.

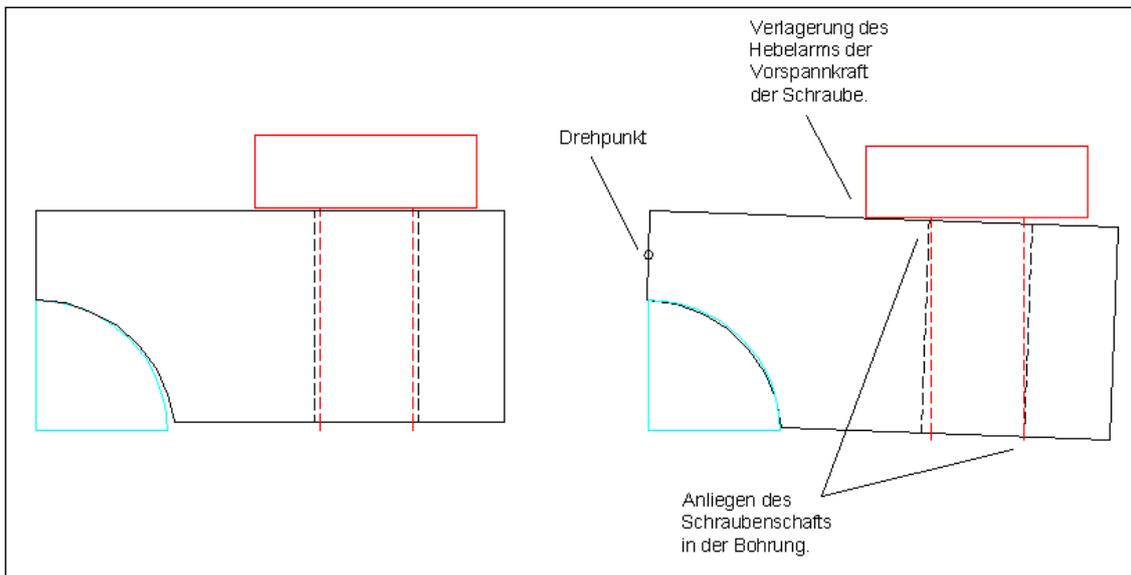


Bild 4-9: Schiefstellung der Schraubenkopfauflage

Um dies zu vermeiden muss eine möglichst ebene Schraubenkopf- und Mutternauflage sichergestellt werden. Hierfür schlage ich eine Beschränkung der Biegeverformung der Seilklemme durch die Beschränkung der Randspannung im Seilklemmenscheitel auf die Streckgrenze vor.

Unter dieser Voraussetzung hat der Ringzug nicht die Größe der Vorspannkraft der Schrauben sondern die Größe der mit Gl. (4-19) berechneten Kraft  $N_{K,1}$ .

Die Nachgiebigkeit auf Ringzug einer Seilklemmenschele lautet mit der mit Gl. (4-19) berechneten Kraft  $N_{K,1}$  somit

$$K_{K,N} = \frac{l_{K,S} * h_{K,1} * E_K}{\pi * d_z / 2} * \frac{-c_{K,4}}{c_{K,3}} \quad (4-36)$$

zu 2)

In Gl. (4-30) werden die Nachgiebigkeiten über den Umfang wirkend angesetzt. Für die Ringzugkraft trifft dies zu. Die Nachgiebigkeit der Schrauben nimmt jedoch direkt die Abnahme des Seildurchmessers auf und wird somit in Gl. (4-30) um den Faktor  $\pi$  unterschätzt.

zu 3)

Wie im mechanischen Modell in Abschnitt 4.1 bereits beschrieben gibt es im Seilklemmenscheitel neben der Normalkraft auch ein Biegemoment. Dies bedeutet, dass die Seilklemme auch als Biegefeder wirkt, die in Gl. (4-30) nicht berücksichtigt wird. Im folgenden wird die Biegenachgiebigkeit der Seilklemme definiert.

Die Abnahme der Schraubenvorspannkraft führt zu einer Abnahme des Scheitelmoments, die mit Gl. (4-23) oder mit Gl. (4-24) berechnet werden kann. Für die Definition der Biegenachgiebigkeit wird für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Seilklemmen eine dieses Scheitelmoment hervorrufende, dreiecksförmige Ersatzstreckenlast mit dem Maximalwert  $s_{K,1}$  berechnet, aufgrund derer eine Durchbiegung der Seilklemme im Abstand  $b_{K,3}$  auftritt.

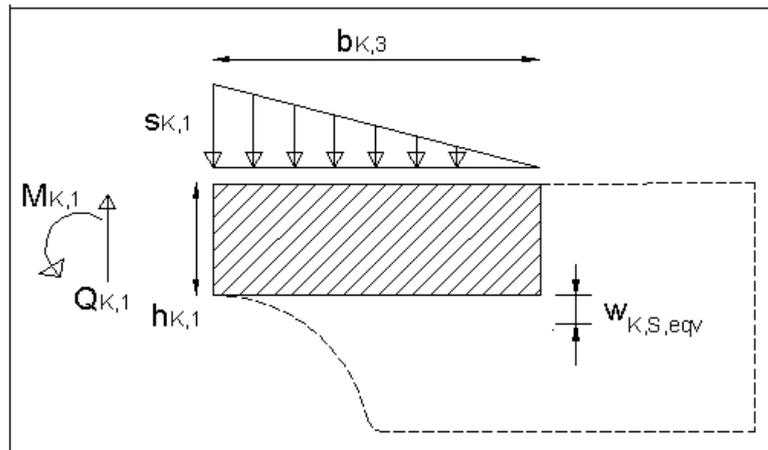


Bild 4-10: Halbe Seilklemmenschale mit dreiecksförmiger Ersatzstreckenlast

$$s_{K,1} = \frac{6 * \Delta M_{K,1}}{b_{K,3}^2} \quad (4-37)$$

Für dieses statische System wird die Durchbiegung  $w_{K,S,eqv}$  an der Stelle  $b_{K,3}$  berechnet.

$$\begin{aligned} w_{K,S,eqv} &= \frac{s_{K,1} * b_{K,3}^4}{30 * E_K * I_{K,1}} = \\ &= \frac{s_{K,1} * b_{K,3}^4}{30 * E_K * l_{K,S} * h_{K,1}^3 / 12} \end{aligned} \quad (4-38)$$

mit Gl. (4-37) ergibt sich

$$\begin{aligned} w_{K,S,eqv} &= \frac{6 * \Delta M_{K,1} * b_{K,3}^2}{30 * E_K * l_{K,S} * h_{K,1}^3 / 12} = \\ &= \frac{12 * \Delta M_{K,1} * b_{K,3}^2}{5 * E_K * l_{K,S} * h_{K,1}^3} \end{aligned} \quad (4-39)$$

Mit Gl. (4-23) folgt

$$\begin{aligned} w_{K,S,eqv} &= \frac{12 * \Delta F_{S,V} * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) * b_{K,3}^2}{5 * E_K * l_{K,S} * h_{K,1}^3} \\ &= \Delta F_{S,V} * \frac{12 * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) * b_{K,3}^2}{5 * E_K * l_{K,S} * h_{K,1}^3} \end{aligned} \quad (4-40)$$

Je größer der Wert  $w_{K,S,eqv}$ , desto größer ist die Nachgiebigkeit der Seilklemme und desto kleiner ist der Verlust der Schraubenvorspannkraft. Die Nachgiebigkeit der Feder einer Seilklemmenschale beträgt somit

$$\begin{aligned} K_{K,M} &= \frac{\Delta F_{S,V}}{w_{K,S,eqv}} = \\ &= \frac{5 * E_K * l_{K,S} * h_{K,1}^3}{12 * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) * b_{K,3}^2} \end{aligned} \quad (4-41)$$

zu 4)

Aufgrund des in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Verhaltens ist die Seilkraft nach einer ersten Seilkrafterhöhung im geklemmten Seilabschnitt kleiner als auf der freien Seillänge. Bezüglich Gl. (4-30) bedeutet das, dass der Wert  $\Delta F_Z$  zu groß angesetzt wird. Realitätsnaher ist hierfür der mittlere Wert der Seilkrafterhöhung im geklemmten Seilabschnitt. In Bild 4-11 werden zwei mögliche Seilkraftzustände nach einer Seilkrafterhöhung im geklemmten Seilabschnitt dargestellt. Die Seilkrafterhöhung ist schraffiert dargestellt. Im oben dargestellten Seilkraftzustand wird die Seilkrafterhöhung voll in die Seilklemme eingeleitet. Beim darunter abgebildeten Seilkraftzustand erhöht sich die Seilkraft auch in der Mitte der Seilklemme.

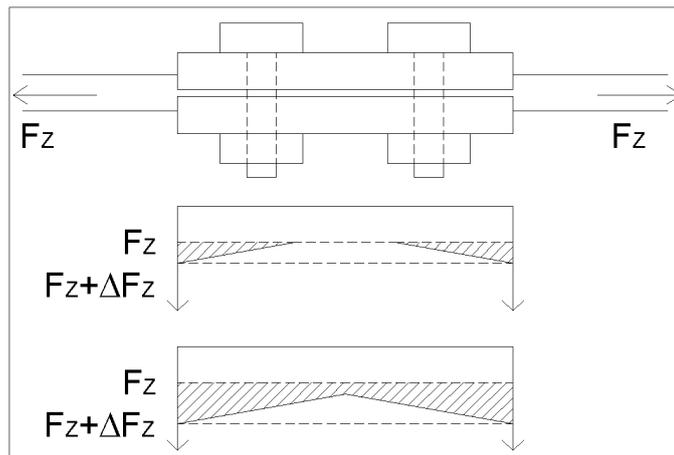


Bild 4-11: Ermittlung der mittleren Seilkrafterhöhung im geklemmten Seilabschnitt

Der mittlere Wert der Seilkrafterhöhung im geklemmten Seilabschnitt kann mit der seilparallelen Verschiebekraft  $G$  der Seilklemme wie folgt berechnet werden.

$$\Delta F_{Z,K,M} = \begin{cases} \frac{\Delta F_Z^2}{G} & \text{für } \Delta F_Z \leq \frac{G}{2} \\ \Delta F_Z - \frac{G}{4} & \text{für } \Delta F_Z > \frac{G}{2} \end{cases} \quad (4-42)$$

Bei Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Schrauben, der Biegnachgiebigkeit der Seilklemme im Scheitel und der Nachgiebigkeit aufgrund der Normalkraft im Seilklemmenscheitel ergibt sich die Gesamtnachgiebigkeit zu

$$K_{S+K} = \frac{1}{\frac{1}{K_S} + \frac{2}{K_{K,M}} + \frac{2}{\pi * K_{K,N}}} = \frac{1}{\frac{l_{S,K}}{E_S * A_{S,Sp}} + \frac{24 * \left( b_{K,3} + \left( \frac{h_{K,1}}{2} + r_K \right) * \frac{c_{K,4}}{c_{K,3}} \right) * b_{K,3}^2}{5 * E_K * l_{K,S} * h_{K,1}^3} - \frac{l_{K,S} * h_{K,1} * E_K * c_{K,4}}{\pi^2 * d_Z / 2 * c_{K,3}}} \quad (4-43)$$

Da die Gesamtnachgiebigkeit im folgenden nicht über den Umfang wirkend angesetzt wird, sondern direkt die Abnahme des Seildurchmessers aufnimmt, muss die Nachgiebigkeit aufgrund der Normalkraft im Seilklemmenscheitel mit dem Wert  $\pi$  multipliziert werden. Die hier vorgeschlagene Gleichung zur Berechnung des Abfalls der Schraubenvorspannkraft bei einer Seilkrafterhöhung lautet

$$\Delta F_{S,V,\Delta Z} = \Delta d_{Z,\Delta Z} * K_{S+K} \quad (4-44)$$

mit

$$\Delta d_{Z,\Delta Z} = \frac{d_Z * \Delta F_{Z,K,M}}{V_Z * A_{Z,m}} * \mu_Z \quad (4-45)$$

### 4.3 Zeitabhängige Setzungen

#### 4.3.1 Ursachen und Einflüsse

In der VDI-Richtlinie 2230 [24] wird angegeben, dass bei rein elastisch vorgespannten Schrauben bei Raumtemperatur noch keine nennenswerten Relaxationsbeträge auftreten. Dies scheidet somit als Ursache der zeitabhängigen Setzungen aus. Eine mögliche Ursache liegt in den Drahtberührungen zwischen den verzinkten Drähten, die in den Drahtlagen als Linienkontakt und zwischen den Drahtlagen als Punktkontakte auftreten. Die Hertz'sche Pressung in diesen Kontakten kann große Werte annehmen, so dass ein Kriechen denkbar ist, zumal in [25] und [26] angegeben wird, dass die Kriechfestigkeit von Zink bei Raumtemperatur zwischen 20 und 40 N/mm<sup>2</sup> liegt.

Die Auswirkung dieses Kriechens verteilt sich auf die beiden Komponenten Seilklemme und Schraube, die man in diesem Zusammenhang analog zu Abschnitt 4.2.2 auch als Federn bezeichnen kann. Die Nachgiebigkeiten der Klemmverbindung, die bei der Seilquerkontraktion wirken, gelten auch für die zeitlichen Setzungen, die als Durchmesserreduzierung betrachtet werden können.

Die Seilpressung ist eine Einflussgröße für den Kriechvorgang zwischen den Drahtkontakten. Die Seilpressung am Seilklemmenscheitel und deren Auswirkung auf die Drahtkontakte wirkt in Richtung der Schraubenkräfte und wirkt sich somit direkt auf diese aus.

Für Seildrähte sind in der Praxis die Verzinkung mit reinem Zink und die Galfan- oder Crapalverzinkung üblich. Diese Verzinkungen können als Normalverzinkung oder als Dickverzinkung in einem Feuerverzinkungsprozess im Zinkbad aufgebracht werden. Die flächenbezogene Masse des Zinküberzugs ist für Rund- und Z-Profildrähte in DIN 2078 [28] und in DIN EN 10264 [30] geregelt. In der folgenden Tabelle sind die flächenbezogene Masse des Zinküberzugs aus DIN 2078 [28] und die damit berechnete entsprechende Zinkschichtdicke angegeben. Die Abweichungen zu DIN EN 10264 [30] sind vernachlässigbar gering.

Draht- durchmesser		Dichte Zink	normalverzinkt		dickverzinkt	
von	bis		Zink	Zinkdicke	Zink	Zinkdicke
[mm]	[mm]	[g/mm <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[μm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[μm]
1,00	1,20	0,00714	80	11	150	21
1,20	1,50		90	13	165	23
1,50	1,90		100	14	180	25
1,90	2,50		110	15	205	29
2,50	3,20		125	18	230	32
3,20	3,70		135	19	250	35
3,70	4,00		135	19	260	36
4,00	4,50		150	21	270	38
4,50	5,50		165	23	280	39
5,50	6,00		180	25	280	39

Bild 4-12: Zinkschichtdicken nach DIN 2078 [28]

Die tatsächliche flächenbezogene Masse des Zinküberzugs liegt in der Regel 20 bis 30 % über diesen Werten.

Bei der Galvanverzinkung und bei der Crapalverzinkung wird dem Zink 5 % Aluminium zugesetzt. Dies erhöht die Dichtigkeit und die Homogenität des aufgebrauchten Korrosionsschutzes und erhöht somit den Korrosionswiderstand. Zugleich erhöht es die Zug- und Kriechfestigkeit des Korrosionsschutzes gemäß [25] und [26]. Zuverlässige qualitative Angaben über diese Wirkungen sind nicht bekannt. Die Art der Verzinkung, die Dicke der Zinkschicht und die Anzahl der übereinander liegenden Drähte werden das Kriechverhalten beeinflussen.

Die Summe der Zinkschichtdicken der Drähte aller Drahtlagen beträgt

$$t_{Z,Zink} = 2 * (2 * n_{D,L} - 1) * t_{D,Zink} \quad (4-46)$$

Bei einer verzinkten Innenseite der Seilklemmschale muss auch deren Zinkschichtdicke berücksichtigt werden.

$$t_{Zink} = t_{Z,Zink} + t_{K,Zink} \quad (4-47)$$

Der Abfall der Schraubenvorspannkraft zum Zeitpunkt  $t = \infty$  soll analog zu Gl. (4-44) berechnet werden

$$\Delta F_{S,V,t=\infty} = \Delta d_{Z,t=\infty} * K_{S+K} \quad (4-48)$$

Die Größe der äquivalenten Verringerung des Seildurchmessers zum Zeitpunkt  $t = \infty$  wird mit  $\Delta d_{Z,t=\infty}$  bezeichnet und soll mit Hilfe von Versuchen abgeschätzt werden.

### 4.3.2 Relaxationsgesetz

Bei vielen Werkstoffen nimmt unter einer konstanten Spannung die Dehnung mit der Zeit zu. Diese Werkstoffe besitzen Eigenschaften sowohl eines elastischen Festkörpers als auch einer viskosen Flüssigkeit. Daher bezeichnet man ein solches Verhalten als viskoelastisch. Es wird mit der auf den Grundmodellen Feder, Dämpfer und Reibelement aufgebauten Modellrheologie beschrieben. Der sogenannte Kelvin-Voigt-Körper ist eine Parallelschaltung einer Feder und eines Dämpfers und ist somit ein Körper mit flüssigkeitsartigem Anfangsverhalten und festkörperartigem Endverhalten. Der sogenannte Maxwell-Körper ist eine Reihenschaltung einer Feder und eines Dämpfers und ist somit ein Körper mit festkörperartigem Anfangsverhalten und flüssigkeitsartigem Endverhalten. Diese beiden einfachen Modelle sind im allgemeinen nicht in der Lage, das Verhalten von viskoelastischen Materialien hinreichend genau zu beschreiben. Hierfür nimmt man sogenannte Kelvin-Voigt-Gruppen, die eine aus einer Feder, einem Dämpfer und beliebig vielen Kelvin-Voigt-Körpern be-

stehende Reihenschaltung sind oder Maxwell-Gruppen, die eine aus einer Feder, einem Dämpfer und beliebig vielen Maxwell-Körpern bestehende Parallelschaltung sind. Die in Bild 4-13 dargestellte Maxwell-Gruppe besteht aus einer Feder und drei parallelen Maxwell-Körpern.

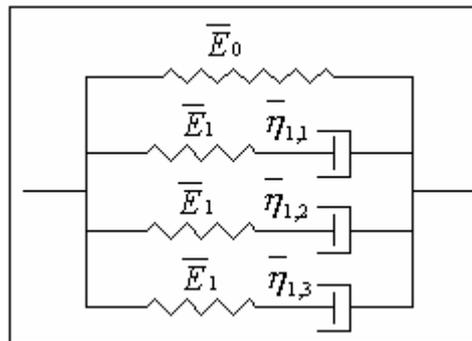


Bild 4-13: Maxwell-Gruppe

Diese Maxwell-Gruppe besitzt keinen zusätzlichen Dämpfer und weist somit als Endzustand ein Festkörperverhalten auf. Die drei Maxwell-Gruppen besitzen die selbe Anfangssteifigkeit aber unterschiedlich starke Dämpfer. Die Anordnung in Bild 4-14 weist das selbe Verhalten auf. Es handelt sich um drei sogenannte lineare Standardkörper. In diesem Aufbau wird noch deutlicher, dass drei Relaxationsvorgänge mit unterschiedlichen Relaxationsgeschwindigkeiten jedoch gleichen Anfangs- und Endwerten kombiniert werden.

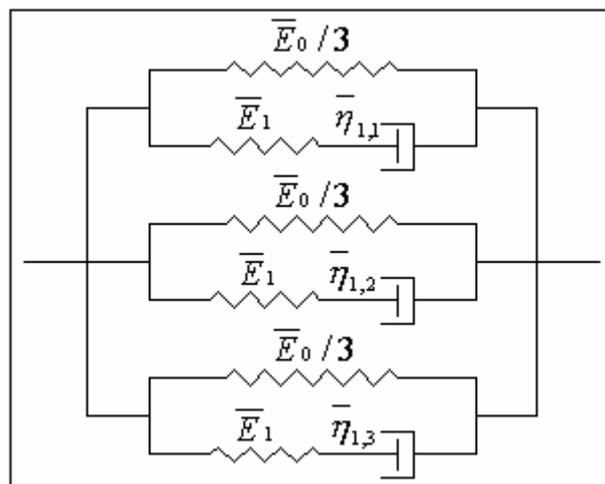


Bild 4-14: Darstellung der Maxwell-Gruppe mit linearen Standardkörpern

Der Anfangswert der Nachgiebigkeit der Maxwell-Gruppe  $E_0$  beträgt

$$E_0 = \bar{E}_0 + 3 * \bar{E}_1 \quad (4-49)$$

Der Endwert entspricht  $\bar{E}_0$ .

Die Relaxationsgleichung lautet

$$f(t) = \sum_{i=1}^3 f_i(t) = \sum_{i=1}^3 \frac{\bar{E}_0}{3} + \bar{E}_1 * e^{-t/\bar{\tau}_i} \quad (4-50)$$

Stehen der Anfangswert  $E_0$ , der Endwert  $\bar{E}_0$  und die Zeit  $\bar{\tau}_i$ , nach der 63% des Abbaus stattgefunden hat, zur Verfügung, so ergeben sich die übrigen Werte, die für die Relaxationsgleichung benötigt werden wie folgt:

$$E_1 = \frac{E_0 * \bar{E}_0}{E_0 - \bar{E}_0} \quad (4-51)$$

$$\bar{E}_1 = E_0 * \frac{E_0}{E_0 + E_1} \quad (4-52)$$

Der Wert der Dämpfung, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter benötigt wird, wird folgendermaßen berechnet:

$$\eta_{1,i} = \left( \frac{E_0 + E_1}{E_0} \right)^2 * \bar{\eta}_{1,i} \quad (4-53)$$

mit

$$\bar{\eta}_{1,i} = \bar{\tau}_{1,i} * \bar{E}_1 \quad (4-54)$$

In Bild 4-15 sind in einem zur qualitativen Veranschaulichung dienenden Beispiel die drei Relaxationsfunktionen der drei Standardkörper aus Bild 4-13 und Bild 4-14 und deren Summe in einem Diagramm dargestellt. Es wurden folgende Eingangswerte verwendet:

$$E_0 = 3,3$$

$$\bar{E}_0 = 1,0$$

$$\bar{\tau}_{1,1} = 1$$

$$\bar{\tau}_{1,2} = 9$$

$$\bar{\tau}_{1,3} = 60$$

Mit Gl. (4-51) und Gl. (4-52) werden die noch fehlenden Größen der Relaxationsgleichung Gl. (4-50) berechnet:

$$E_1 = 1,4$$

$$\bar{E}_1 = 2,3$$

Deutlich erkennt man die drei unterschiedlichen Relaxationsgeschwindigkeiten.

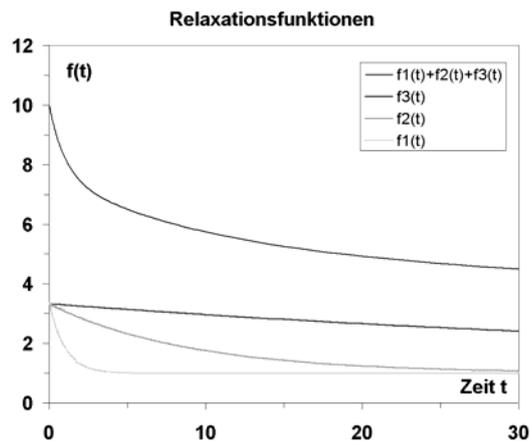


Bild 4-15: Relaxationsfunktionen

Mit diesen Grundlagen soll der zeitliche Verlauf der Setzungen beschrieben werden. Weitere Informationen zu Relaxationsfunktionen findet man zum Beispiel in [27].

#### 4.4 Torsionssteifigkeit

Offene und vollverschlossene Spiralseile sind aus gegenseitig geschlagenen Drahtlagen aufgebaut. Bei einer Zugbelastung des Seils stehen alle Drähte unter Zug. Ein Torsionsmoment am Seil kann durch die Normalkraftänderung der Drähte aufge-

nommen werden. Je nach Schlagwinkel werden die Drähte zusätzlich auf Zug belastet oder es wird eine vorhandene Zugkraft in den Drähten abgebaut. Die Reibung zwischen den Drähten wird bei dieser Betrachtung vernachlässigt. Der Torsionswiderstand des Kerndrahtes bleibt ebenfalls unberücksichtigt. Ziel dieser Betrachtung ist es, einen Torsionsschubmodul anzugeben, mit dem dann je nach statischem System Verdrehungen berechnet werden können.

Das Torsionsträgheitsmoment des Seilquerschnitts wird als das mit dem Füllfaktor multiplizierte Torsionsträgheitsmoment des Kreisquerschnitts definiert:

$$I_{z,T} = f_z * \pi * \frac{d_{z,N}^4}{32} \quad (4-55)$$

Für die Herleitung wird als statisches System (Bild 4-16) ein an beiden Enden torsionsfest gehaltenes mit der Zugkraft  $F_z$  belastetes Seil der Länge  $2 \cdot l_z$ , das in Seillängengenmitte mit einem Torsionsmoment  $M_z$  belastet wird, betrachtet. Das Torsionsmoment  $M_z$  ruft dort die Verdrehung  $\phi_z$  gegenüber den Festlagern hervor.

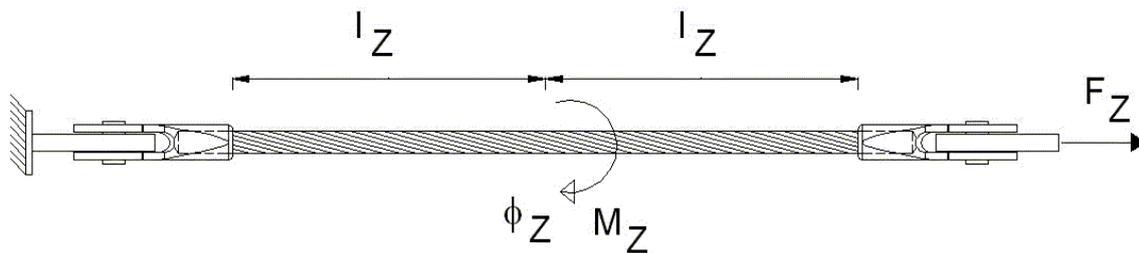


Bild 4-16: Statisches System für die Herleitung des Torsionsschubmoduls

In Bild 4-17 wird die abgewickelte Drahtlänge zwischen dem linken Auflager und dem Angriffspunkt des Torsionsmomentes vor und nach dem Verdrehen für einen durch die Verdrehung auf zusätzlichen Zug belasteten Draht der Drahtlage  $i$  dargestellt. Der Schlagwinkel  $\alpha_{D,Sch,i}$ , die Drahtlänge  $l_{D,i}$  und die auf den zugehörigen Umfangskreis projizierte Drahtlänge  $U_{D,i}$  vergrößern sich durch das Verdrehen, der Abstand  $l_z$  bleibt aber konstant.

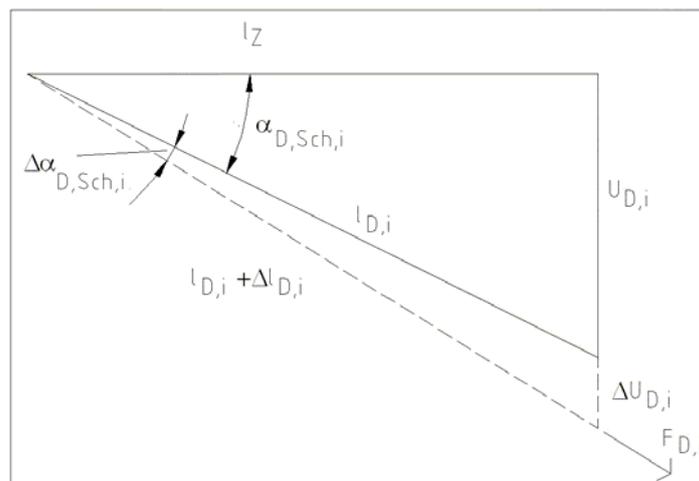


Bild 4-17: Abgewickelte Drahtlänge unter Torsionsbelastung

Die Ausgangslänge  $U_{D,i}$  beträgt

$$U_{D,i} = l_z * \tan \alpha_{D,Sch,i} \quad (4-56)$$

Die Verdrehung  $\phi_z$  bewirkt eine Vergrößerung um  $\Delta U_{D,i}$

$$\Delta U_{D,i} = a * \frac{1}{2} * d_{Z,M,i} * \sin \varphi_Z \quad (4-57)$$

wobei  $a=1$  gilt, wenn die Drahtlage durch die Torsion auf Zug belastet wird und  $a=-1$  gilt, wenn bei Torsion Zugbelastung abgebaut wird.

Die Ausgangsdrahtlänge beträgt

$$l_{D,i} = \sqrt{U_{D,i}^2 + l_Z^2} \quad (4-58)$$

Die Drahtlänge nach der Verdrehung beträgt

$$l_{D,i} + \Delta l_{D,i} = \sqrt{(U_{D,i} + \Delta U_{D,i})^2 + l_Z^2} \quad (4-59)$$

Der Schlagwinkel nach der Verdrehung beträgt

$$\alpha_{D,Sch,i} + \Delta \alpha_{D,Sch,i} = \arctan \frac{U_{D,i} + \Delta U_{D,i}}{l_Z} \quad (4-60)$$

Die aufgrund der Dehnung um  $\Delta l_{D,i}$  hervorgerufene zusätzliche Drahtspannung  $\sigma_{D,i}$  beträgt

$$\begin{aligned} \sigma_{D,i} &= E_D * \frac{(l_{D,i} + \Delta l_{D,i}) - l_{D,i}}{l_{D,i}} = E_D * \left( \frac{l_{D,i} + \Delta l_{D,i}}{l_{D,i}} - 1 \right) = \\ &= E_D * \left( \frac{\sqrt{(U_{D,i} + \Delta U_{D,i})^2 + l_Z^2}}{\sqrt{U_{D,i}^2 + l_Z^2}} - 1 \right) = \\ &= E_D * \left( \frac{\sqrt{\left( l_Z * \tan \alpha_{D,Sch,i} + a * \frac{1}{2} * d_{Z,M,i} * \sin \varphi_Z \right)^2 + l_Z^2}}{\sqrt{(l_Z * \tan \alpha_{D,Sch,i})^2 + l_Z^2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (4-61)$$

Das durch alle Drahtspannungen  $\sigma_{D,i}$  der Drahtlage  $i$  hervorgerufene Torsionsmoment um die Seillängsachse beträgt

$$M_{Z,i} = n_{D,i} * \sigma_{D,i} * \frac{\pi * d_{D,i}^2}{4} * \sin(\alpha_{D,Sch,i} + \Delta \alpha_{D,Sch,i}) * \frac{1}{2} * d_{Z,M,i} \quad (4-62)$$

Mit Gl. (4-56) bis Gl. (4-61) kann Gl. (4-62) folgendermaßen umgeformt werden

$$\begin{aligned} M_{Z,i} &= n_{D,i} * \sigma_{D,i} * \frac{\pi * d_{D,i}^2}{4} * \sin \left( \arctan \frac{U_{D,i} + \Delta U_{D,i}}{l_Z} \right) * \frac{1}{2} * d_{Z,M,i} = \\ &= n_{D,i} * \sigma_{D,i} * \frac{\pi * d_{D,i}^2}{4} * \sin \left( \arctan \frac{l_Z * \tan \alpha_{D,Sch,i} + \frac{a}{2} * d_{Z,M,i} * \sin \varphi_Z}{l_Z} \right) * \frac{d_{Z,M,i}}{2} = \\ &= \frac{n_{D,i} * \sigma_{D,i} * \pi * d_{D,i}^2 * d_{Z,M,i}}{8} * \sin \left( \arctan \frac{l_Z * \tan \alpha_{D,Sch,i} + \frac{a}{2} * d_{Z,M,i} * \sin \varphi_Z}{l_Z} \right) \end{aligned} \quad (4-63)$$

Zwischen der Verdrehung, dem Moment und dem Torsionsschubmodul besteht am statischen System definitionsgemäß folgender Zusammenhang

$$G_{Z,T} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{D,L}} |M_{Z,i}| * 0,5 * l_Z}{\varphi_Z * I_{Z,T}} \quad (4-64)$$

Für die Berechnung des Torsionsschubmoduls muss nun eine Seillänge und eine auf dieser Seillänge stattfindende Verdrehung angenommen werden, z.B. 1° auf der 10-fache Schlaglänge.

Ein Vergleich zwischen den durch die Torsion hervorgerufenen Drahtspannungsänderungen und den Drahtspannungen aus der Seilkraft gibt Aufschluss darüber, ob in einer Drahtlage die Drahtfestigkeit überschritten wird, was das Seilversagen zur Folge hat, oder ob in einer Drahtlage die Drahtzugkraft vollständig abgebaut wird, was ein Stauchen und damit Öffnen des Drahtverbundes zur Folge hat.

Die Drahtspannungen aus der Seilkraft berechnen sich nach [9] zu

$$\sigma_{D,i} = \frac{\cos^2 \alpha_{D,Sch,i}}{1 + \mu_D * \sin^2 \alpha_{D,SCH,i}} * F_Z \quad (4-65)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{D,L}} \left( \frac{n_{D,k} * \cos^3 \alpha_{D,Sch,k} * \pi * d_{D,k}^2}{1 + \mu_D * \sin^2 \alpha_{D,Sch,k} * 4} \right)$$

#### 4.5 Folgerungen

Zur Überprüfung der getroffenen Annahmen und der hergeleiteten Gleichungen werden die in Tabelle 4-1 aufgeführten und im folgenden näher erläuterten Bauteilversuche und Finite-Element-Berechnungen durchgeführt.

zu überprüfen	Gl.	Finite Elemente	Bauteilversuche
Verteilung der Seilpressung über den Umfang	(4-7)	X	
Verteilung der Seilpressung in Seillängsrichtung		X	
Normalspannungsverlauf im Seilklemmenscheitel		X	
Klemmkraftbeiwert	(4-15)	X	X
Randdehnung im Seilklemmenscheitel	(4-27) (4-29)	X	X
Kontaktwinkel $\gamma_{K,K}$		X	X
Seilpressungsverhältnis $f_K$	(4-1)	X	
Größe des Abfalls der Schraubenvorspannkraft durch Seilkrafterhöhung	(4-44)		X
Ursache des Abfalls der Schraubenvorspannkraft durch zeitliche Setzungen			X
Größe des Abfalls der Schraubenvorspannkraft durch zeitliche Setzungen			X
Reibbeiwert			X
Torsionsschubmodul	(4-64)		X

Tabelle 4-1: Überprüfung der getroffenen Annahmen und der hergeleiteten Gleichungen

Die getroffenen Annahmen, dass

- die Verteilung der Seilpressung in Gl. (4-7) rechtwinklig zur Seillängsrichtung kosinusförmig verteilt ist,
- die Seilpressung in Seillängsrichtung als konstant angenommen wird und

- 
- der durch die Schnittkräfte  $M_{K,1}$  und  $N_{K,1}$  hervorgerufene Normalspannungsverlauf im Seilklemmenscheitel linear ist, werden in Finite-Element-Berechnungen überprüft.
- Gl. (4-15) für den Klemmkraftbeiwert sowie Gl. (4-27) und Gl. (4-29) für die Dehnung auf dem Seilklemmenscheitel können in Bauteilversuchen und in Finite-Element-Berechnungen überprüft werden.
- Gl. (4-10) und Gl. (4-12) für die Seilpressung am Seilklemmenscheitel, Gl. (4-15) für den Klemmkraftbeiwert sowie Gl. (4-27) und Gl. (4-29) für die Dehnung auf dem Seilklemmenscheitel hängen von dem Kontaktwinkel  $\gamma_{K,K}$  und dem Seilpressungsverhältnis  $f_K$  ab. Der Kontaktwinkel  $\gamma_{K,K}$  kann in Bauteilversuchen und in Finite-Element-Berechnungen, das Seilpressungsverhältnis  $f_K$  in Finite-Element-Berechnungen untersucht werden.
- Gl. (4-44) für die Berechnung des Abfalls der Schraubenvorspannkraft bei einer Seilkrafterhöhung kann in Bauteilversuchen überprüft werden.
- Die Größe und der Verlauf der zeitlichen Setzungen können in Bauteilversuchen überprüft werden.
- Der Reibbeiwert wird aus einer gemeinsamen Betrachtung der Bauteilversuche und der Finite-Element-Berechnungen abgeleitet.
- Gl. (4-64) zur Berechnung des Torsionsschubmoduls kann in Bauteilversuchen überprüft werden.

## 5 Bauteilversuche

### 5.1 Überblick

Folgende Versuche wurden durchgeführt:

- Verschiebeversuche an offenen Spiralseilen (Abschnitt 5.4)  
Die Seilkraft, die Schraubenkräfte, die Dehnung am Seilklemmenscheitel, die Verschiebekraft und der Kontaktwinkel wurden gemessen.
- Setzungsversuche an offenen Spiralseilen (Abschnitt 5.5)  
Die Seilkraft, die Schraubenkräfte, die Dehnung am Seilklemmenscheitel und der Kontaktwinkel wurden gemessen.
- Setzungs- und Verschiebeversuche an vollverschlossenen Spiralseilen (Abschnitt 5.6)  
In den Versuchen an den vollverschlossenen Spiralseilen wurden die Setzungsversuche vor den Verschiebeversuchen im gleichen Versuchsaufbau durchgeführt.
- Untersuchungen an belasteten Drahtberührungsstellen zur Überprüfung der Ursache der Setzungen (Abschnitt 5.7)
- Torsionsversuche an offenen Spiralseilen (Abschnitt 5.8)  
Diese Versuche werden ohne die oben verwendeten Versuchsklemmen durchgeführt. Die Seilkraft, das Torsionsmoment und die Verdrehung des Seils wurden gemessen.

### 5.2 Versuchsmaterialien für die Versuche mit Seilklemmen

#### 5.2.1 Seile

Um grundlegende Mechanismen erkennen zu können, wurden bei der Auswahl der Versuchsmaterialien bewusst Einschränkungen vorgenommen. So wurden bei den offenen Spiralseilen die Konstruktion 1x37 und bei den vollverschlossenen Spiralseilen die Konstruktion VVS-2 untersucht. Daher wurde der Seilnennendurchmesser  $d_{z,N}$  variiert. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die in den Bauteilversuchen verwendeten Seile.

Seiltyp	Seilkonstruktion	$d_{z,N}$
Offenes Spiralseil	1x37 1.770 N/mm <sup>2</sup> verzinkt (zn)	12
		16
		20
		24
	28	
Offenes Spiralseil	1x19 1.570 N/mm <sup>2</sup> nichtrostend (niro)	12
Vollverschlossenes Spiralseil	VVS-2 1.570 / 1.618 N/mm <sup>2</sup> verzinkt (zn)	34
		42

Tabelle 5-1: In den Bauteilversuchen verwendete Seile

Die Seile wurden von der Fatzer AG, Brugg Seilbautechnik in Romanshorn (Schweiz) zur Verfügung gestellt. Alle offenen Spiralseile sind aus crapalverzinkten Runddrähten mit einer Normalverzinkung nach DIN 2078 [28] aufgebaut. Die vollverschlossenen Spiralseile sind aus crapalverzinkten Runddrähten mit einer Dickverzinkung nach

DIN 2078 [28] und Z-Profildrähten nach DIN 779 [29] mit einer Dickverzinkung nach DIN 2078 [28] aufgebaut. Die Crapalverzinkung besteht aus 95% Zink und 5% Aluminium. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass die beiden Normen DIN 779 [29] und DIN 2078 [28] im Jahr 2002 durch die Norm DIN EN 10264 [30] ersetzt wurden. Die mit diesem Ersatz verbundenen Änderungen des Normtextes haben auf diese Arbeit jedoch keinen Einfluss. Kenngrößen und Berechnungen zu den in den Bauteilversuchen verwendeten Seilen sind im Anhang in Abschnitt 12.1 aufgeführt.

### 5.2.2 Seilklemmen

Die untersuchten Seilklemmen sind aus dem Baustahl S355JRG2 hergestellt. Es wurde die in Bild 5-1 dargestellte Form gewählt.



Bild 5-1: Versuchsklemme in zwei Ansichten

Um die Seilklemmen mehrfach zu nutzen und den Einfluss unterschiedlicher Rauigkeiten der Seilklemmennut dennoch auszuschließen, wurden die Seilklemmen blank hergestellt und vor jedem Versuch in einer Strahlanlage des Herstellers MHG Strahlanlagen GmbH gestrahlt. Das Strahlgut ist ein Mischkorund des Typs 036 mit Korngrößen zwischen 420 und 595  $\mu\text{m}$ . Der Strahlruck war auf 5 bar eingestellt. Dies ergab Rauigkeitswerte von

$$R_a = 2,3 \text{ bis } 3,6$$

$$R_m = 14 \text{ bis } 22$$

Bis auf die Scheiteldicke und den Radius der Seilklemmennut besitzen alle Seilklemmen die gleichen Größenverhältnisse bezogen auf den Seildurchmesser. Der Radius der Seilklemmennut wurde so variiert, dass einige Seilklemmen exakt auf das Seil passen und andere um bis zu 7% zu groß sind. Dies ist eine realistische Größenordnung, da Seile gemäß DIN 3054 [32] in ihren Durchmessern bis zu 4% vom Nenndurchmesser abweichen dürfen. Die Klemmung erfolgte mit Sechskantschrauben mit Schaft nach DIN EN 24014 [31] in der Festigkeitsklasse 8.8. Eine Übersicht über die Versuchsklemmen und über die Schrauben ist im Anhang in Abschnitt 0 dargestellt.

## 5.3 Messgrößen und Messtechnik

### 5.3.1 Überblick

In den Versuchen wurden folgende Messdaten erfasst:

- Schraubenkräfte
- Dehnung auf dem Seilklemmenscheitel
- Kontaktwinkel zwischen Seil und Seilklemme
- Seilkraft
- Verschiebekraft

- Verschiebeweg

### 5.3.2 Schraubenkräfte

Es gibt vier Möglichkeiten, Schraubenkräfte zu messen:

- Die Schraubenkraft kann mit einer auf den Schraubenschaft aufgefädelten Kraftmessdose gemessen werden. Dies verändert jedoch die Dehnlänge der Schrauben. Der Herstellungsaufwand ist groß.
- Mit einem Ultraschallmessgerät kann die Länge der Schrauben und deren Veränderung ermittelt werden, von der dann auf die Schraubenkraft geschlossen werden kann. Diese Methode ist die ungenaueste. Sie kann im Normalfall punktuell angesetzt werden, jedoch nicht bei kontinuierlicher Messung und Messdatenaufzeichnung.
- Die Schraubenkraft kann mit Hilfe der Dehnungsmessung durch am Schaft der Schraube angebrachte Dehnmessstreifen ermittelt werden. Die Dehnmessstreifen sind anfällig gegen Verletzungen durch mechanische Beanspruchung. Um Biegeeffekte zu berücksichtigen, müssen mindestens drei Dehnmessstreifen über den Umfang verteilt werden, was zu einem erhöhten Aufwand führt.
- Die Schraubenkraft kann mit Hilfe der Dehnungsmessung durch einen in einer zentrischen Bohrung der Schraube liegenden Bolzendehnmessstreifen ermittelt werden. Dies hat den Vorteil, dass der Dehnmessstreifen geschützt ist und ein Dehnmessstreifen ausreicht. Aufgrund der zentrischen Lage des Bolzendehnmessstreifens werden die Dehnungen aus Normalkraftbeanspruchung ohne Biegeeffekte gemessen.

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde die zuletzt aufgeführte Methode gewählt. Ausschlaggebend hierfür war, dass der Bolzendehnmessstreifen geschützt ist, da die Schrauben mehrfach verwendet werden sollten sowie die relativ einfache Herstellung.

Die verwendeten Schrauben wurden mit Bolzendehnmessstreifen BTM-1C und BTM-6C von Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. gemäß Bild 5-2 versehen.

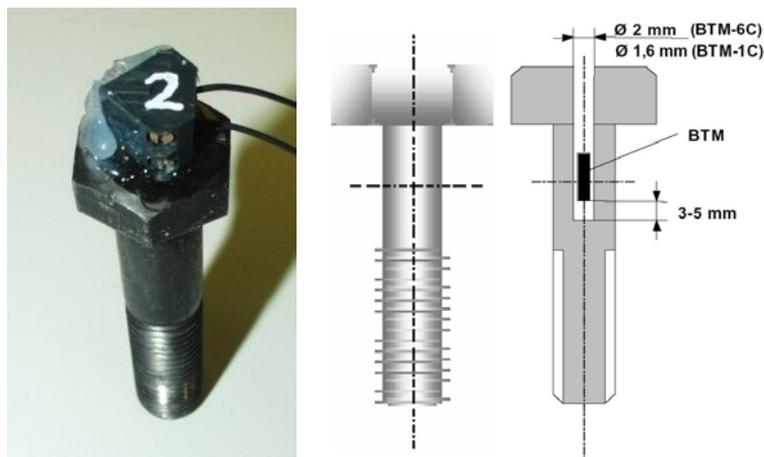


Bild 5-2: Bolzendehnmessstreifen in einer Schraube

Entsprechend den Empfehlungen von Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. wurden für die Schrauben M8 Bolzendehnmessstreifen BTM-1C, für alle anderen Schrauben BTM-6C verwendet.

Zur Applikation eines Bolzendehnmessstreifens BTM-6C wird wie in Bild 5-2 dargestellt ein Loch von 2 mm Durchmesser durch den Bolzenkopf bis in den Schaft gebohrt und mit einem Spezialklebstoff gefüllt. Anschließend wird der Bolzendehnmessstreifen eingesetzt. Nach dem Aushärten des Klebstoffs kann die Schraube kalibriert und mit Messungen begonnen werden.

### 5.3.3 Dehnung auf dem Seilklemmenscheitel

Alle Seilklemmen wurden auf der Außenseite in der Mitte des Seilklemmenscheitels mit einem rechtwinklig zur Seillängsachse liegenden Dehnmessstreifen versehen. In einem Vorversuch wurden fünf Dehnmessstreifen entlang des Seilverlaufs vorgesehen. Die Ergebnisse dieser Messung, wie auch die Finite-Element-Berechnungen aus Kapitel 6 haben gezeigt, dass die Dehnungen in der Mitte auch dann repräsentativ für den Belastungszustand der Seilklemmen sind, wenn die Schrauben, wie in den Versuchen stets der Fall, etwas unterschiedliche Kräfte aufweisen.



Bild 5-3: Seilklemmenschalen mit Dehnmessstreifen

### 5.3.4 Kontaktwinkel zwischen Seil und Seilklemme

In den korundgestrahlten Seilklemmennuten hat sich die äußerste Drahtlage der Spirseile in der Seilklemmennut durch einen Abdruck abgezeichnet, der durch das Verschieben der Seilklemme noch ausgeprägter wurde. Nach den Verschiebeversuchen wurde der maximale Kontaktwinkel durch die Grenzen dieses Abdrucks bestimmt. Der Kontaktwinkel beträgt im Seilklemmenscheitel  $0^\circ$  und im Seilklemmengrund etwa  $75^\circ$  (vgl.  $\gamma_{K,K}$  in Bild 4-1 bis Bild 4-4). Der Kontaktwinkel wurde teilweise direkt nach dem Versuch mit einer Schablone und teilweise über den Vergleich von Photos bestimmt. Hierfür wurden in eine Seilklemmennut in einem regelmäßigen Abstand Linien gezeichnet. Dieses Photo wurde mit dem Photo des Abdrucks verglichen und somit der Kontaktwinkel bestimmt.

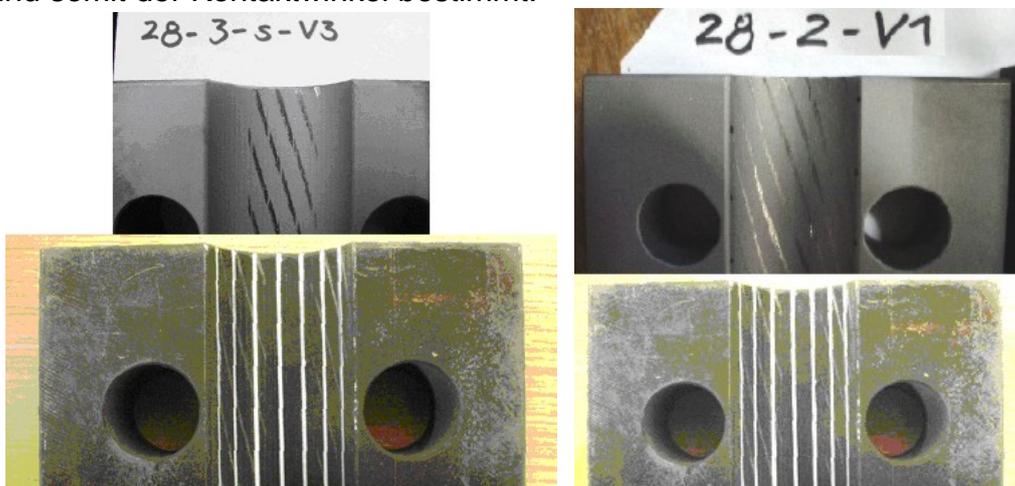


Bild 5-4: Bestimmung des Kontaktwinkels

Der abgelesene Kontaktwinkel wird der Querpressung zugeordnet, bei der die Seilklemme verschoben wurde, da hierbei die deutlichsten Abdrücke auftreten. Die Able-

segenauigkeit ist begrenzt und kann in ungünstigen Fällen  $\pm 5^\circ$  betragen. Der gemessene Kontaktwinkel stellt somit lediglich eine grobe Abschätzung dar.

### 5.3.5 Seilkraft

Die Seilkraft wurde als Signal an der Prüfmaschine abgegriffen.

### 5.3.6 Verschiebekraft

Die seilparallele Verschiebekraft wurde mit Hydraulikzylindern des Herstellers Lukas aufgebracht und mit 500 kN Kraftmessdosen des Herstellers HBM gemessen. Die Hydraulikzylinder wurde bei Verschiebekräften bis 400 kN mit einer Handpumpe betrieben und bei größeren Verschiebekräften mit einem Hydraulikaggregat.

### 5.3.7 Verschiebeweg

Der Verschiebeweg wurde mit zwei Wegaufnehmern TS 20 des Herstellers HBM gemessen.

### 5.3.8 Messanlage

Bis auf die Winkel der Abdrücke in der Seilklemmennut, die „von Hand“ gemessen wurden, wurden die restlichen Messdaten von einer Messanlage UPM 100 des Herstellers Losenhausen (Bild 5-5) erfasst und gespeichert.



Bild 5-5: Messanlage

## 5.4 Verschiebeversuche an den offenen Spiralseilen

### 5.4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist anhand eines Versuchs an einem offenen Spiralseil des Durchmessers 20 mm in Bild 5-6 als Photo im Ganzen und im Detail gezeigt. Die Versuche wurden in einer 3000 kN Zugprüfmaschine des Herstellers Mannheimer Maschinenfabrik MFL durchgeführt.



Bild 5-6: Versuchsaufbau und Detail der Verschiebversuche an den offenen Spiralseilen

Das Seil ist oben am in Bild 5-6 nicht sichtbaren Querhaupt und unten am beweglichen Kolben der Maschine verankert. Auf der Verankerungsvorrichtung ist der Hydraulikzylinder aufgestellt, darauf steht die Kraftmessdose, dann folgen zwei Distanzstücke, eine Kalotte und abschließend eine Platte, auf der die Seilklemme steht. Über der Seilklemme sind zwei Wegaufnehmer angebracht, die mit ihren Messspitzen auf der sich unter der Seilklemme befindenden Platte aufstehen.

#### 5.4.2 Versuchsdurchführung

Zunächst wurde die Seilkraft über die Prüfmaschine eingestellt und während des gesamten Versuchablaufs in Kraftregelung konstant gehalten. Dann wurden die Schrauben der Seilklemme so angezogen, dass die gewünschte Klemmkraft möglichst gleichmäßig auf die Schrauben verteilt war. Anschließend wurden etwa fünf Minuten lang Setzungen abgewartet. Wenn die Klemmkraft unter den gewünschten Wert fiel, wurden die Schrauben nachgezogen und erneut Setzungen abgewartet. Dann wurde die Verschiebekraft über den Hydraulikzylinder aufgebracht. Hierbei wurde darauf geachtet, dass der Anstieg der durch den Hydraulikzylinder in die Seilklemme eingeleiteten Kraft pro 10 Sekunden nicht größer als 10% des erwarteten Endwerts war. In Bild 5-7 ist das Versuchsprinzip und der daraus resultierende Kraftfluss dargestellt. Aus diesem Bild ist ersichtlich, dass die Seilkraft im oberen Seilabschnitt konstant bleibt. Im unteren Seilabschnitt addiert sich die in die Seilklemme eingeleitete Kraft zur anfänglichen Seilkraft hinzu. Der mit den beiden Wegaufnehmern gemessene Weg enthält demnach keine Dehnung des Seils im über der Seilklemme liegenden Seilabschnitt.

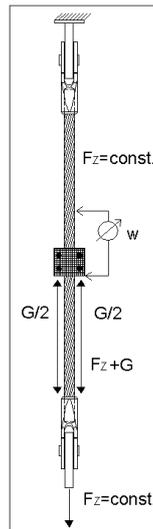


Bild 5-7: Kraftfluss in den Verschiebeversuchen an den offenen Spiralseilen

Alle untersuchten Seile sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

OSS 12 1x37 zn
OSS 16 1x37 zn
OSS 20 1x37 zn
OSS 24 1x37 zn
OSS 28 1x37 zn

Tabelle 5-2: Seile für die Verschiebeversuche an den offenen Spiralseilen

## 5.5 Setzungsversuche an den offenen Spiralseilen

Versuche zur Ermittlung der zeitlichen Setzungen innerhalb der ersten 30 Minuten und der Setzungen aus einer Seilkrafterhöhung wurden in einer 3000 kN Zugprüfmaschine des Herstellers Mannheimer Maschinenfabrik MFL durchgeführt. Mit dieser Prüfmaschine wurde das Seil mit der vorgesehenen Last belastet. Anschließend wurde eine Seilklemme mit der vorgesehenen Vorspannkraft der Schrauben montiert. Nachdem eine halbe Stunde Setzungen abgewartet wurden, wurden die Schrauben auf den Ausgangswert ihrer Kraft nachgezogen. Es folgten eine weitere halbe Stunde Setzungszeit, ein weiteres Nachziehen der Schrauben und eine weitere halbe Stunde Setzungszeit. Abschließend wurde die Seilkraft dreimal erhöht und wieder auf den Ausgangswert zurückgestellt, um den Einfluss auf die Schraubenkräfte zu ermitteln. Versuche zur Ermittlung der zeitlichen Setzungen über den Zeitraum von mehreren Wochen wurden an unbelasteten, abgebundenen Seilstücken durchgeführt. Aus von mir durchgeführten Bauteilversuchen war bekannt, dass sich die Setzungen über einen so langen Zeitraum hinziehen können.

## 5.6 Setzungs- und Verschiebeversuche an den vollverschlossenen Spiralseilen

### 5.6.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist anhand eines Versuchs an einem vollverschlossenen Spiralseil des Durchmessers 34 mm als Photo im Ganzen (Bild 5-8) und in zwei Details (Bild 5-9) gezeigt. Die Versuche wurden in einer 5000 kN Zugprüfmaschine des Herstellers Mannheimer Maschinenfabrik MFL durchgeführt.



Bild 5-8: Versuchsaufbau der Setzungs- und Verschiebeversuche an den vollverschlossenen Spiralseilen

Das Seil ist am in Bild 5-8 unten sichtbaren Querhaupt und am in Bild 5-8 oben sichtbaren beweglichen Kolben der Maschine verankert.

Zwei Details des Versuchsaufbaus sind in Bild 5-9 abgebildet. Allerdings sind die Perspektiven aus der die beiden Photos aufgenommen wurden im Gegensatz zu Bild 5-8 um 90° gedreht.

Kalotte Kraftmessdose Hydraulikzylinder

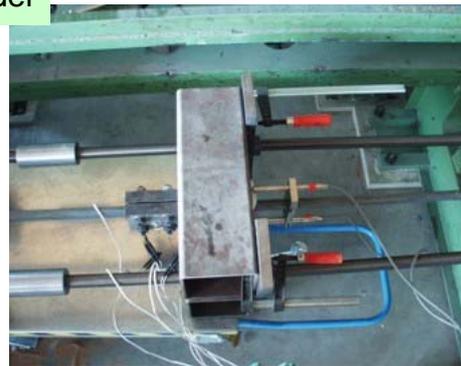
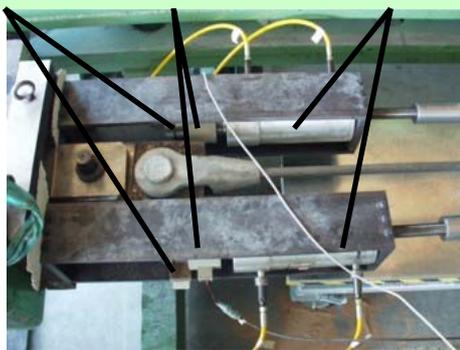


Bild 5-9: Details des Versuchsaufbaus der Setzungs- und Verschiebeversuche an den vollverschlossenen Spiralseilen

Das im Bild 5-9 links dargestellte Detail befindet sich in Bild 5-8 unten. Es zeigt zwei am Querhaupt befestigte Rahmen, in denen jeweils ein Hydraulikzylinder, eine Kraftmessdose und eine Kalotte platziert wurden. Diese drei Komponenten sind hohl, werden von je einer Gewindestange M42 8.8 durchlaufen und hinter der Kalotte mit einer Mutter verankert. Die beiden Gewindestangen wurden mit dem im Bild 5-9 rechts dargestellten Detail, welches sich in Bild 5-8 in der Mitte befindet, verbunden, indem sie zwischen den beiden rechts der Seilklemme platzierten Rechteckhohlprofilen hindurchgeführt und auf der der Seilklemme abgewandten Seite mit einer Mutter verankert wurden. Die beiden Rechteckhohlprofile dienen zur Lasteinleitung in die Seilklemme. Beim Herausdrücken der Hydraulikzylinder werden die Gewindestangen auf Zug belastet, der über die beiden Rechteckhohlprofile als seilparallele Verschiebekraft in die auf das Seil montierte Seilklemme eingeleitet wird. Auf der der Seilklemme abgewandten Seite der Rechteckhohlprofile wird deren Verschiebung mit zwei Wegaufnehmern gemessen. Das Versuchsprinzip ist in Bild 5-10 dargestellt.

### 5.6.2 Versuchsdurchführung

Die zeitlichen Setzungen innerhalb der ersten 30 Minuten, die Setzungen aufgrund von Seilkraftänderungen und die Verschiebekraft wurden jeweils in einem Versuchsablauf ermittelt.

Die Versuche wurden analog zum in Abschnitt 5.5 beschriebenen Ablauf durchgeführt. Anschließend wurde die Verschiebekraft analog zum in Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Ablauf ermittelt. Zusätzlich musste darauf geachtet werden, dass die Verschiebekraft gleichmäßig über die beiden Gewindestangen eingeleitet wird. Aufgrund des unterschiedlichen Versuchsaufbaus weicht der Kraftfluss von der Darstellung in Bild 5-7 ab. In Bild 5-10 ist der für die Verschiebeversuche an den vollverschlossenen Spiralseilen gültige Kraftfluss dargestellt.

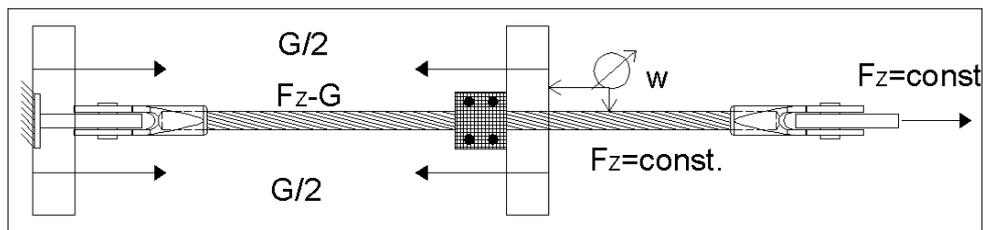


Bild 5-10: Kraftfluss in den Verschiebeversuchen an den vollverschlossenen Spiralseilen

Aus diesem Bild ist ersichtlich, dass die Seilkraft im rechten Seilabschnitt konstant bleibt. Im linken Seilabschnitt reduziert die in die Seilklemme eingeleitete Kraft die anfängliche Seilkraft. Der mit den beiden Wegaufnehmern gemessene Weg enthält demnach keine Dehnung des Seils im rechts der Seilklemme liegenden Seilabschnittes.

### 5.7 Untersuchungen an belasteten Drahtberührungsstellen

Bei Lasten, die weniger als 10% der Bruchlast betragen, weisen Seile ein ausgeprägtes nichtlineares Last-Verformungsverhalten auf. Man spricht im Allgemeinen davon, dass sich das Seil setzt. Dies liegt vor allem an ungleichen Drahtlängen und Schlagwinkeln sowie an Unregelmäßigkeiten der Verseilung. Aber auch bei einer Klemmung an einem im Gebrauchslastbereich belasteten Seil treten Setzungen auf. Zur Überprüfung der Annahme, dass diese Setzungen aus den im Seil vorliegenden Berührungspunkten der verzinkten Drähte herrührt, wurden Versuche durchgeführt. Die in Tabelle 5-3 aufgeführten Drähte standen hierfür zur Verfügung.

	Nennfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		Durchmesser [mm]		Zinkschichtdicke [g/m <sup>2</sup> ]		Zinkschichtdicke [μm]	
	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist
blanker Draht	1.770	1.840	3,47	3,48	0	0	0	0
mit reinem Zink verzinkter Draht	1.770	1.851	3,50	3,49	120	236	17	33
crapalverzinkter Draht	1.770	1.830	3,55	3,54	135	180	19	25

Tabelle 5-3: Drähte zur Untersuchung der Drahtberührungsstellen

Der Versuchsaufbau ist in Bild 5-11 dargestellt. Bild 5-12 und Bild 5-13 zeigen Details. In einen Vollmetallblock wurden Schlitze mit einer Breite von 4 mm eingebracht. Die Schlitze dienen zur Stabilisierung der abwechselnd in die zwei rechtwinklig zueinander stehenden Richtungen gelegten Drähte. In beide Richtungen wurden 10 Drähte übereinander gelegt. In Bild 5-12 ist der Abschluss mit dem obersten Draht zu sehen. Die Bohrungen zur Führung der Druckstempel sind 15 mm tief. In Bild 5-13 ist die Druckplatte mit den vier Stempeln abgebildet. Mit einer in das in Bild 5-13 in der

Mitte sichtbare Gewindefackloch eingeschraubten Messschraube wurden die Drahtberührungspunkte über die Druckplatte belastet.



Bild 5-11: Versuchsaufbau mit Drahtberührungspunkten



Bild 5-12: Detail der Drahtberührungspunkte



Bild 5-13: Druckplatte im Versuchsaufbau mit Drahtberührungspunkten

Um ein Kriechen der Versuchseinrichtung zu erfassen, wurde auch ein Versuch ohne eingelegte Drähte durchgeführt. Hierbei drückten die Stempel direkt auf das Ende der Bohrungen zur Führung der Druckstempel.

Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Lastniveaus durchgeführt. Die Messschraube wurde insgesamt dreimal angezogen. Zwischen jedem Anziehen wurden in einer 30-minütigen Wartezeit Setzungen abgewartet. Die tatsächliche gegenseitige radiale Beanspruchung der Drahtlagen eines Seils lässt sich aufgrund des komplexen Seilaufbaus, der ungleichmäßigen Verteilung der Belastung über den Umfang und der gleichzeitigen Lastübertragung in und zwischen den Drahtlagen nur schwer abschätzen. Zur Ermittlung einer Größenordnung wird die Querverpressung je Millimeter Seillänge auf die Drahtberührungspunkte zwischen den Drahtlagen je Millimeter Seil-

länge aufgeteilt. Mit Hilfe von Bild 5-14 kann die Anzahl der Drahtberührungspunkte je Millimeter Seillänge zwischen der Lage i und der Lage i+1 berechnet werden.

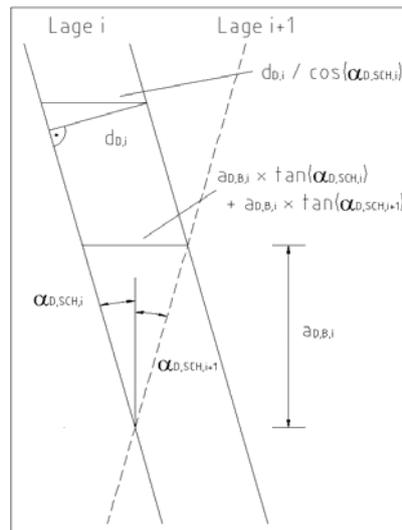


Bild 5-14: Abstand der Drahtberührungspunkte

Der Abstand der Berührungspunkte zweier benachbarter Drähte der Drahtlage i+1 mit einem Draht der Drahtlage i beträgt

$$a_{D,B,i} = \frac{d_{D,i}}{\cos \alpha_{D,Sch,i} \cdot (\tan \alpha_{D,Sch,i} + \tan \alpha_{D,Sch,i+1})} \quad (5-1)$$

Die Anzahl der Drahtberührungspunkte je Millimeter Seillänge zwischen den Lagen i und i+1 betragen

$$n_{D,B,i} = n_{D,i} * \frac{\cos \alpha_{D,Sch,i} \cdot (\tan \alpha_{D,Sch,i} + \tan \alpha_{D,Sch,i+1})}{d_{D,i}} \quad (5-2)$$

Eine Querpressung, die als Kesseldruck angenommen wird, kann mit Gl. (5-3) in eine resultierende Belastung der Drahtberührungspunkte umgerechnet werden.

$$F_{D,B,i} = \frac{q_K * \pi * d_{Z,M,i+1}}{n_{D,B,i}} \quad (5-3)$$

Zwischen der zweiten und der dritten Drahtlage und zwischen der dritten und der vierten Drahtlage ergeben sich jeweils die gleichen Werte. Warum dies der Fall ist, erkennt man, wenn man Gl. (5-2) in Gl. (5-3) einsetzt.

$$\begin{aligned} F_{D,B,i} &= \frac{q_K * \pi * d_{Z,M,i+1}}{n_{D,i} * \frac{\cos \alpha_{D,Sch,i} \cdot (\tan \alpha_{D,Sch,i} + \tan \alpha_{D,Sch,i+1})}{d_{D,i}}} = \\ &= \frac{q_K * \pi * d_{D,i}}{\cos \alpha_{D,Sch,i} \cdot (\tan \alpha_{D,Sch,i} + \tan \alpha_{D,Sch,i+1})} * \frac{d_{Z,M,i+1}}{n_{D,i}} \end{aligned} \quad (5-4)$$

Der erste Bruch in Gl. (5-4) bleibt in der Regel von Lage zu Lage unverändert, da der Drahtdurchmesser und der Schlagwinkel gleich groß sind. Da der Mittelpunktsdurchmesser der Drahtlagen  $d_{Z,M,i}$  und die Anzahl der Drähte je Drahtlage  $n_{D,i}$  in etwa gleich stark anwachsen, verändert sich die resultierende Belastung der Drahtberührungspunkte nicht wesentlich.

Für das offene Spiralseil des Durchmessers 12 mm beträgt die resultierende Belastung der Drahtberührungspunkte bei einer Querpressung von 40 N/mm<sup>2</sup> 244 N und für das offene Spiralseil des Durchmessers 28 mm 1.363 N. Für die Versuche wur-

den die Kräfte 2,5 kN, 5,0 kN und 10 kN gewählt, die sich jeweils auf die vier Drahtberührungen aufteilen.

## 5.8 Torsionsversuche an den offenen Spiralseilen

### 5.8.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Am 18.03.2003 nahm ich bei der Firma Fatzer AG, Brugg Seilbautechnik in Birr (Schweiz) an einem Torsionsversuch an einem offenen Spiralseil der Konstruktion 1x61 teil. Das Seil war aus normalverzinkten Drähten nach DIN 2078 aufgebaut. Die Verzinkung war eine Crapalbeschichtung, die aus 95% Zink und 5% Aluminium besteht. Kenngrößen und Berechnungen zum Seil sind im Anhang in Abschnitt 12.1.1 aufgeführt. Die Kenntnisse über das Torsionsverhalten wurden für einen Montagelastfall benötigt.



Bild 5-15: Versuchsaufbau Torsionsversuch bei der Fatzer AG, Brugg Seilbautechnik

Mit einer Seilklemme wurde ein Profil quer zur Seillängsrichtung am Seil befestigt. An diesem Profil konnten Gewichte auf einen Dorn aufgelegt werden. Zur Ermittlung der Verdrehung wurden die Höhen der Profilen über dem Boden gemessen. Die Verdrehung des Profils wurde für jede Belastung in einer CAD-Zeichnung gezeichnet. Diesen Zeichnungen konnten der zugehörige Verdrehwinkel und der zugehörige Hebelarm der Last entnommen werden. Die freie Seillänge betrug 18,1 m. Die Torsionsbelastung wurden bei unterschiedlichen Seilzugkräften und an unterschiedlichen Stellen entlang der Seillänge aufgebracht.

	Seillänge zu Endverbindung 1 $l_1$ [mm]	Seillänge zu Endverbindung 2 $l_2$ [mm]
Stelle 1	1.285	16.815
Stelle 2	5.285	12.815
Stelle 3	9.285	8.815

Tabelle 5-4: Seillängen im Torsionsversuch bei der Fatzer AG, Brugg Seilbautechnik

Nachdem sich aus diesen Versuchen herausgestellt hatte, dass die Seilkraft und die Messstelle keinen Einfluss auf das Torsionsverhalten haben wurden weitere Versuche zur Bestätigung des in Abschnitt 4.4 hergeleiteten Ausdrucks für die Torsionssteifigkeit durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist anhand eines Versuchs an einem offenen Spiralseil des Durchmessers 28 mm in Bild 5-16 als Photo gezeigt.



Bild 5-16: Versuchsaufbau der Torsionsversuche

Abgesehen davon, dass die Gewichte an das Profil gehängt wurden, ist das Versuchsprinzip unverändert übernommen worden. Das Torsionsmoment wurde jedoch stets in Seillängenmitte aufgebracht.

Alle untersuchten Seile sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

OSS 12 1x37 zn
OSS 28 1x37 zn
OSS 36 1x61 zn
OSS 12 1x19 niro

Tabelle 5-5: Seile für die Torsionsversuche

Bei den beiden offenen Spiralseile der Durchmesser 12 und 28 mm aus unlegiertem Stahl handelt es sich um die Seile, an denen auch die Setzungs- und Verschieberversuche durchgeführt wurden. Kenngrößen und Berechnungen zu den Seilen sind im Anhang in Abschnitt 12.1 aufgeführt.

## 6 Berechnungen mit der Methode der Finiten Elementen

### 6.1 Berechnungsprogramm, Rechenannahmen und Elemente

Die Finite-Element-Berechnungen wurden mit dem Programm Ansys in der Version 7.1 durchgeführt.

Es wurde der Vorgang der Klemmung modelliert. Aus Symmetriegründen ist es ausreichend, ein Viertel einer Seilklemmenschale und den zugehörigen Seilabschnitt abzubilden (Bild 6-1).

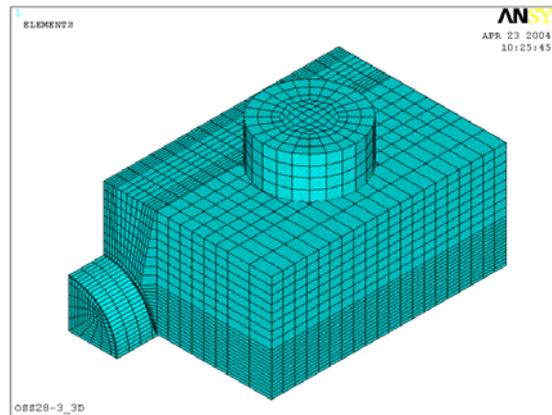


Bild 6-1: Finite-Element-Modell

Das Seil, die Seilklemme und die Schraube wurden mit dem Element SOLID95 (Bild 6-2) abgebildet. Es ist ein Volumenelement mit Zwischenknoten auf den Kanten. Insgesamt umfasst es 20 Knoten, von denen 8 Eckknoten und 12 Zwischenknoten sind. Dieses Element ist gut geeignet, um gekrümmte Oberflächen abzubilden.

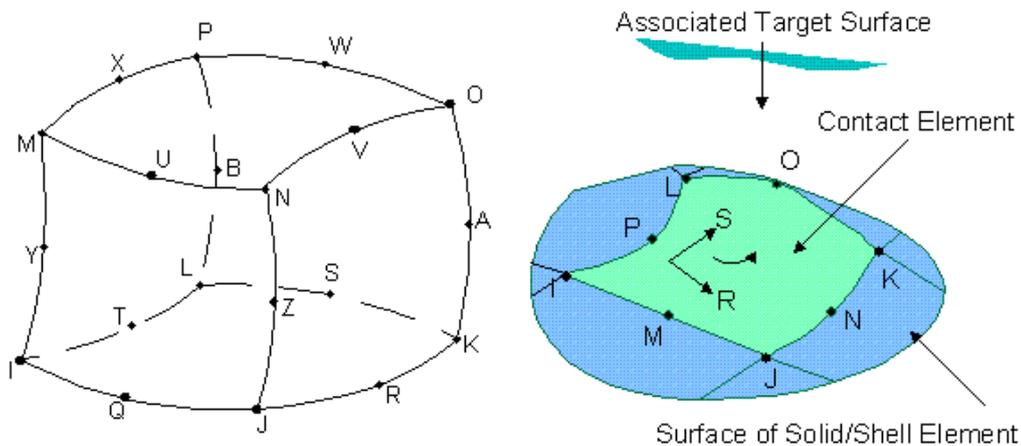


Bild 6-2: SOLID95 und CONTACT174

Der Kontakt zwischen dem Seil und der Seilklemme und der Kontakt zwischen dem Schraubenkopf und der Seilklemme wurde mit den Elementen TARGE170 und CONTACT174 (Bild 6-2) modelliert. Diese Elemente sind sogenannte surface-to-surface Kontaktelemente. Beide Elemente sind Flächenelemente mit 4 Eckknoten und 4 Zwischenknoten. Sie können auf eine aus Volumenelementen aufgebaute Volumenoberfläche gelegt werden. Oberflächen, die mit CONTACT174 Elementen vernetzt sind, können Oberflächen, die mit TARGE170 Elementen vernetzt sind, zugeordnet werden. Bei einer Durchdringung dieser einander zugeordneten Oberflächen werden Kontaktkräfte aufgebaut, die diese Durchdringung minimieren. Die Finite-Element-Berechnung von Kontaktproblemen führt auf Extremalprobleme mit Nebenbedingun-

gen in Ungleichheitsform. Diese werden vom Berechnungsprogramm mit dem Augmented-Lagrange-Verfahren, einer Kombination aus Lagrange-Multiplikatoren-Methode und Penalty-Verfahren gelöst.

## 6.2 Modellierung der Seile

### 6.2.1 Transversale Orthotropie

Das Seil wird als homogener, zylindrischer Volumenkörper betrachtet. Der Seilaufbau in den einzelnen Drahtlagen wird lediglich phänomenologisch erfasst. Ein geläufiger phänomenologischer Materialkennwert für Seile ist der Verformungsmodul. Er sagt aus, dass ein Stab, dessen Querschnitt dem metallischen Querschnitt des Seils und dessen E-Modul dem Verformungsmodul des Seils entsprechen, das gleiche Verformungsverhalten in Seillängsrichtung besitzt wie das Seil.

Die Materialeigenschaften der Seile sind über den Seilumfang in radialer und tangentialer Richtung sowie in Seillängsrichtung konstant. Demnach handelt es sich um eine transversale Orthotropie in zylindrischen Koordinaten, die von Lechnitzky in [19] beschrieben wird. Das zylindrische Koordinatensystem wird in Bild 6-3 für den homogenen Seilkörper mit den Koordinaten  $r$ ,  $\theta$  und  $z$  dargestellt.

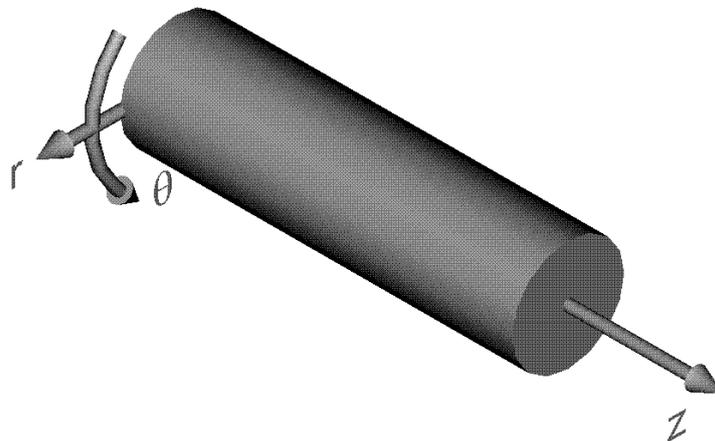


Bild 6-3: Zylindrisches Koordinatensystem

Bei den Querkontraktionszahlen bezeichnet der erste Index die Richtung der Querdehnung und der zweite Index die Richtung der Spannung, die diese Querdehnung hervorruft. Bei den Schubspannungen, Gleitungen und Schubmodulen bezeichnen die Indizes die Ebene, in der sie wirken. Die Indizes der Elastizitätsmodule, der Normalspannung und der Dehnung bezeichnen die Richtungen, in der diese Größen gemäß dem Hookschen Gesetz verknüpft sind.

Das Hooksche Gesetz lautet im zylindrischen Koordinatensystem bei transversaler Orthotropie

$$\varepsilon = \frac{1}{E} * \sigma$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{\theta z} \\ \gamma_{rz} \\ \gamma_{r\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{\theta z} \\ \tau_{rz} \\ \tau_{r\theta} \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

mit

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \frac{1}{E_r} & a_{44} &= \frac{1}{G_{\theta z}} & a_{12} &= -\frac{\mu_{r\theta}}{E_\theta} = a_{21} = -\frac{\mu_{\theta r}}{E_r} \\
a_{22} &= \frac{1}{E_\theta} & a_{55} &= \frac{1}{G_{rz}} & a_{13} &= -\frac{\mu_{rz}}{E_z} = a_{31} = -\frac{\mu_{zr}}{E_r} \\
a_{33} &= \frac{1}{E_z} & a_{66} &= \frac{1}{G_{r\theta}} & a_{23} &= -\frac{\mu_{\theta z}}{E_z} = a_{32} = -\frac{\mu_{z\theta}}{E_\theta}
\end{aligned} \tag{6-2}$$

Damit sich ein Körper unter allseitigem Druck nicht ausdehnt, muss die Kompressionszahl  $S$  einen positiven Wert annehmen:

$$\begin{aligned}
S &= a_{11} + a_{22} + a_{33} + 2 * (a_{12} + a_{13} + a_{23}) = \\
&= \frac{1}{E_r} + \frac{1}{E_\theta} + \frac{1}{E_z} - 2 * \left( \frac{\mu_{r\theta}}{E_\theta} + \frac{\mu_{rz}}{E_z} + \frac{\mu_{\theta z}}{E_z} \right) > 0
\end{aligned} \tag{6-3}$$

Die Kompressionszahl  $S$  lässt sich in die Volumenänderungszahlen  $S_r$ ,  $S_\theta$  und  $S_z$  der Einzelrichtungen aufteilen. Diese müssen nicht unbedingt für sich ebenfalls einen positiven Wert annehmen:

$$\begin{aligned}
S &= S_r + S_\theta + S_z \\
S_r &= a_{11} + a_{12} + a_{13} = \frac{1}{E_r} - \frac{\mu_{r\theta}}{E_\theta} - \frac{\mu_{rz}}{E_z} \\
S_\theta &= a_{22} + a_{12} + a_{23} = \frac{1}{E_\theta} - \frac{\mu_{r\theta}}{E_\theta} - \frac{\mu_{\theta z}}{E_z} \\
S_z &= a_{33} + a_{13} + a_{23} = \frac{1}{E_z} - \frac{\mu_{rz}}{E_z} - \frac{\mu_{\theta z}}{E_z}
\end{aligned} \tag{6-4}$$

Gl. (6-4) lässt sich auch über die Poissonsche Zahl  $\nu$  ausdrücken. Diese besagt, dass die Summe der Querdehnungen bezogen auf die Summe der Längsdehnungen kleiner als 0,5 sein muss. Diese Bedingung lautet mathematisch

$$\nu = -\frac{a_{12} + a_{13} + a_{23}}{a_{11} + a_{22} + a_{33}} = \frac{\mu_{r\theta} * E_z + (\mu_{rz} + \mu_{\theta z}) * E_\theta}{\frac{E_\theta * E_z}{E_r} + E_\theta + E_z} \leq 0,5 \tag{6-5}$$

In einem Finite-Element-Programm ist eine positiv definite Nachgiebigkeitsmatrix Voraussetzung für eine Berechnung. Die Nachgiebigkeitsmatrix ist positiv definit, wenn ihre Determinante positiv ist:

$$\begin{aligned}
D &= 1 - \frac{a_{12}^2}{a_{11} * a_{22}} - \frac{a_{23}^2}{a_{22} * a_{33}} - \frac{a_{13}^2}{a_{11} * a_{33}} + 2 * \frac{a_{12} * a_{23} * a_{13}}{a_{11} * a_{22} * a_{33}} = \\
&= 1 - \mu_{r\theta}^2 * \frac{E_r}{E_\theta} - \mu_{\theta z}^2 * \frac{E_\theta}{E_z} - \mu_{rz}^2 * \frac{E_r}{E_z} - 2 * \mu_{r\theta} * \mu_{\theta z} * \mu_{rz} * \frac{E_r}{E_z} > 0
\end{aligned} \tag{6-6}$$

## 6.2.2 Phänomenologische Materialkennwerte

### 6.2.2.1 Materialkennwerte $E_z$ , $\mu_{rz}$ und $\mu_{\theta z}$

Der Verformungsmodul  $V_z$  des Seils kann in einem Versuch ermittelt oder nach [9] berechnet werden. Die Gleichung ist im Anhang in Abschnitt 12.1 als Gl. (12-5) angegeben.

Im Gegensatz zum Verformungsmodul, der sich auf den metallischen Querschnitt bezieht, liegt im Finite-Element-Modell ein Vollquerschnitt vor. Der Verformungsmodul  $V_z$  muss demnach zur Ermittlung des phänomenologischen Elastizitätsmoduls

des homogenen Ersatzquerschnitts für das Seil mit dem Füllfaktor  $f_z$  abgemindert werden:

$$E_z = f_z * V_z \quad (6-7)$$

Für die Finite-Element-Berechnungen wurden die im Anhang in Abschnitt 12.1 aufgeführten berechneten Werte des Verformungsmoduls zugrundegelegt. Diese stimmen gut mit den dort ebenfalls aufgeführten gemessenen Werten überein.

Die Querkontraktionszahl des Seils kann nach [6] berechnet werden. Die Gleichung ist im Anhang in Abschnitt 12.1 als Gl. (12-6) angegeben. Die Querkontraktionszahl des Seils hängt außer von der Querkontraktionszahl des Drahtwerkstoffs nur vom Schlagwinkel ab. Für einen Schlagwinkel von  $15^\circ$  ergibt sich für  $\mu_D=0,30$  eine Seilquerkontraktion von 0,53 und für einen Schlagwinkel von  $17^\circ$  eine Seilquerkontraktion von 0,61. Ansonsten liegen im Schrifttum nur vage Angaben vor, die vom Wert 0,30 in [9] bis zum Wert 0,80 in [8] reichen. Für die Finite-Element-Berechnungen wurden die im Anhang in Abschnitt 12.1 aufgeführten mit den gemessenen Schlaglängen ermittelten berechneten Werte zugrundegelegt.

Da in einem Seil durch Zugbeanspruchung keine zusätzlichen Hohlräume entstehen, müssen  $\varepsilon_r$  und  $\varepsilon_\theta$  gleich groß sein, was aus der folgenden Gleichung sofort ersichtlich ist:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\Delta U_z}{U_z} = \frac{\pi * \Delta d_{z,N}}{\pi * d_{z,N}} = \frac{\Delta d_{z,N}}{d_{z,N}} = \varepsilon_r \quad (6-8)$$

Bei einem Zugversuch am Seil tritt nur die Spannung  $\sigma_z$  auf. Damit vereinfachen sich die Gleichungen für  $\varepsilon_r$  und  $\varepsilon_\theta$  in Gl. (6-2) zu

$$\varepsilon_r = -\mu_{rz} * \frac{\sigma_z}{E_z} = -\mu_{rz} * \varepsilon_z \quad (6-9)$$

und

$$\varepsilon_\theta = -\mu_{\theta z} * \frac{\sigma_z}{E_z} = -\mu_{\theta z} * \varepsilon_z \quad (6-10)$$

Zusammen mit Gl. (6-8) folgt, dass die beiden Seilquerkontraktionen  $\mu_{rz}$  und  $\mu_{\theta z}$  gleich groß sind:

$$\mu_{rz} = \mu_{\theta z} \quad (6-11)$$

### 6.2.2.2 Materialkennwert $G_{\theta z}$

Der phänomenologische Materialkennwert  $G_{\theta z}$  beschreibt das Torsionsverhalten der Seile. Es werden die im Anhang in Abschnitt 12.1 aufgeführten, mit der in Abschnitt 4.4 hergeleiteten Gleichung berechneten Torsionsschubmodule angesetzt. Diese müssen, da es sich im Finite-Element-Modell um einen Vollquerschnitt handelt, noch mit dem Füllfaktor  $f_z$  abgemindert werden:

$$G_{\theta z} = f_z * G_{zT} \quad (6-12)$$

### 6.2.2.3 Materialkennwert $E_\theta$

Dieser phänomenologische Materialkennwert beschreibt das Verhalten innerhalb der Drahtlagen, also in tangentialer Richtung. Die Runddrähte haben untereinander linienförmigen Kontakt. Die Kontaktkraft enthält Anteile aus dem Schnürdruck, der sich innerhalb der Drahtlage als Gewölbe kurzschließt und Anteile aus der Querpressung einer Seilklemme. Die Belastung zwischen den Drähten einer Drahtlage ist ein Zustand Hertzscher Pressung. Aus der Annäherung zweier gegeneinander gedrückter

Drahte lässt sich die Größenordnung des phänomenologischen Elastizitätsmoduls für einen Quader gleicher Maximalabmessungen ermitteln.

Um die Kontaktkraft zu überschlagen, geht man zunächst von einer Seilkraft im Gebrauchslastbereich von der Hälfte der Grenzzugkraft aus. Die Drahtnormalspannung eines Drahtes kann nach [9] mit Gl. (4-65) berechnet werden. Der radiale Schnürdruck eines Drahtes beträgt nach [9] je Millimeter Seillänge.

$$F_{D,S,i} = \sigma_{D,i} * \frac{\pi * d_{D,i}^2}{4} * \frac{\sin w_{D,Sch,i}^2}{d_{Z,M,i} / 2} \quad (6-13)$$

Diese Kraft entspricht der Ringdruckkraft der Drahtlage je Millimeter Seillänge und bewegt sich für die untersuchten offenen Spiralseile in der Größenordnung zwischen 1 und 10 N/mm.

Bei einer gleichmäßig verteilten Querpressung durch eine Seilklemme kommt noch der Anteil

$$F_{D,q,i} = q_K * d_{D,i} \quad (6-14)$$

hinzu. Dieser Anteil beträgt bei einer Querpressung von 40 N/mm<sup>2</sup> beim offenen Spiralseil des Durchmessers 12 mm etwa 70 N/mm und beim offenen Spiralseil des Durchmessers 28 mm etwa 160 N/mm.

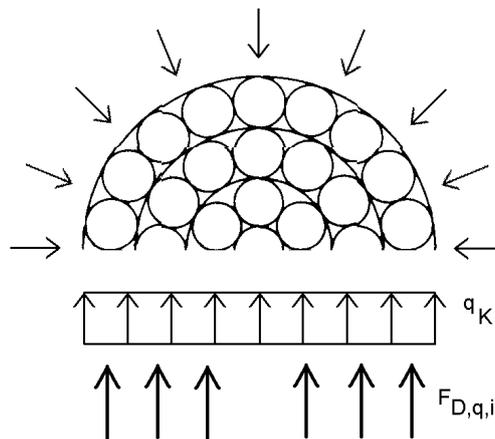


Bild 6-4: Seil unter gleichmäßig verteilter Querpressung

Die Berechnung der Annäherung zweier gegeneinander gedrückter Drahte erfolgt mit dem in Bild 6-5 dargestellten ebenen Finite-Element-Modell. Die Verformung im Kontaktbereich ist in Bild 6-6 zu sehen.

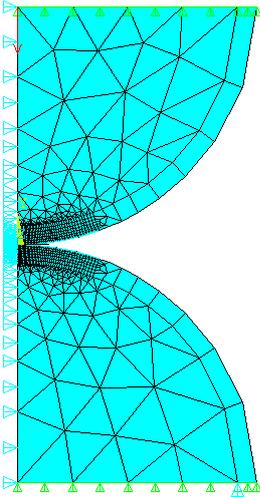


Bild 6-5: Finite-Element-Modell zur Hertzischen Pressung innerhalb der Drahtlagen

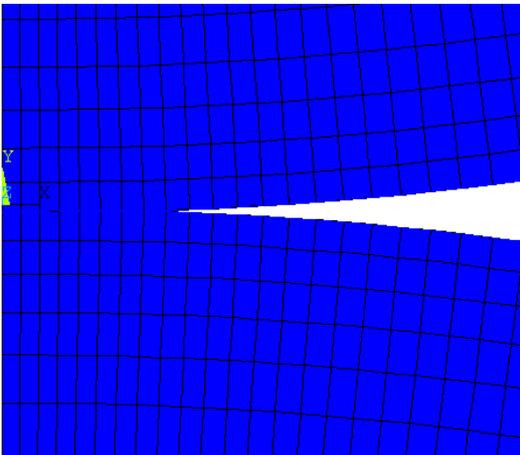


Bild 6-6: Verformung im Kontaktbereich

Für den mit Vierecken vernetzten Teil wurde das Element PLANE82 und für den mit Dreiecken vernetzten Bereich wurde das Element PLANE2 verwendet (Bild 6-7).

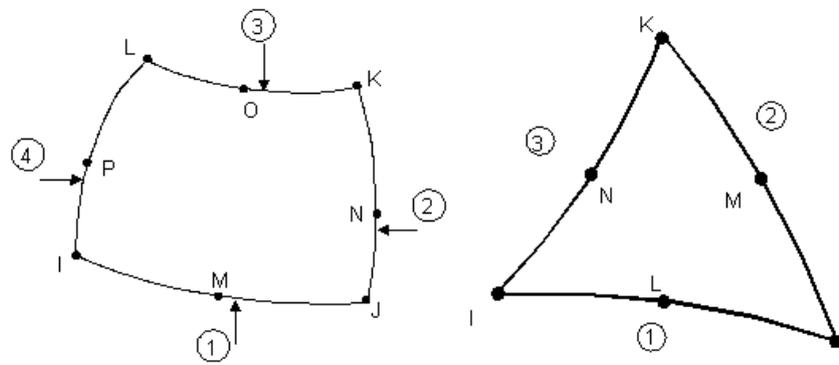


Bild 6-7: PLANE82 und PLANE2

Beides sind Flächenelemente mit Zwischenknoten auf den Kanten, die deshalb gut geeignet sind, gekrümmte Oberflächen abzubilden. Der Berechnung wurde ein ebener Dehnungszustand zugrundegelegt. Der Kontakt zwischen den beiden Drähten wurde mit den Elementen TARGE169 und CONTA172 hergestellt (Bild 6-8), die wie

die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Elemente TARGE170 und CONTA174 funktionieren.

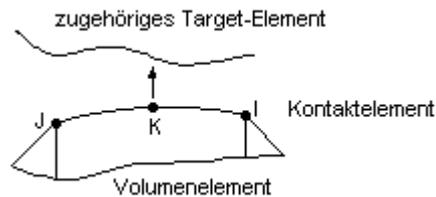


Bild 6-8: TARGE169 und CONTA172

Der phänomenologische Elastizitätsmodul  $E_\theta$  kann mit der Belastung innerhalb der Drahtlagen und mit der Verformung  $\Delta d_{D,i}$  für das Modell in Bild 6-5 folgendermaßen berechnet werden:

$$E_\theta = \frac{F_{D,S,i} + F_{D,q,i}}{\Delta d_{D,i}} \quad (6-15)$$

Für die verwendeten offenen Spiralseile und die dort vorkommenden Drahtdurchmesser ergeben sich leicht nichtlineare Kraft-Verformungs-Verläufe Bild 6-9, die mit einem Wert um  $30.000 \text{ N/mm}^2$  angenähert werden können. Dieser Wert wird bei den Finite-Element-Berechnungen für die offenen Spiralseile zugrundegelegt.

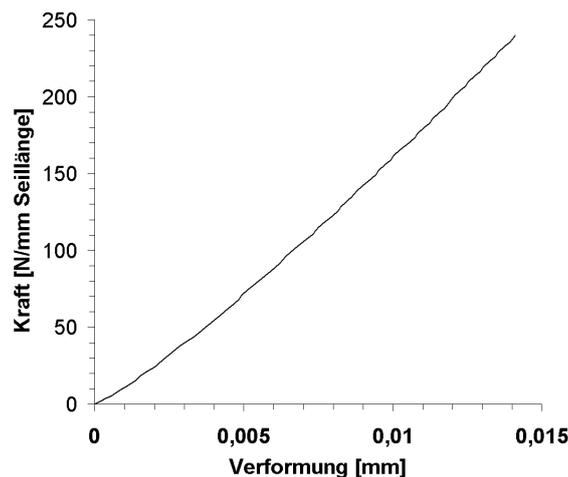


Bild 6-9: Verformung bei Linienkontakt zwischen zwei Drähten mit  $d=4,1 \text{ mm}$

Die vollverschlossenen Spiralseile besitzen in ihrem Profildrahtbereich einen phänomenologischen Elastizitätsmodul  $E_\theta$  der dem der Drähte entspricht. Insgesamt wird für die vollverschlossenen Spiralseile deshalb mit einem größeren phänomenologischen Elastizitätsmodul von  $50.000 \text{ N/mm}^2$  gerechnet.

#### 6.2.2.4 Materialkennwerte $E_r$ , $G_{rz}$ , $G_{r\theta}$ , $\mu_{r\theta}$

Diese phänomenologischen Materialkennwerte können in ihrer Größe nur schwer eingeschätzt werden.

Der phänomenologische Elastizitätsmodul  $E_r$  wird kleiner als der Wert  $E_\theta$  sein. Er wird jeweils mit dem halben Wert angesetzt.

Der Schubmodul  $G_{r\theta}$  beeinflusst wesentlich die Verformung des Seils in Querrichtung. Diese spiegeln sich in den Abdrücken in den Seilklemmennuten wieder. Mit einem Wert von  $300 \text{ N/mm}^2$  konnten diese für alle Versuche in den Finite-Element-Berechnungen gut wiedergegeben werden. Für die etwas steiferen vollverschlossenen Spiralseile wurde ein Wert von  $450 \text{ N/mm}^2$  angesetzt.

Der Schubmodul  $G_{rz}$  wird kleiner als der Wert  $G_{r\theta}$  sein. Er wird mit 2/3 dieses Wertes angesetzt.

Der Wert  $\mu_{r\theta}$  wird mit 0,30 angesetzt.

### 6.2.2.5 Zusammenfassung der Materialkennwerte

Phänomenologischer Materialkennwert	OSS	VVS	Größe abgeleitet aus
$E_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	15.000	25.000	$0,5 \cdot E_\theta$
$E_\theta$ [N/mm <sup>2</sup> ]	30.000	50.000	Hertz'sche Pressung
$E_z$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ca. 120.000	ca. 127.000	Gl. (6-7), Gl. (12-5)
$\mu_{\theta z}$ [/]	ca. 0,58	ca. 0,68	Gl. (12-6)
$\mu_{rz}$ [/]	ca. 0,58	ca. 0,68	Gl. (12-6)
$\mu_{r\theta}$ [/]	0,30	0,30	Abschätzung
$G_{\theta z}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ca. 10.000	ca. 17.000	Gl. (4-64)
$G_{rz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	200	300	Abschätzung
$G_{r\theta}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	300	450	Vergleich mit Versuchsergebnissen
$S_r$ [/]	5,2E-05	2,9E-05	Gl. (6-4)
$S_\theta$ [/]	1,9E-05	9,0E-06	Gl. (6-4)
$S_z$ [/]	-1,2E-06	-2,7E-06	Gl. (6-4)
$S$ [/]	7,0E-05	3,5E-05	Gl. (6-4)
$\nu$ [/]	0,176	0,238	Gl. (6-5)
$D$ [/]	0,82	0,65	Gl. (6-6)

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der phänomenologischen Materialkennwerte

Die in Abschnitt 6.2.1 aufgeführten Bedingungen, dass die Kompressionszahl  $S$  einen positiven Wert annimmt, die Poissonsche Zahl  $\nu$  kleiner als 0,5 ist und die Determinante  $D$  der Nachgiebigkeitsmatrix positiv definit ist, sind, wie aus Tabelle 6-1 ersichtlich ist, erfüllt. Für alle offenen und für alle vollverschlossenen Spiralseile wurden unabhängig vom Seildurchmesser die gleichen phänomenologischen Materialkennwerte verwendet. Da es sich im Seilquerschnitt um einen überdrückten Zustand handelt, werden alle phänomenologischen Elastizitätsmodule in Zug- und Druckverhalten mit dem gleichen Wert angesetzt.

### 6.2.3 Überprüfung des Modells

Für die Wahl der Netzdichte bei der Modellierung der Klemmung wurde eine Konvergenzanalyse durchgeführt. Außerdem konnten die Berechnungsergebnisse anhand der in den durchgeführten Versuche ermittelten Messwerte der Scheiteldehnung und des Kontaktbereichs verifiziert werden. Im folgenden Kapitel 7, in dem Ergebnisse aus den Bauteilversuchen und den numerischen Berechnungen gegenübergestellt werden, ist dies dargestellt.

### 6.3 Definition eines Reibgesetzes

Bei Zugrundelegung des Coulombschen Reibgesetzes ergibt sich die Verschiebekraft aus dem Produkt des Reibbeiwerts mit der Summe der rechtwinklig zur Seilklemmenut gerichteten Kontaktpressungen. Da der Reibbeiwert unbekannt ist, die Verschiebekraft aus den Versuchen und die Summe der Kontaktpressungen aus den Finite-Element-Berechnungen bekannt ist, liegt es nahe, den Reibbeiwert aus dieser Beziehung zu ermitteln. Für diesen ergaben sich bei den untersuchten offenen

Spiralseilen wider Erwarten für die verschiedenen Seildurchmesser unterschiedliche Werte. Offensichtlich traten für die untersuchten offenen Spiralseile aufgrund der unterschiedlichen Drahtdurchmesser in der Außenlage bei der durch das Korundstrahlen in allen Seilklemmnuten ähnlichen Rauigkeit unterschiedliche Reibbeiwerte auf.

Die wie oben beschrieben ermittelten Reibbeiwerte sind wie auch die Drahtdurchmesser der Außenlagen linear mit dem Seildurchmesser veränderlich wie aus Bild 6-10, Bild 6-11 und Bild 6-12 hervorgeht. Die vor den Drähten liegenden, in der Terminologie der Rheologie mit dem englischen Begriff „asperities“ bezeichneten Unebenheiten sind für die kleineren Seildurchmesser mit ihren kleineren Drahtdurchmessern in der Außenlage ein größeres Hindernis als für die größeren Seildurchmesser mit ihren größeren Drahtdurchmessern in der Außenlage.

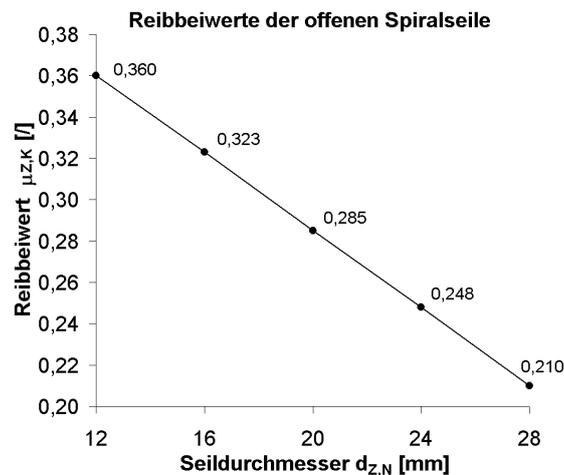


Bild 6-10: Reibbeiwerte der offenen Spiralseile

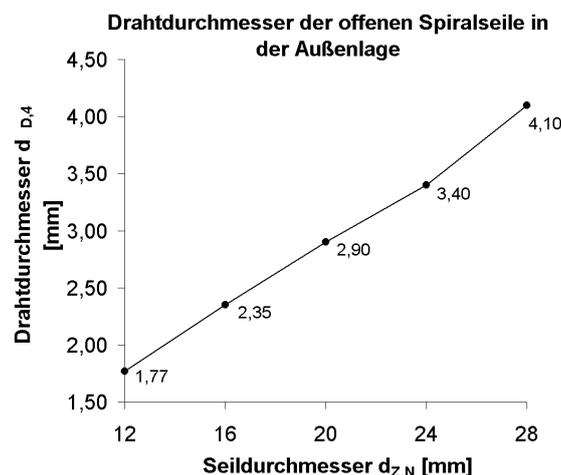


Bild 6-11: Drahtdurchmesser der offenen Spiralseile in der Außenlage

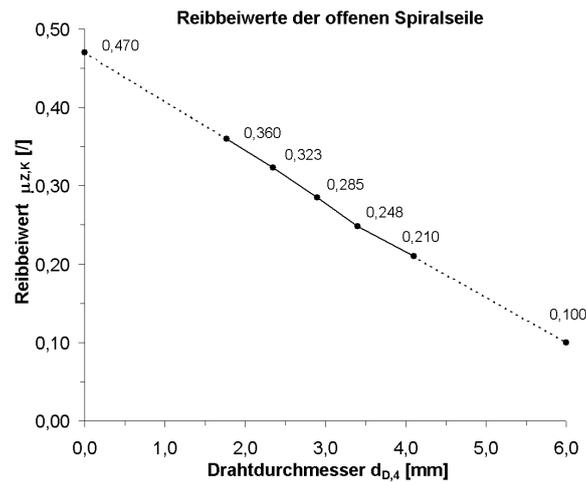


Bild 6-12: Beziehung zwischen dem Reibbeiwert der offenen Spiralseile und dem Drahtdurchmesser in der Außenlage

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde lediglich an einem vollverschlossenen Spiralseil des Durchmessers von 34 mm der Reibbeiwert ermittelt. Er beträgt 0,45. Bei Extrapolation der in Bild 6-12 dargestellten Beziehung auf einen gegen Null gehenden Drahtdurchmesser  $d_{D,A}$ , der in Realität natürlich nicht zur Anwendung kommen kann, ergibt sich ein Wert von 0,47. In weiteren Versuchen sollte geprüft werden, ob auch der Reibbeiwert von vollverschlossenen Spiralseilen von den Abmessungen der Drähte der Außenlage abhängt. Bei Extrapolation der in Bild 6-12 dargestellten Beziehung auf den Drahtdurchmesser  $d_{D,A}=6,0$  ergibt sich ein Wert von 0,10. In weiteren Versuchen sollte auch dies überprüft werden.

## 6.4 Parameterstudie zur Entwicklung einer Gleichung für den Kontaktwinkel

### 6.4.1 Berechnungen

Mit dem Finite-Element-Modell wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Ziel dieser Parameterstudie war es, die Abhängigkeit des Kontaktwinkels von der Querpressung zu ermitteln. Die in den Bauteilversuchen verwendeten Seilklemmen wurden mit den folgenden Passungsverhältnissen  $v_k$  berechnet:

$v_k$
1,000
1,003
1,006
1,010
1,015
1,020
1,025
1,030
1,040
1,050

Tabelle 6-2: Passungsverhältnisse für die Parameterstudie

Für die unterschiedlichen Seilklemmen waren die Ergebnisse etwa gleich, was aufgrund der selben Abmessungsverhältnisse zu erwarten war. Unterschiede in der Scheitelhöhe der Seilklemmen machen sich nicht bemerkbar, da die Scheiteldehnung im elastischen Bereich bleibt.

Der aus den Finite-Element-Berechnungen ermittelte Zusammenhang zwischen dem Kontaktwinkel und der Querpressung ist für jedes Passungsverhältnis aus Tabelle 6-2 mit einer Kurve in Bild 6-13 dargestellt. Je größer der Wert des Passungsverhältnisses  $v_K$  desto flacher ist der Verlauf der Kurve. Der abgestufte Verlauf der Kurven spiegelt die Elementierung des Finite-Element-Modells im Kontaktbereich zwischen Seil und Seilklemme wieder.

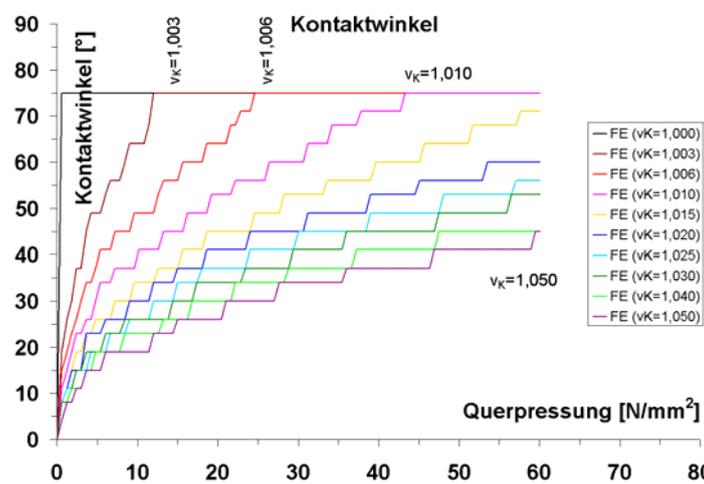


Bild 6-13: Kontaktwinkel über Querpressung für die offene Spiralseile aus der F.E. Parameterstudie

Durch zahlreiche Vergleiche und Kombinationen verschiedener Funktionen hat sich als Grundfunktion die Kombination einer Wurzelfunktion mit einer linearen Funktion zur Darstellung der Verläufe in Bild 6-13 als geeignet herausgestellt. Mit ihr können der am Anfang steile Anstieg und das folgende recht schnelle Abflachen der Kurven gut dargestellt werden.

$$\gamma_{K,K} = a_0 * \frac{q_K}{G_{r\theta}} + a_1 * \sqrt{\frac{q_K}{G_{r\theta}}} \quad (6-16)$$

mit

$G_{r,\theta}=300 \text{ N/mm}^2$  für offene Spiralseile und

$G_{r,\theta}=450 \text{ N/mm}^2$  für vollverschlossene Spiralseile

Für  $a_0$  gelten die folgenden Werte in Abhängigkeit vom Passungsverhältnis:

$v_K$	1,000	1,005	1,010	1,015	1,020	1,025	$\geq 1,030$
$a_0$	-5,236	-2,880	-1,780	-1,309	-1,152	-1,099	-1,047

Tabelle 6-3: Werte  $a_0$  in Abhängigkeit vom Passungsverhältnis

Für  $a_1$  gilt die folgende Gleichung in Abhängigkeit vom Passungsverhältnis:

$$a_1 = \frac{1,5622 - 1,5970 * v_K}{1 - 1,0025 * v_K} \quad (6-17)$$

#### 6.4.2 Kontaktwinkel $\gamma_{K,K} \leq \gamma_{K,\max}$

Mögliche Kontaktzustände sind in Bild 4-1 und Bild 4-2 dargestellt. Aus Gl. (6-16) und Gl. (6-17) ergibt sich mit Tabelle 6-3 für den Kontaktwinkel die Gleichung

$$\gamma_{K,K} = a_0 * \frac{q_K}{G_{r\theta}} + \frac{1,5622 - 1,5970 * v_K}{1 - 1,0025 * v_K} * \sqrt{\frac{q_K}{G_{r\theta}}} \quad (6-18)$$

In Bild 6-14 sind zu den mit dem Finite-Element-Modell berechneten und bereits in Bild 6-13 dargestellten Kurven für die offene Spiralseile die mit Gl. (6-18) berechne-

ten Werte mit gestrichelten Linien hinzugefügt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

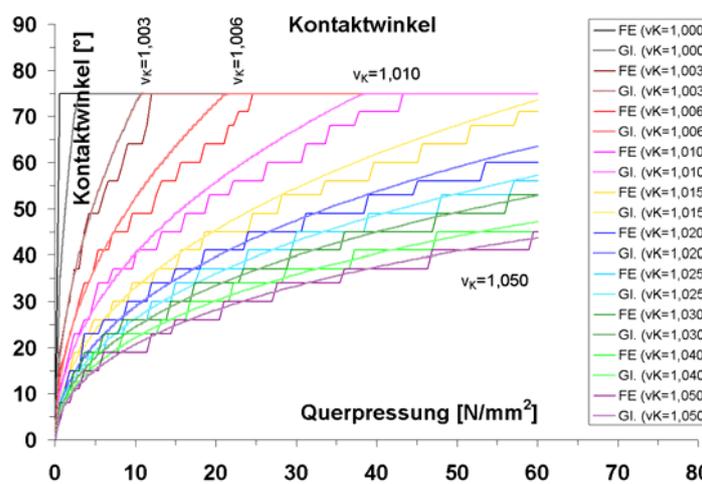


Bild 6-14: Kontaktwinkel über Querpressung für die offenen Spiralseile – Vergleich F.E. mit Gleichung

#### 6.4.3 Kontaktwinkel $\gamma_{K,K} \geq \gamma_{K,max}$

Wenn der berechnete Kontaktwinkel größer als der maximal mögliche Kontaktwinkel ist, stellt sich ein Kontaktzustand wie in Bild 4-3 ein. In diesem Fall ist als zusätzliche Information zum Kontaktwinkel, der dem maximal möglichen Kontaktwinkel entspricht, das Pressungsverhältnis  $f_K$  erforderlich. Dies kann mit dem mit Gl. (6-18) berechneten Wert wie folgt ermittelt werden:

$$f_K [V] = \min \left\{ \frac{\gamma_{K,K} - \gamma_{K,max}}{1,745} \right\} * 0,573 \quad (6-19)$$

#### 6.4.4 Berechnung der Verschiebekraft

Die mit Gl. (6-18) und Gl. (6-19) berechneten Kontaktzustände und Seilpressungsverteilungen dienen als Eingangsgrößen zur Berechnung des Klemmkraftbeiwerts mit Gl. (4-15) wobei für  $\gamma_{K,K}$  maximal der größtmögliche Kontaktwinkel  $\gamma_{K,max}$  eingesetzt werden darf. Zusammen mit den Reibbeiwerten aus Abschnitt 6.3 und der in den Bauteilversuchen beim Verschieben vorhanden gewesenen Querpressung kann die Verschiebekraft mit der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$G = \int q_K * \alpha_K * \mu_{z,K} * dA \quad (6-20)$$

wobei sich das Integral über die Oberfläche der Seilklemmnut erstreckt.

## 7 Vergleich zwischen Bauteilversuchen, Analytik und Numerik

### 7.1 Scheiteldehnung

Im Anhang sind in Abschnitt 12.3.1 für den Vorgang des Anziehens der Schrauben bei den Versuchen Diagramme dargestellt, in denen die Scheiteldehnung über der Querpressung aufgetragen ist. Je Seilklemme ist ein Diagramm vorgesehen. Die Versuche werden mit v1 beginnend durchnummeriert. Als zusätzliche Information ist in der Versuchsbezeichnung angegeben, mit welchem Anteil der Grenzzugkraft  $Z_{R,d}$  das Seil im Versuch belastet wurde. Außer den Versuchswerten sind auch die mit dem Finite-Element-Modell aus Kapitel 6 und die mit Gl. (4-27) berechneten Scheiteldehnungen als Kurven mit den Bezeichnungen „FE“ und „Gl.“ eingetragen. Das Passungsverhältnis und der Quotient aus der Scheitelhöhe der Seilklemme zum Seildurchmesser sind als Zahlenwerte in den Diagrammen angegeben.

Am offenen Spiralseil mit dem Durchmesser 28 mm wurden zusätzliche Versuche an bereits benutzten Seilstellen durchgeführt, um weitere Scheiteldehnungsverläufe zu erhalten (Bild 12-21 bis Bild 12-24). Die Diagramme, in denen die Scheiteldehnung über der Querpressung aufgetragen ist, sind im Anhang in Abschnitt 12.3.1 im Anschluss an die oben aufgeführten Diagramme abgebildet und ebenfalls mit den oben beschriebenen weiteren Informationen versehen.

Zu den Scheiteldehnungen lassen sich folgende Feststellungen treffen:

- Mehrere Versuche mit der selben Seilklemme zeigen, dass die Versuchswerte kaum streuen.
- Unterschiede im Passungsverhältnis spiegeln sich in der Scheiteldehnung wieder. Am deutlichsten wird der Unterschied, wenn eine der beiden Seilklemmen ein sehr gutes Passungsverhältnis hat und die andere nicht (z.B. Bild 12-21 und Bild 12-23 oder Bild 12-22 und Bild 12-24).
- Unterschiede in der Scheitelhöhe spiegeln sich in der Scheiteldehnung wieder (z.B. Bild 12-21 und Bild 12-22).
- Die Größe der Seilkraft beeinflusst die Scheiteldehnung, da sie sich auf den Seildurchmesser auswirkt. Dieser Effekt ist jedoch sehr gering und macht sich lediglich bei Passungsverhältnissen  $v_K \leq 1,007$  bemerkbar (z.B. Bild 12-9 und Bild 12-11).
- Die Seilklemme 20-K1 (Bild 12-8) hat eine zu kleine Seilklemmennut. Sie hat deshalb zunächst im Seilklemmengrund Kontakt mit dem Seil und im Seilklemmenscheitel keinen Kontakt. Bei größerer Querpressung wird das Seil etwas weiter in die Seilklemme gezwängt. Dieser Ablauf spiegelt sich anhand zunächst sehr kleiner und dann überproportional ansteigender Scheiteldehnungen wieder. Im nach dem Versuch aufgenommenen Photo der Seilklemmennut ist der Abdruck der Drähte sichtbar (Bild 7-1). Es zeigt sich, dass der Seilklemmenscheitel bis zum Schluss kontaktfrei blieb.
- Die Scheiteldehnungen aus Bauteilversuchen, aus Finite-Element-Berechnungen und aus den Gleichungen zeigen gute Übereinstimmung.



Bild 7-1: Kontaktverhältnisse nach dem Verschiebeversuch an der Seilklemme 20-K1

## 7.2 Verschiebekraft

In Bild 7-2 sind zwei repräsentative Last-Verschiebungskurven aus den Versuchen an den offenen Spiralseilen dargestellt. In beiden Diagrammen wird die in die Seilklemme eingeleitete seilparallele Kraft bis zum Erreichen eines ersten Maximums gesteigert. Danach kommt es zu einer Relativverschiebung zwischen der gesamten Seilklemme und dem Seil, und die in die Seilklemme eingeleitete seilparallele Kraft wird abgebaut. Nach dem ersten Maximum kann in beiden Diagrammen ein „stick-slip“-Effekt beobachtet werden. Im Gegensatz zum ersten Diagramm führt ein weiteres Verschieben der Seilklemme im zweiten Diagramm zu einer Steigerung der von der Seilklemme ins Seil übertragenen seilparallelen Kraft. Dieses Verhalten trat in den Versuchen am offenen Spiralseil des Durchmessers 28 mm und etwas schwächer ausgeprägt auch am offenen Spiralseil des Durchmessers 24 mm auf. In den Versuchen an den offenen Spiralseilen kleineren Durchmessers entsprach das erste lokale Maximum auch dem globalen Maximum.

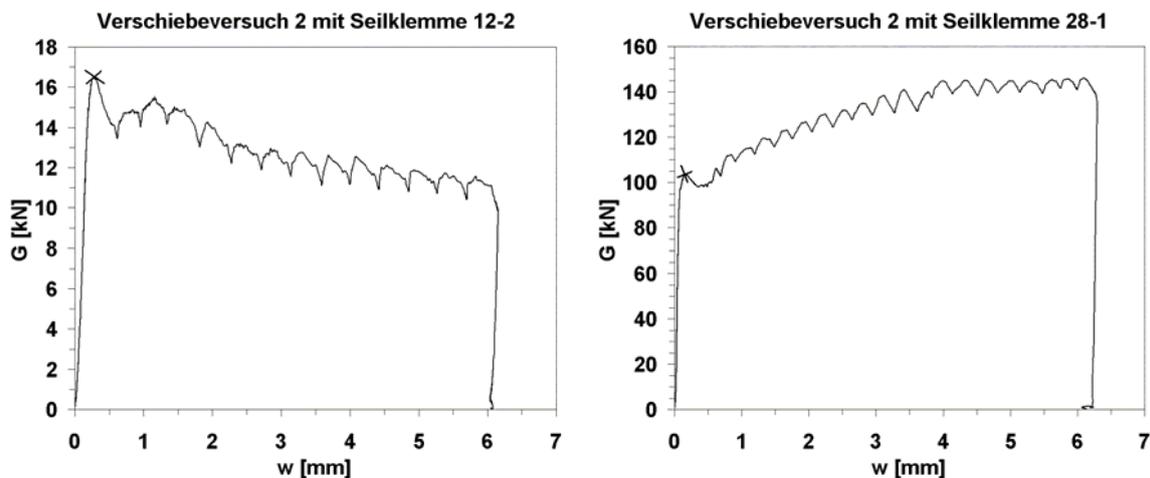


Bild 7-2: Verschiebeverhalten der Seilklemmen bei großen Verschiebungen

Als Verschiebekraft wurde das erste Maximum gewählt. In Bild 7-2 ist es in beiden Diagrammen mit einem Kreuz gekennzeichnet. Mit diesem Kriterium wurden alle Verschiebeversuche ausgewertet. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen im Anhang in Abschnitt 12.3.2 dargestellt. Der Wert des ersten Maximums  $G_{\text{Versuch}}$  und die zugehörige Querpressung  $q_K$  sind als Zahlenwerte im Diagramm eingetragen.

Für diese Querpressung sind außerdem

- die mit dem Finite-Element-Modell aus Kapitel 6 berechnete Verschiebekraft mit einem Dreieckssymbol,
- die mit der Gleichung (6-20) aus Abschnitt 6.4.4 berechnete Verschiebekraft mit einem Kreissymbol und

- der aus dem Verschiebeversuch ermittelte, der mit dem Finite-Element-Modell aus Kapitel 6 berechnete und der mit der Gleichung (6-18) aus Abschnitt 6.4.2 berechnete Kontaktwinkel

als Zahlenwerte angegeben.

Die Verschiebekräfte aus Bauteilversuchen, aus Finite-Element-Berechnungen und aus den Gleichungen sind in Tabelle 7-1 gegenübergestellt. Für die Seilklemmen am Seil des Durchmessers von 20 mm fallen die Unterschiede am größten aus. Bei den mit \* gekennzeichneten Versuchen hat sich zunächst eine große Verschiebekraft aufgebaut, die dann nach dem Verschieben auf einen deutlich kleineren Wert abfiel. Dies wird bei der Betrachtung der zugehörigen Diagramme in Abschnitt 12.3.2 deutlich. Unter diesem Gesichtspunkt sind die Werte trotz der teilweise großen Abweichungen repräsentativ.

Versuchs- bez.	Werte der Verschiebekraft			Versuch / F.E.	Versuch / Gl.	Bemerkung
	Versuch	F.E.	Gl.			
12 K1 v1	23,5	20,8	21,1	1,13	1,11	
12 K1 v2	25,6	26,8	27,1	0,96	0,95	
12 K1 v3	34,1	28,4	28,8	1,20	1,18	*
12 K1 v4	26,9	27,1	27,4	0,99	0,98	
12 K1 v5	30,4	29,2	29,5	1,04	1,03	
12 K1 v6	16,1	12,2	12,4	1,31	1,30	*
12 K2 v1	10,9	9,0	8,9	1,21	1,22	*
12 K2 v2	17,3	16,2	15,8	1,07	1,10	
12 K3 v1	12,8	13,9	13,9	0,92	0,92	
12 K3 v2	19,4	21,2	21,6	0,92	0,90	
12 K4 v1	15,0	18,0	17,8	0,83	0,84	
12 K4 v2	10,8	12,2	12,4	0,88	0,87	
16 K1 v1	21,9	16,8	16,8	1,30	1,30	
16 K1 v2	38,3	30,7	31,3	1,25	1,22	
16 K1 v3	37,2	31,6	32,3	1,18	1,15	
16 K2 v1	16,2	16,3	16,4	0,99	0,98	
16 K2 v2	28,5	31,7	31,8	0,90	0,90	
16 K2 v3	28,3	33,9	34,0	0,84	0,83	
20 K1 v1	35,2	18,1	20,9	1,94	1,69	*
20 K1 v2	69,9	49,8	55,5	1,40	1,26	*
20 K1 v3	64,8	45,6	51,1	1,42	1,27	*
20 K2 v1	32,2	17,7	18,1	1,81	1,77	*
20 K2 v2	29,6	19,6	20,0	1,51	1,48	*
20 K2 v3	65,8	45,9	48,1	1,43	1,37	*
20 K2 v4	61,8	48,5	50,7	1,28	1,22	*
20 K3 v1	27,6	17,7	17,7	1,56	1,56	*
20 K3 v2	26,2	18,2	18,1	1,44	1,44	*
20 K3 v3	57,8	47,3	47,6	1,22	1,21	*
20 K3 v4	53,9	44,1	44,2	1,22	1,22	*
24 K1 v1	65,4	52,9	57,2	1,24	1,14	*
24 K1 v2	90,3	77,1	83,4	1,17	1,08	
24 K1 v3	76,3	62,7	67,8	1,22	1,12	*
24 K2 v1	49,9	49,1	49,2	1,02	1,01	
24 K2 v2	56,8	53,6	53,6	1,06	1,06	
24 K2 v3	67,0	72,9	72,9	0,92	0,92	
28 K1 v1	106,1	108,4	118,1	0,98	0,90	
28 K1 v2	103,9	115,5	125,7	0,90	0,83	
28 K1 v3	102,4	99,0	108,1	1,03	0,95	
28 K1 v4	61,7	55,2	61,3	1,12	1,01	
28 K2 v1	65,2	59,7	62,8	1,09	1,04	
28 K3 v1	68,4	70,1	70,2	0,98	0,97	
28 K3 v2	45,3	47,0	47,2	0,96	0,96	
28 K4 v1	50,3	50,0	49,4	1,01	1,02	

\* starker Abfall nach der ersten Verschiebung

Tabelle 7-1: Gegenüberstellung der Verschiebekräfte der Seilklemmen an den offenen Spiralseilen aus Bauteilversuchen und Berechnungen

Versuchs- bez.	Werte der Verschiebekraft			Versuch / F.E.	Versuch / Gl.	Bemerkung
	Versuch	F.E.	Gl.			
34 K1 v1	282	266	290	1,06	0,97	
34 K2 v1	227	230	235	0,99	0,97	
34 K2 v2	413	462	485	0,89	0,85	
34 K2 v3	201	185	188	1,09	1,07	
34 K2 v4	218	285	293	0,76	0,74	
34 K3 v1	202	220	222	0,92	0,91	
34 K3 v2	366	425	433	0,86	0,84	
34 K3 v3	188	176	177	1,07	1,06	

Tabelle 7-2: Gegenüberstellung der Verschiebekräfte der Seilklemmen am vollverschlossenen Spiralseil VVS 34 aus Bauteilversuchen und Berechnungen

Mehrfachversuche sind vereinzelt durchgeführt worden. Jedoch nicht so viele, dass man sie statistisch auswerten könnte. Viel wichtiger ist jedoch, dass sich herausgestellt hat, dass für alle Seildurchmesser die gleichen Gesetzmäßigkeiten für den Kontaktwinkel und das Pressungsverhältnis gelten.

Stellt man alle Berechnungsergebnisse der Verschiebekraft an den offenen Spiralseilen über den Versuchsergebnissen dar, erhält man das folgende Diagramm.

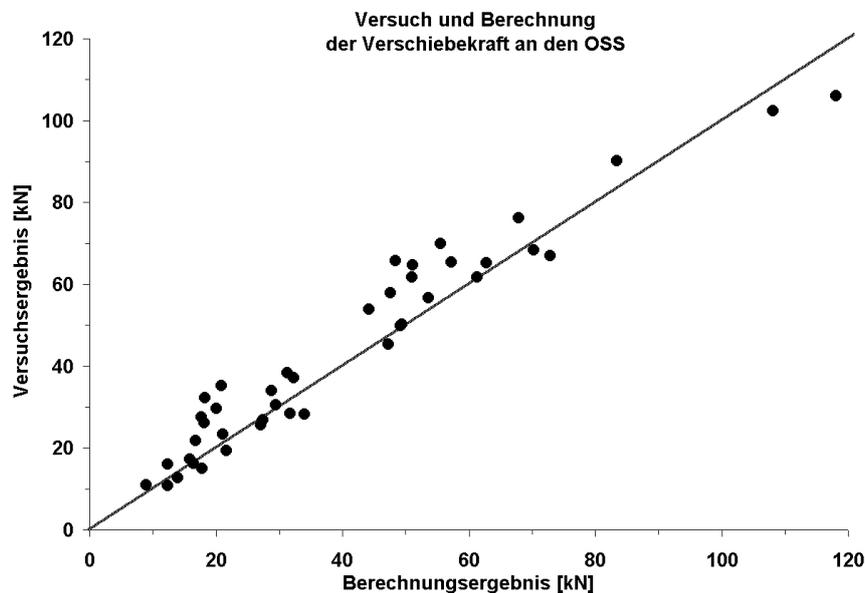


Bild 7-3: Versuchsergebnisse und Berechnungsergebnisse im Vergleich (1)

Nimmt man die Versuche heraus, bei denen sich zunächst eine große Verschiebekraft aufgebaut hat, die dann nach dem Verschieben auf einen deutlich kleineren Wert abfiel, erhält man das folgende Diagramm:

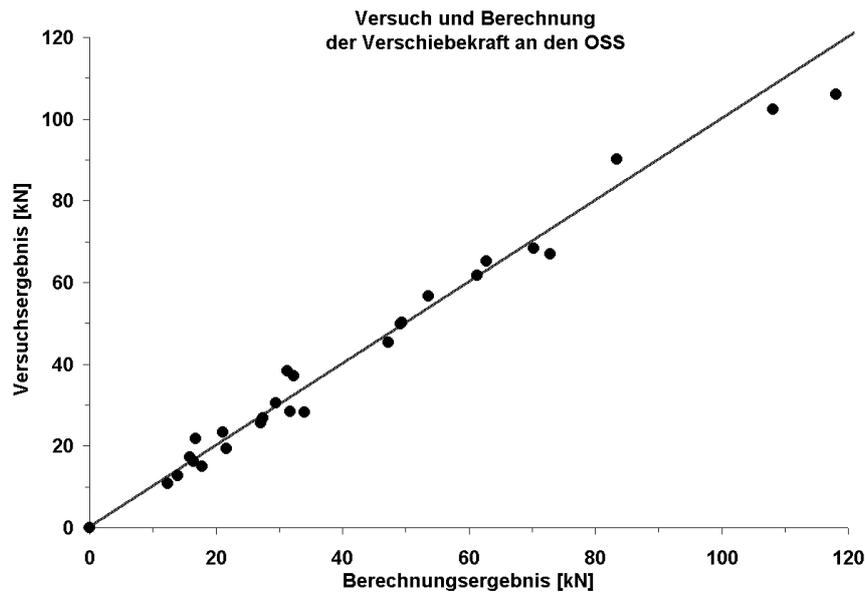


Bild 7-4: Versuchsergebnisse und Berechnungsergebnisse im Vergleich (2)

Bei 27 Werten ergibt sich für die Quotienten folgende statistische Betrachtung:

	Versuch / Gl.
Minimum	0,83
Maximum	1,30
Anzahl der Werte	27
Mittelwert	0,99
Standardabweichung	0,12
k-Wert	2,00
Erwartungswert (min)	0,76
Erwartungswert (max)	1,23

Tabelle 7-3:

mit

Erwartungswert = Mittelwert  $\pm$  k \* Standardabweichung

Das heißt, der 5%-Fraktilwert der Verschiebekraft liegt etwa 25% über oder unter dem berechneten Wert.

### 7.3 Kontaktbereich und Seilpressung

Für die Querpressung, bei der die Seilklemmen in den Bauteilversuchen verschoben wurden, wurde der mit dem Finite-Element-Modell berechnete Kontaktwinkel in die Diagramme im Anhang in Abschnitt 12.3.2 mit den in den Bauteilversuchen gemessenen Kontaktwinkeln und den mit der Gleichung (6-18) aus Abschnitt 6.4.2 ermittelten Kontaktwinkeln eingetragen. Für die am offenen Spiralseil des Durchmessers 28 mm zusätzlich durchgeführten Verschiebeversuche an bereits benutzten Seilstellen sind die Kontaktwinkel im Anhang am Ende des Abschnitts 12.3.1 mit den im Finite-Element-Modell berechnete Kontaktwinkel und mit den mit der Gleichung (6-18) aus Abschnitt 6.4.2 ermittelten Kontaktwinkeln in Tabelle 12-12 aufgeführt. Die Kontaktwinkel aus Bauteilversuchen, aus Finite-Element-Berechnungen und aus den Gleichungen zeigen gute Übereinstimmung.

Die Pressungen zwischen Seil und Seilklemme können gut mit Pressungsgebirgen dargestellt werden. Im folgenden werden drei Pressungsgebirge für unterschiedliche Passungsverhältnisse und einer Querpressung von  $60 \text{ N/mm}^2$  dargestellt. Dies sind

eine Seilklemme mit einem Passungsverhältnis von 1,000 (Bild 7-5), bei der eine annähernd konstante Seilpressungsverteilung vorliegt, eine Seilklemme mit einem Passungsverhältnis von 1,010 (Bild 7-6), bei der die Seilpressung bis in den Seilklemmengrund reicht und eine Seilklemme mit einem Passungsverhältnis von 1,050 (Bild 7-7), bei der nur der Seilklemmenscheitel in Kontakt ist. Der Aufbau der Diagramme wurde bereits in Kapitel 2 erläutert.

Die Verformbarkeit des Seils ruft am Übergang zum ungeklemmten Seil Spannungsspitzen hervor. Diese sind von geringer Ausdehnung und beeinflussen die Pressungssumme nur unwesentlich.

Anhand dieser Pressungsgebirge ist ersichtlich, dass die in Kapitel 4 quer zur Seillängsachse kosinusförmig angesetzte Pressungsverteilung und die in Richtung der Seillängsachse als konstant angenommene Pressungsverteilung den Gegebenheiten ausreichend genau entsprechen.

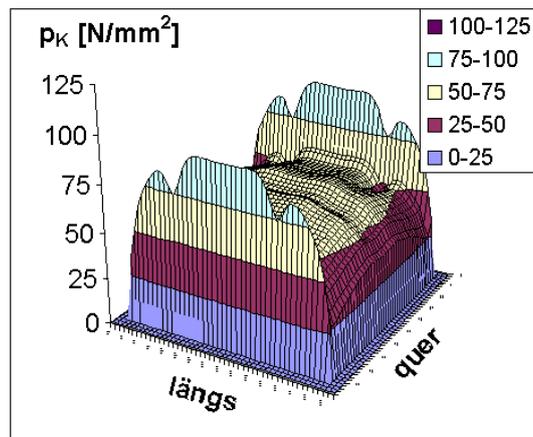


Bild 7-5: Pressungsgebirge für eine Seilklemme mit  $v_K=1,000$

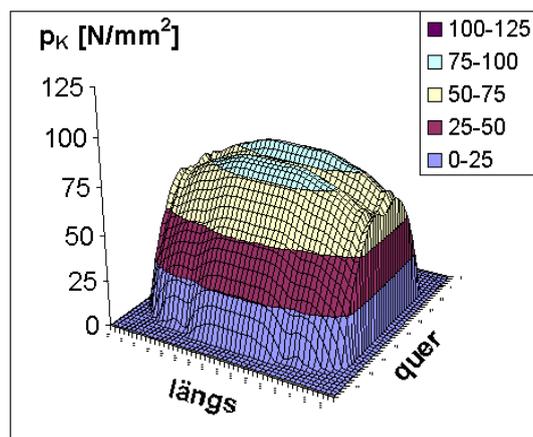
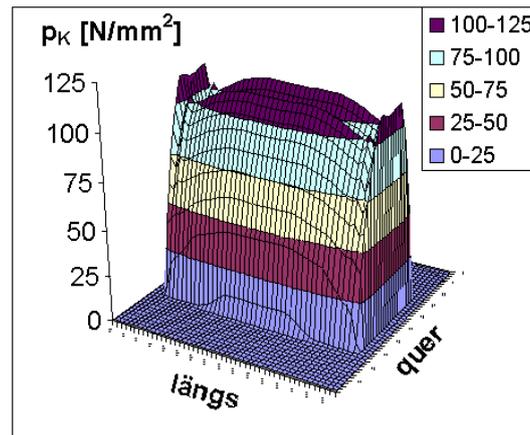


Bild 7-6: Pressungsgebirge für eine Seilklemme mit  $v_K=1,010$

Bild 7-7: Pressungsgebirge für eine Seilklemme mit  $v_K=1,050$ 

In Abschnitt 12.3.3 werden im Anhang die in den Finite-Element-Berechnungen und die mit Gl. (4-12) ermittelten Seilpressungen am Scheitel der Seilklemmennut in der Mitte der Seilklemmenlängsrichtung für die in den Bauteilversuchen verwendeten Seilklemmen über der Querpressung aufgetragen. Bei den Finite-Element-Ergebnissen wurde der Maximalwert im Bereich von  $\pm 30^\circ$  genommen. Es zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung, die bei den Seilklemmen mit gutem Passungsverhältnis besser ist, als bei den Seilklemmen mit schlechtem Passungsverhältnis.

#### 7.4 Torsionsversuche

Die Ergebnisse der Torsionsversuche sind im Anhang in Abschnitt 0 in Tabellen aufgeführt. Nach jeder Lastveränderung sind die Höhen der Profilenden über dem Boden (vgl. Abschnitt 5.8.1), die aus der CAD-Zeichnung abgelesene Verdrehung und der zugehörige Hebelarm aufgeführt. Die Höhen der Profilenden über dem Boden werden in den Tabellen im Anhang in Abschnitt 0 mit Höhe Wand und Höhe Raum angegeben. Mit der Last lässt sich das Torsionsmoment berechnen. Der Torsionsschubmodul wird in jeder Zeile aus der Veränderung zur vorangehenden unter Zugrundelegung des zutreffenden statischen Systems mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$G_{z,T} = \frac{\Delta M_z * \frac{l_1 * l_2}{l_1 + l_2}}{\Delta \varphi_z * I_{z,T}} \quad (7-1)$$

mit

$l_1$  Seillänge bis zur Endverbindung 1

$l_2$  Seillänge bis zur Endverbindung 2

Das Torsionsträgheitsmoment ist bereits in Abschnitt 4.4 in Gl. (4-55) als das mit dem Füllfaktor multiplizierte Torsionsträgheitsmoment des Seilkreisquerschnitts definiert worden.

Aus dem Versuch am offenen Spiralseil mit dem Durchmesser 36 mm zeichnet sich deutlich ab, dass das Torsionsverhalten von der Seilkraft und der Messstelle unabhängig ist.

Die Verdrehung geht nicht immer bis auf den Ausgangswert zurück. Da dies nicht in allen Versuchen auftrat, wird als Ursache vermutet, dass die Klemmung, über die die Torsion eingeleitet wurde, ihre Position am Seil nicht exakt gehalten hat.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse aller Torsionsversuche und der zugehörigen Berechnungen mit den Gleichungen aus Abschnitt 4.4 in der folgenden Tabelle zeigt eine gute Übereinstimmung.

Seil	$G_{Z,T}$ Versuch Min $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	$G_{Z,T}$ Versuch Mittel $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	$G_{Z,T}$ Versuch Max $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	$G_{Z,T}$ berechnet $\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$
OSS 12 1x37 zn	13.300	14.800	16.800	15.400
OSS 28 1x37 zn	11.600	13.700	16.000	13.400
OSS 36 1x61 zn	10.600	13.400	15.900	13.700
OSS 12 1x19 niro	11.500	12.100	13.800	11.100

Tabelle 7-4: Torsionsschubmodule aus den Versuchen

Zudem kann festgestellt werden, dass die Streuung der Versuchsergebnisse gering ist. Sie liegt in einer Größenordnung, die auch bei der Bestimmung des Verformungsmoduls üblich ist. Bei der Berechnung muss eine Annahmen zum Elastizitätsmodul der Drähte getroffen werden. Er wurde nach [9] mit  $E_D = 196.000 \text{ N/mm}^2$  für Seildraht aus Kohlenstoffstahl angesetzt. Für Seildraht aus nichtrostendem Stahl wurde ein Elastizitätsmodul von  $E_D = 150.000 \text{ N/mm}^2$  angesetzt. Alle anderen Angaben, wie die Drahtdurchmesser und die Schlaglänge, können vom Seilhersteller angegeben werden.

## 8 Herleitung weiterer Gesetzmäßigkeiten

### 8.1 Zeitliches Setzungsverhalten der Klemmkraft

#### 8.1.1 Experimentelle Untersuchung der Drahtberührungspunkte

Bei dem Versuch gemäß Abschnitt 5.7 ohne eingelegte Drähte bestätigte sich, dass, wie in der VDI-Richtlinie 2230 [24] angegeben, bei rein elastisch vorgespannter Messschrauben wie auch in der übrigen Versuchseinrichtung bei Raumtemperatur noch keine nennenswerten Relaxationsbeträge auftreten. In Bild 8-1 ist die Kraft in der Messschraube über die Zeit aufgetragen.

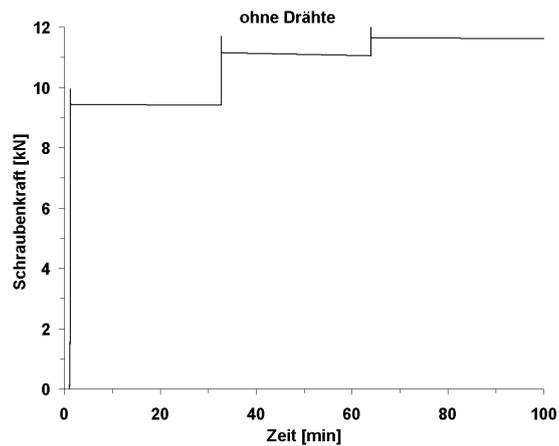


Bild 8-1: Zeitliches Setzungsverhalten der Messschraube

Bei den aus blanken Drähten aufgebauten Berührungspunkten sind in Bild 8-2 Setzungen erkennbar, deren Größe von der Last abhängt.

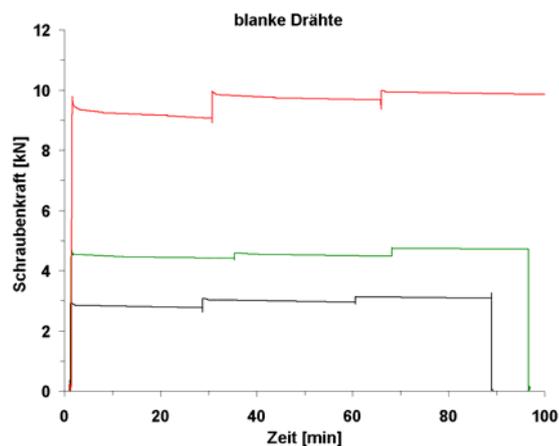


Bild 8-2: Zeitliches Setzungsverhalten der blanken Drähte

Bei den verzinkten Drähten treten deutlich größere Setzungen auf. Auch hier ist die Größe der Setzungen von der Last abhängig. Bei Drähten mit einer Verzinkung aus reinem Zink (Bild 8-3) sind die Setzungen trotz größerer Zinkschichtdicke kleiner als bei Drähten mit Crapalverzinkung (Bild 8-4).

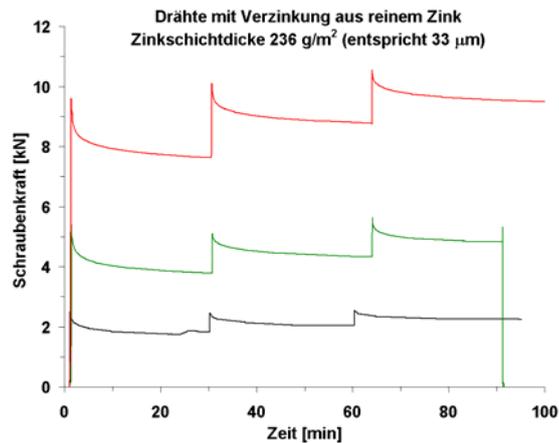


Bild 8-3: Zeitliches Setzungsverhalten der Drähte mit Verzinkung aus reinem Zink

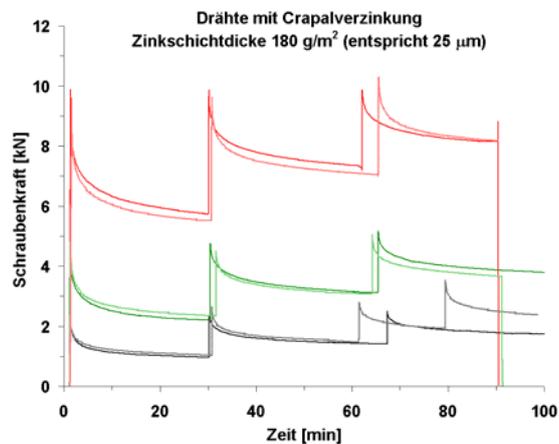


Bild 8-4: Zeitliches Setzungsverhalten der Drähte mit Crapalverzinkung

Bei den Drähten mit Crapalverzinkung wurden auf jedem Lastniveau zwei Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Streuung klein ist. Die größeren Setzungen der Drähte mit Crapalverzinkung im Vergleich zu den Drähten mit Verzinkung aus reinem Zink lassen sich folgendermaßen erklären: Beim Anziehen der Schraube wird ein Teil der Verzinkung plastisch und der Rest in einem Kriechvorgang verdrängt. Aufgrund der geringeren Festigkeit der Verzinkung aus reinem Zink wird hier beim Anziehen der Schraube bereits mehr Zink verdrängt, so dass weniger Zinkschichtdicke für den Kriechvorgang übrig bleibt.

In Bild 8-5 sind die aus verschiedenen Versuchen resultierenden Eindrücke in die Oberfläche eines Drahtes mit Crapalverzinkung zu sehen.



Bild 8-5: Eindrücke in die Oberfläche eines Drahtes mit Crapalverzinkung

Diese Versuchsergebnisse belegen, dass die Verzinkung der Drähte die Ursache für die zeitlichen Setzungen in der Klemmung ist. Eine quantitative Übertragung der Er-

gebnisse auf den Seilverbund ist aufgrund des komplexeren Aufbaus im Vergleich zu diesen Untersuchungen an den Drahtberührungspunkten leider nicht möglich.

### 8.1.2 Untersuchung der Seilklemmungen

Bei den Versuchen nach den Abschnitten 5.5 und 5.6 treten während des Anziehens der vier Schrauben der Versuchsseilklemmen auf die gewünschte Kraft bereits Setzungen auf. Das Anziehen der vier Schrauben der Versuchsseilklemmen auf die gewünschte Kraft konnte in den Versuchen nicht immer in der selben Zeit und mit der gleichen Anzahl von Anziehvorgängen durchgeführt werden. Somit ist das Anziehen der Schrauben nur eingeschränkt vergleichbar.

In Bild 8-6 ist die Querpressung eines Versuchs am in der Prüfmaschine belasteten Seil exemplarisch über die Zeit aufgetragen. Es ist zu sehen, dass die Schrauben dreimal angezogen wurden und jeweils etwa 30-minütige Setzungszeiten eingehalten wurden. Nach jedem Nachziehen der Schrauben werden die Setzungen kleiner. Im vorliegenden Fall halbieren sie sich etwa.

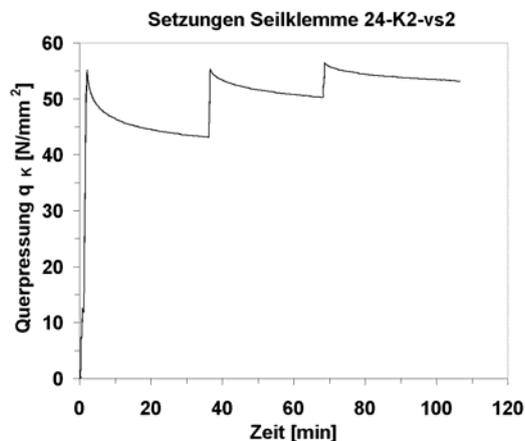


Bild 8-6: Zeitlicher Ablauf der Versuche

Alle Versuchsergebnisse sind im Anhang in Abschnitt 12.5.1 dargestellt. Zur Darstellung der Versuche wurde die Zeit nach jedem Nachziehen wieder zu Null definiert, so dass der gesamte Versuchsablauf auf einer Zeitskala von 30 Minuten dargestellt werden kann. Zusätzlich zu den Versuchsdaten sind berechnete Kurven als blässere Linie eingefügt. Die Versuchsdaten und Berechnungen sind in einem weiteren Diagramm über eine logarithmische Zeitskala aufgetragen. Die Langzeitversuche an den kurzen, abgebundenen Seilstücken sind im Anhang in Abschnitt 12.5.2 dargestellt.

Den in den Diagrammen eingetragenen Kurven liegen folgende Berechnungen zugrunde:

Mit Gl. (4-48) wird der Abfall der Schraubenvorspannkraft zum Zeitpunkt  $t = \infty$  berechnet. Die Größe der äquivalenten Verringerung des Seildurchmessers zum Zeitpunkt  $t = \infty$  wird wie folgt angesetzt:

$$\Delta d_{Z,t=\infty} = f_{S,V,t=\infty} * t_{Zink} * \frac{P_{K,1}}{75 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]} \quad (8-1)$$

Der Faktor  $f_{S,V,t=\infty}$  ist aus den Versuchsergebnissen abgeleitet und wird in der folgenden Tabelle angegeben.

$f_{S,V,t=\infty}$	
0,090	nach dem ersten Anziehen der Schrauben
0,045	nach dem zweiten Anziehen der Schrauben
0,030	nach dem dritten Anziehen der Schrauben

Tabelle 8-1: Faktor  $f_{S,V,t=\infty}$  für die offenen Spiralseile

Da die Drähte der Versuchsseile nur teilweise mit Abnahmeprüfzeugnissen EN 10204 3.1.B hinterlegt waren, wurde die Zinkschichtdicke mit den Sollwerten nach DIN 2078 [28] angesetzt. Für die Drähte der Seile OSS 16 und OSS 24 weisen die Abnahmeprüfzeugnisse um 80% größere Werte der Zinkschichtdicken aus. Beim Seil VVS 34 sind sie etwa 40-50% größer.

Für die äquivalente Verringerung  $\Delta d_{Z,t=\infty}$  des Seildurchmessers zum Zeitpunkt  $t=\infty$  wurde aufgrund der Versuchsergebnisse mit den Einzeldrähten nach Abschnitt 8.1.1 Proportionalität zur Seilpressung am Scheitel der Seilklemme angesetzt. Dazu erfolgte die Normierung mit der größten Seilpressung an den offenen Spiralseilen, die mit  $75 \text{ N/mm}^2$  bei dem Versuch 28-K3-vs2 vorlag.

Der zeitliche Verlauf des Abfalls der Schraubenvorspannkraft wird mit der Maxwell-Gruppe aus Bild 4-14 berechnet. Es werden die in der folgenden Tabelle aufgeführten Werte verwendet.

	nach dem ersten Anziehen der Schrauben	nach dem zweiten Anziehen der Schrauben	nach dem dritten Anziehen der Schrauben
$\bar{E}_0$	$F_{S,V,t=\infty}$ (Gl. (4-48))	$F_{S,V,t=\infty}$ (Gl. (4-48))	$F_{S,V,t=\infty}$ (Gl. (4-48))
$\bar{\tau}_{1,1}$ [h]	0,05	0,10	0,15
$\bar{\tau}_{1,2}$ [h]	2,67	5,33	8,00
$\bar{\tau}_{1,3}$ [h]	667	1.333	2.000

Tabelle 8-2: Eingangswerte für die Relaxationsfunktionen

Mit diesen Eingangswerten wurde eine Minimierung der Fehlerquadrate zwischen Versuchswerten und berechneten Werten erreicht.

Die zunächst für die offenen Spiralseile gefundenen Gesetzmäßigkeiten lassen sich auch auf die vollverschlossenen Spiralseile anwenden.

## 8.2 Klemmkraft bei veränderlicher Seilkraft

Die Ergebnisse der Versuche zur Untersuchung der Auswirkung einer Seilkrafterhöhung sind in Diagrammen im Anhang in Abschnitt 12.5.3 dargestellt. Die Querpresseung ist über der Seilkraft aufgetragen. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, stellt sich nach einer Seilkrafterhöhung und einer anschließenden Seilkraftreduzierung auf den Anfangswert ein gegenüber dem Ausgangszustand veränderter Zustand ein. In Bild 8-7 ist beispielhaft ein Diagramm mit einem Versuchsergebnis dargestellt.

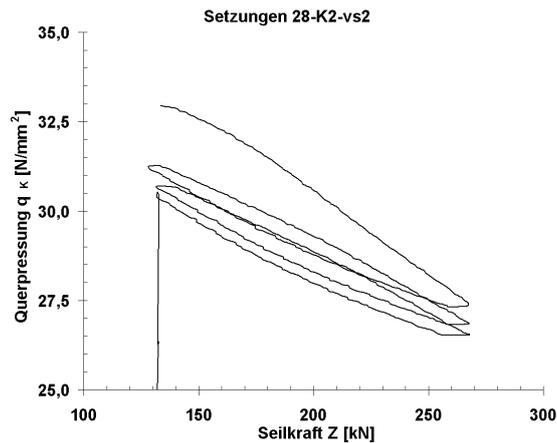


Bild 8-7: Setzungen bei einer Seilkrafterhöhung

Bei der ersten Seilkrafterhöhung nimmt die Querpressung nichtlinear ab. Dabei ist die Abnahme zunächst gering und nimmt dann zu. Dies entspricht Abschnitt 4.2.1. Bei weiteren Lastwechseln ist eine weitere Abnahme der Querpressung zu beobachten, die sich nicht mehr mit den Ansätzen aus Abschnitt 4.2.1 beschreiben lässt. Als Ursache ist denkbar, dass die Eindrückungen in die Zinkschichten an den Drahtberührungspunkten durch die Wechselbelastungen zunehmen. In diesem Fall stellt sich die Frage, ob es sich dann lediglich um eine Beschleunigung der zeitlichen Setzungen handelt, oder ob es sich um zusätzliche Setzungen handelt. Dieses Phänomen konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht werden.

In den Diagrammen im Anhang in Abschnitt 12.5.3 ist zusätzlich die mit den Grundlagen aus Abschnitt 4.2 berechnete Abnahme der Querpressung mit der Steigerung der Seilkraft als Linie hinzugefügt. Diese Linien beschreiben die in den Versuchen ermittelte Auswirkung der Seilkraftzunahme in den meisten Fällen sehr gut. Teilweise wird die Abnahme der Querpressung aber auch deutlich überschätzt. Dies relativiert sich jedoch dadurch etwas, dass die in den Versuchen aufgebrauchte Seilkrafterhöhung sehr groß gewählt wurde. In der Praxis fällt sie in der Regel deutlich geringer aus.

### 8.3 Einfluss einer zusätzlichen Umlenkung

Tragelemente, die an einer Seilklemme angeschlossen werden, können Kräfte rechtwinklig und parallel zur Seillängsachse einleiten. Für die in Bild 3-1 dargestellte Seilklemme gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten Tragelemente anzuschließen. Sie können am Seilklemmenscheitel oder im Seilklemmengrund angeschlossen werden.

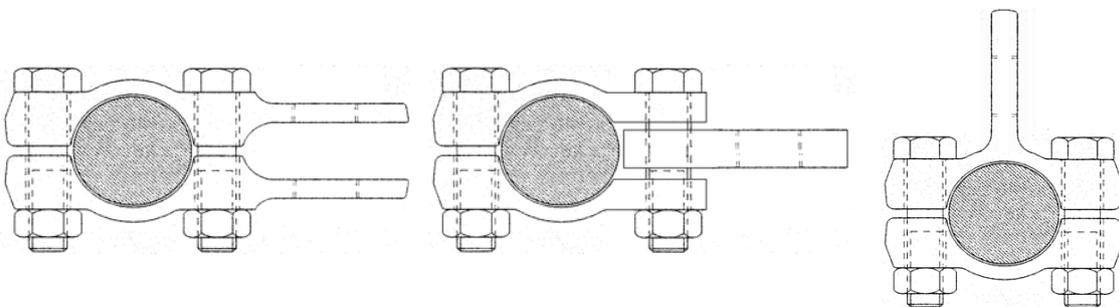


Bild 8-8: Anschlussmöglichkeiten an Seilklemmen

Der in Bild 8-8 links dargestellte Anschluss im Seilklemmengrund hat den Nachteil, dass die Anschlusslasche zweiteilig ist und die Größe des Spalts aufgrund von Tole-

---

ranzen im Seildurchmesser, ungleichmäßig montierten Seilklemmschalen und Verformungen beim Anziehen der Schrauben relativ stark variieren kann. Dies kann bei kleinem Spalt dazu führen, dass ein Anslusselement, wie z.B. ein Ösenkopf nicht in den Spalt passt oder dass sich bei großem Spalt eine ungünstige Bolzenbiegung einstellt. Der in Bild 8-8 in der Mitte dargestellte Anschluss hat ähnliche Nachteile bezüglich des ungenauen Spaltmaßes. Zudem wird die eine Klemmschraube neben der Beanspruchung auf Zug auch auf Biegung und Abscheren belastet. Bei einem Anschluss am Seilklemmscheitel, ist darauf zu achten, dass dessen Steifigkeit durch die Anschlussflasche zunimmt.

Im folgenden wird dargestellt, wie sich eine angeschlossene Kraft auf die Querpressung und somit auf die Verschiebekraft auswirkt. Umlenkkräfte, die beim An- oder Nachziehen der Schrauben bereits wirken, können stets voll als eine die Verschiebekraft erhöhende Kraft im Sinne der Klemmkraft angesetzt werden. Für Änderungen der Umlenkraft nach dem Anziehen der Schrauben gilt dies nicht immer. Eine solche Änderung kann auch lediglich zu einer Umlagerung der Querpressung von einer Seilklemmschale zur anderen führen. Dies gilt für Seilklemmen und Sättel gleichermaßen. Bild 8-9 und Bild 8-10 veranschaulichen dies. Die Klemmkraft der Schrauben wird dort mit  $Q$  und die Umlenkraft mit  $U$  bezeichnet. Die jeweils hervorgerufene Querpressung wird mit  $q$  und  $u$  bezeichnet.

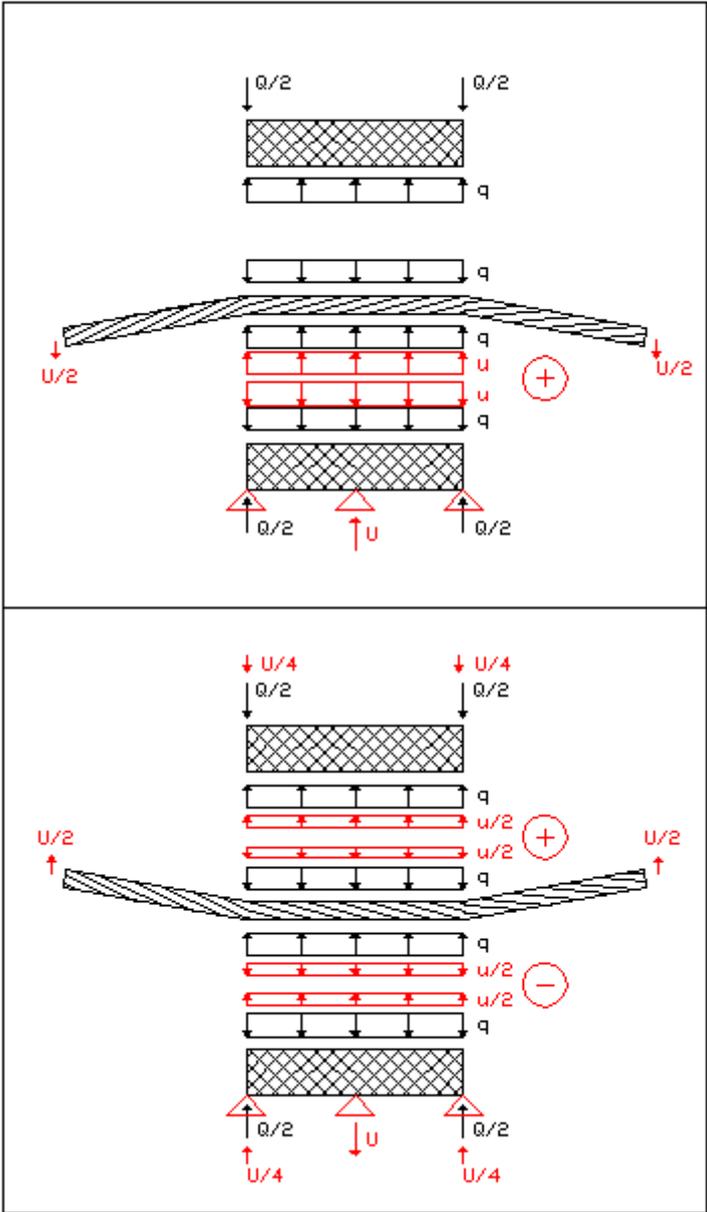


Bild 8-9: Umlenkkraft an einer Seilklemme

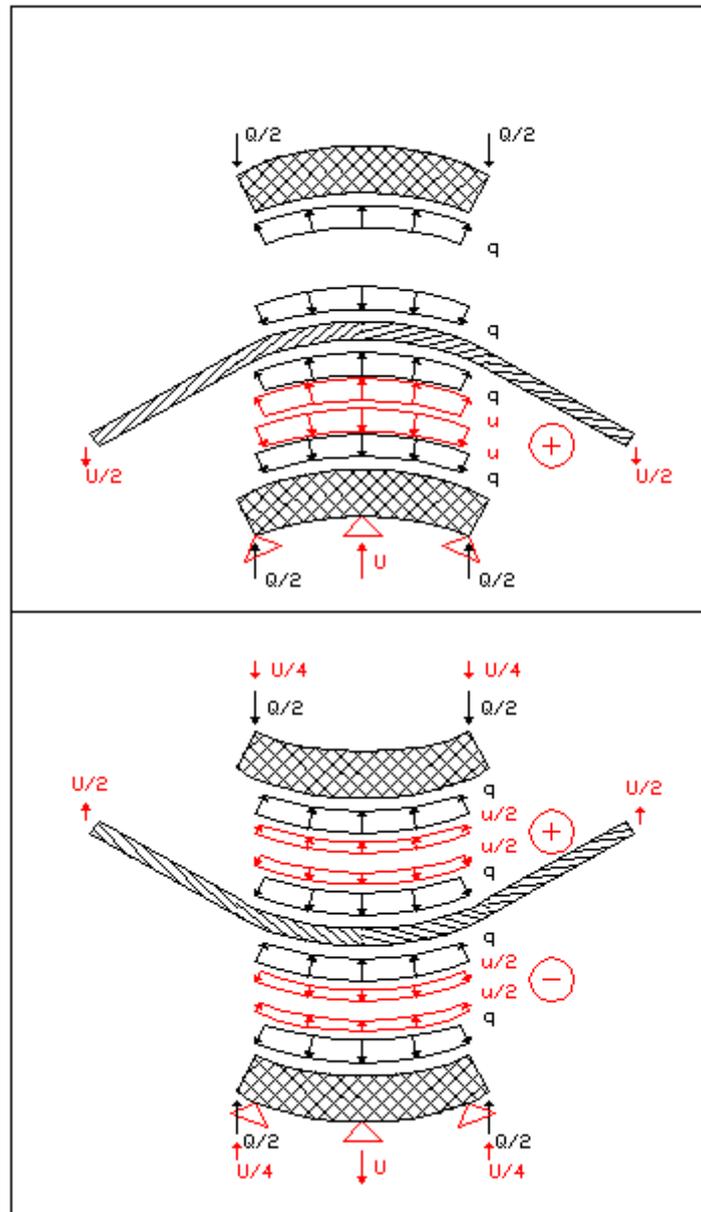


Bild 8-10: Umlenkraft an einem Sattel

Bei einer geraden Seilklemme kann die Umlenkraft für die Ermittlung der Verschiebekraft wie eine Klemmkraft angesetzt werden. Bei einer gekrümmten Seilklemme muss, wie auch in der Norm DIN V ENV 1993-2 [6] und der Entwurfsnorm prEN 1993-1-11 [7] geschehen, die Gleichung für die Seilhaftung nach Euler verwendet werden (siehe Bild 3-6).

## 9 Vorschläge zur Gestaltung und Berechnung

### 9.1 Geometrie

#### 9.1.1 Ausrundungsradien

Der Kontakt scharfer Kanten mit dem Seil und zu große Wechselbiegebelastungen sollen durch den in den Normen [1], [6] und [7] genannten Ausrundungsradius vermieden werden.

#### 9.1.2 Seilklemmennut

Im Hinblick auf eine formtreue Lagerung des Seils sollte die Seilklemmennut einen konstanten Radius besitzen. Es ist darauf zu achten, dass der Radius der Seilklemmennut größer als der halbe Seildurchmesser ist, damit das Seil bei der Montage zwängungsfrei aufgenommen werden kann. Bei einer zu kleinen Seilklemmennut kann sich der Zustand einstellen, dass das Seil beim Anziehen der Schrauben nicht mit der Innenseite des Seilklemmenscheitels in Kontakt steht, was zu beträchtlichen zusätzlichen Setzungen im Betrieb führen kann.

#### 9.1.3 Scheiteldicke

Die Seilklemmenschalen sollen sich nicht plastisch verformen. Zu große Verformungen der Seilklemmenschalen können zu einer unebenen Schraubenkopf- und Mutterauflage und zu Berührungen der Schraube mit der Bohrungswandung führen. Beides kann die Zuordnung des Anziehdrehmoments zur Vorspannkraft der Schrauben beeinflussen. Dies ist in Bild 4-9 an einem Viertelquerschnitt einer Klemmverbindung veranschaulicht.

Die Effekte sind noch wahrscheinlicher, wenn in einer Seilklemmenschale Sacklochgewinde vorgesehen sind. Zusätzlich kann dann auch eine Verkantung im Sackloch auftreten.

Im Rahmen meiner Tätigkeit an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine wurde bei Prüfungen an einer Seilklemme, deren Scheitel sich beim Anziehen der Schrauben stark verformte und damit zu einer unebenen Auflage der Schraubenköpfe und zu Berührungen der Schrauben in der Bohrungswandung führte, bei gleichem Drehmoment im Vergleich zu einer steiferen Seilklemme und sonst gleichen Bedingungen lediglich der halbe Wert der Vorspannkraft in den Schrauben erreicht.

Die Seilklemme sollte jedoch auch nicht übermäßig steif ausgebildet werden, da sie sonst nicht zur Federwirkung der Klemmverbindung beitragen kann und die zeitlichen Setzungen und die Setzungen aus einer Seilkrafterhöhung größer ausfallen.

### 9.2 Klemmkraftbeiwert

Der Klemmkraftbeiwert für zwei miteinander verzahnte Seilklemmenschalen kann bei gleichmäßig über den Seilumfang verteilter Seilpressung theoretisch den Wert  $\pi$  erreichen. Aus Bild 6-13 ist ersichtlich, dass dieser Zustand bereits bei einer um ein Prozent zu großen Seilklemmenschale nicht mehr erreicht wird. Aufgrund der Herstelltoleranzen des Seildurchmessers und des Radius der Seilklemmenschalen ist eine solche Genauigkeit nur mit erhöhtem Aufwand zu realisieren. Realistisch ist ein Unterschied zwischen dem Seildurchmesser und dem zweifachen Radius der Seilklemmennut von 4 %. Beim Klemmkraftbeiwert ist außerdem zu berücksichtigen, dass die Seilpressung aufgrund des notwendigen Abstands zwischen den beiden Seilklemmenschalen und aufgrund des Ausrundungsradius im Seilklemmengrund nicht über den gesamten Seilumfang wirken kann. In der Regel beträgt der maximal mögliche Kontaktwinkel in der Seilklemmennut etwa  $75^\circ$ .

In der folgenden Tabelle sind einige Klemmkraftbeiwerte  $\alpha_K$  berechnet, aus denen folgt, dass unter normalen Bedingungen ein Klemmkraftbeiwert von 1,10 je Seilklemmenschale auf der sicheren Seite liegend angenommen werden kann. Für größere Werte müssen Maßnahmen zur Gewährleistung eines besseren Passungsverhältnisses und/oder einer größeren Querpressung ergriffen werden.

$V_K$	$\gamma_{K,max}$	Seil	$q_K$	$\alpha_K$
[/]	[°]	[/]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[/]
1,000	90	OSS / VVS	beliebig	3,14
1,000	75	OSS / VVS	40	2,71
			100	2,71
1,040	75	OSS	40	2,10
			100	2,20
		VVS	40	2,07
			100	2,15

Tabelle 9-1: Berechnung verschiedener Klemmkraftbeiwerte

### 9.3 Sicherheitsbeiwert

In den Normen [1], [6] und [7] wird ein Teilsicherheitsbeiwert gegen ein Verschieben der Seilklemme von  $\gamma_M=1,1$  vorgesehen. Diese Größe des Teilsicherheitsbeiwerts ist meines Erachtens im Sinne eines Nachweises gegen die Streckgrenze, da bei einer Überschreitung der übertragbaren Kraft große Verformungen und somit eine Lastumlagerung im Tragwerk möglich sind. Wie in [6] geschehen, sollte auch berücksichtigt werden, ob die Reibung die Sicherheit des Tragwerks erhöht oder verringert.

Beim Nachweis gegen ein Verschieben werden in den Normen [1], [6] und [7] Umlenkkräfte angesetzt, die als Schnittgrößen mit den Teilsicherheitsbeiwerten der Einwirkungsseite behaftet sind. Das heißt, dass auf der Widerstandsseite Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkung vorliegen. Um diese zu eliminieren, ist bei Satteln ein Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M=1,65$  vorgesehen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass hier eine größere Sicherheit gegen ein Verschieben vorliegt. Um Missverständnissen vorzubeugen, sollte dieser Sachverhalt in den Normen klarer herausgestellt werden.

### 9.4 Anziehen der Schrauben

Um die Abnahme der Vorspannkraft der Schrauben durch eine Erhöhung der Seilkraft gering zu halten, müssen die Schrauben bei möglichst großer Seilkraft angezogen werden. Es ist dabei aber auch darauf zu achten, dass die bei einer Verringerung der Seilkraft zunehmende Schraubenkraft die Beanspruchbarkeit nicht überschreitet.

Die Abnahme der Vorspannung der Schrauben infolge der zeitlichen Setzungen kann deutlich reduziert werden, wenn die Schrauben drei mal angezogen werden und zwischen dem Anziehen eine Wartezeit von mindestens 30 Minuten, besser jedoch 60 Minuten eingehalten wird.

Die Abnahme der Vorspannung der Schrauben kann weiter reduziert werden, wenn die Schrauben eine möglichst große Dehnlänge besitzen und die Federwirkung der Seilklemmschalen groß ist.

### 9.5 Reibbeiwert

Die in den Versuchen im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten Reibbeiwerte gelten für unverzinkte und durch die Korundstrahlung aufgerauhte Seilklemmenden. Hierbei wurde für die offenen Spiralseile eine deutliche Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser in der Außenlage festgestellt. Der Reibbeiwert nimmt mit größer werdendem Drahtdurchmesser ab. Die in Bild 6-12 vorgenommene Extrapolation auf den

Drahtdurchmesser der Außenlage von 6 mm ergibt einen Reibbeiwert von 0,10. Dieser läge unter dem in DIN V ENV 1993-2 [6] angegebenen Wert für offene Spiralseile von 0,20. Es sollten Bauteilversuche zur Klärung dieses Sachverhaltes durchgeführt werden.

Im Rahmen meiner Tätigkeit an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine wurden auch Prüfungen mit verzinkten Seilklemmen durchgeführt. Bei bekannter Klemm- und Verschiebekraft und einer Annahme zum Klemmkraftbeiwert die mit  $\alpha_K=2,10$  in Anlehnung an Tabelle 9-1 schon gegenüber den Werten in Bild 3-6 günstiger liegt, kann man aus den Versuchsergebnissen einen Reibbeiwert berechnen. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse aufgeführt:

Seil	Seilklemme	Annahme für $\alpha_K$	Reibbeiwert $\mu$	Wirkungsgrad $\alpha_K \cdot \mu$
OSS 1x37 d=12 mm feuerverzinkt	feuerverzinkt	2,10	0,30	0,62
OSS 1x37 d=16 mm feuerverzinkt	spritzverzinkt (1 mm)	2,10	0,30	0,64
VVS 44 feuerverzinkt	spritzverzinkt (1 mm)	2,10	0,18	0,37
VVS 58 feuerverzinkt	spritzverzinkt (1 mm)	2,10	0,21	0,45
VVS 65 feuerverzinkt	spritzverzinkt (1 mm)	2,10	0,23	0,49
VVS 85 feuerverzinkt	spritzverzinkt (1 mm)	2,10	0,24	0,51

Tabelle 9-2: Reibbeiwerte aus Bauteilversuchen während meiner Tätigkeit an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Diese Werte sind im Vergleich zu den in der durch die Korundstrahlung aufgerauhten Seilklemmennut ermittelten kleiner, wobei sich die Verzinkung bei den vollverschlossenen Spiralseilen stärker auszuwirken scheint.

## 9.6 Berechnung

An einer Seilklemme, deren Geometrie der der Seilklemme 28-K3 entspricht, wird im folgenden beispielhaft eine mit den Grundlagen der vorliegenden Arbeit durchgeführte Berechnung dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die Schrauben drei mal angezogen werden.

Eingabewerte für Drähte und Seil		
	OSS [ / ]	Seilart (OSS oder VVS)
$G_{r,\theta}$	300 [N/mm <sup>2</sup> ]	Phän. Schubmodul radial tangential
$d_{z,N,0}$	28 [mm]	Seilnennendurchmesser bei Kraft Z=0
$f_z$	0,75 [ / ]	Füllfaktor des Seils
$V_z$	160.000 [N/mm <sup>2</sup> ]	Verformungsmodul des Seils
$\mu_z$	0,60 [ / ]	Querkontraktionszahl des Seils
$d_{D,i=\max}$	4,10 [mm]	Durchmesser eines Drahtes in der Außenlage
$t_{D,Zink}$	0,020 [mm]	Zinkschichtdicke auf den Drähten
$\Delta F_z$	60 [kN]	Seilkrafterhöhung

Bild 9-1: Eingabewerte für Drähte und Seil

Eingabewerte für Schrauben und Seilklemme		
$v_K$	1,040 [ / ]	Passungsverhältnis
$\gamma_{K,max}$	75 [°]	maximal möglicher Kontaktwinkel in der Seilklemme
	1,31 [rad]	
$f_{K,y,k}$	360 [N/mm <sup>2</sup> ]	Streckgrenze des Klemmenwerkstoffs
$E_K$	210.000 [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul des Klemmenwerkstoffs
$b_{K,3}$	26 [mm]	halber Schraubenabstand quer
$h_{K,1}$	19 [mm]	Scheitelhöhe der Klemme
$\mu_{z,K}$	0,21 [ / ]	Reibbeiwert zwischen Seil und Seilklemme
	2 [ / ]	Anzahl der tragenden Seilklemmschalen
$l_K$	136 [mm]	Gesamte Länge der Seilklemme in Seillängsrichtung
$l_{K,S}$	68 [mm]	Einflusslänge der Schrauben in Seillängsrichtung
$l_{S,K}$	70 [mm]	Dehnlänge der Schrauben
$E_S$	210.000 [N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul des Materials der Schrauben
$d_{S,Sp}$	15,7 [mm <sup>2</sup> ]	Spannungsdurchmesser der Schrauben
$F_{S,V,t=0}$	40 [kN]	Anfangswert der Vorspannkraft der Schrauben
$anz_S$	4 [ / ]	Anzahl der Schrauben
$n_{D,L}$	4 [ / ]	Anzahl der Drahtlagen einschließlich Kerndraht
$t_{K,Zink}$	0,100 [mm]	Zinkschichtdicke in der Seilklemmenut
$f_{S,V,t=00}$	0,030 [ / ]	Faktor zur Ermittlung des Kriechens der Zinkschichtdicke auf den Seildrähten nach dem dritten Anziehen der Schrauben

Bild 9-2: Eingabewerte für Schrauben und Seilklemme

Kontrolle der Querpressung, der Seilpressung und der Scheitelspannung			
$q_K$	42 [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Querpressung</b>	Gl. 4-11
$a_0$	-1,047 [ / ]	Faktoren zur Berechnung von $\gamma_{K,K}$	Tabelle 6-3
$a_1$	2,315 [ / ]		Gl. 6-17
$\gamma_{K,K}$	41 [°]	maximaler Kontaktwinkel in der Seilklemme	Gl. 6-18
	0,72 [rad]		
$f_K$	0,00 [ / ]	Verhältnis zwischen dem Wert $p_{K,K}$ und dem Wert $p_{K,1}$	Gl. 6-19
$c_{K,1}$	0,436 [ / ]	Konstanten für die Berechnung des Klemmkraftbeiwerts	Gl. 4-2
$c_{K,3}$	0,436 [ / ]		Gl. 4-4
$c_{K,2}$	0,117 [ / ]	Konstanten für die Berechnung der Scheitelspannung	Gl. 4-3
$c_{K,4}$	-0,117 [ / ]		Gl. 4-5
$p_{K,1}$	93 [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Seilpressung</b>	Gl. 4-12
$s_{K,1}$	196 [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Scheitelspannung</b>	Gl. 4-28

Bild 9-3: Kontrolle der Querpressung, der Seilpressung und der Scheitelspannung

Berechnung des Klemmkraftbeiwerts			
$\alpha_K$	<b>2,10</b> [ / ]	<b>Klemmkraftbeiwert</b>	Gl. 4-15
Berechnung der Nachgiebigkeit der Klemmverbindung			
$K_S$	577.085 [N/mm]	Nachgiebigkeit der Schrauben	Gl. 4-31
$K_{K,N} \cdot \pi/2$	2.549.489 [N/mm]	Nachgiebigkeit auf Ringzug	Gl. 4-36
$K_{K,M} / 2$	1.553.537 [N/mm]	Nachgiebigkeit auf Biegung	Gl. 4-41
$K_{S+K}$	<b>361.171</b> [N/mm]	<b>Gesamtnachgiebigkeit der Klemmverbindung</b>	Gl. 4-43
Berechnung der Abnahme der Schraubenvorspannkraft durch zeitliche Setzungen			
$t_{Zink}$	0,480 [mm]	Gesamtdicke des Zinks im geklemmten Querschnitt	Gl. 4-47
$\Delta d_{Z,t=00}$	0,018 [mm]	den zeitlichen Setzungen äquivalente Verringerung des Seildurchmessers	Gl. 8-1
$\Delta F_{S,V,t=00}$	<b>6,5</b> [kN]	<b>Abnahme der Schraubenvorspannkraft durch zeitliche Setzungen</b>	Gl. 4-48
Berechnung der Abnahme der Schraubenvorspannkraft durch Seilkrafterhöhung			
$\Delta F_{Z,K,M}$	47 [kN]	mittlere Seilkrafterhöhung im geklemmten Seilabschnitt	Gl. 4-42
$A_{Z,m}$	462 [mm <sup>2</sup> ]	metallischer Querschnitt des Seils	Gl. 13-1
$\Delta d_{Z,\Delta Z}$	0,011 [mm]	Verringerung des Seildurchmessers bei Seilkrafterhöhung	Gl. 4-45
$\Delta F_{S,V,\Delta Z}$	<b>3,8</b> [kN]	<b>Abnahme der Schraubenvorspannkraft durch Seilkrafterhöhung</b>	Gl. 4-44
Berechnung der dauerhaft vorhandenen Verschiebekraft			
$F_{S,V,t=00}$	30 [kN]	dauerhaft vorhandene Vorspannkraft der Schrauben	Gl. 9-1
<b>G</b>	<b>52</b> [kN]	<b>dauerhaft vorhandene Verschiebekraft</b>	Gl. 6-20
<b>G<sub>R,d</sub></b>	<b>48</b> [kN]	<b>dauerhaft vorhandene Grenzgleitkraft</b>	Gl. 9-2

Bild 9-4: Berechnung der Grenzgleitkraft

mit

$$F_{S,V,t=\infty} = F_{S,V,t=0} - \Delta F_{S,V,t=00} - \Delta F_{S,V,\Delta Z} \quad (9-1)$$

und

$$G_{R,D} = \frac{G}{\gamma_M} \quad (9-2)$$

mit

$$\gamma_M = 1,1$$

## 10 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Ausblick

### 10.1 Kontaktwinkel zwischen Seil und Seilklemmennut

- Es wurden Gleichungen entwickelt, mit denen der Kontaktwinkel in der Seilklemmennut und die Größe der Seilpressung im Seilklemmengrund für die untersuchten offenen und vollverschlossenen Spiralseile in Abhängigkeit vom Passungsverhältnis und der Querpressung berechnet werden können.
- Die untersuchten offenen Spiralseile besitzen die Bauart 1x37. Sie können unabhängig vom Durchmesser alle mit der gleichen Gesetzmäßigkeit erfasst werden.
- Die untersuchten vollverschlossenen Spiralseile mit zwei Lagen Z-Profildrähten verhalten sich steifer als die offenen Spiralseile. Mit einem konstanten Faktor kann die gleiche Gesetzmäßigkeit wie für die offenen Spiralseile verwendet werden.
- Das Spektrum der untersuchten vollverschlossenen Spiralseile ist kleiner als das der offenen Spiralseile. Es sollten weitere Versuche zur Bestätigung der gefundenen Gesetzmäßigkeit durchgeführt werden.
- Es sollten Versuche an offene Spiralseile der Bauart 1x19 und 1x61 sowie an vollverschlossenen Spiralseilen mit einer und drei Lagen Z-Profildrähten durchgeführt werden, um die Übertragbarkeit der Gesetzmäßigkeit auf diese Bauarten zu prüfen.

### 10.2 Klemmkraftbeiwert

- Mit der Kenntnis des Kontaktwinkels, der Größe der Seilpressung im Seilklemmengrund, der Annahme einer kosinusförmigen Pressungsverteilung quer zur Seillängsrichtung und einer konstanten Pressungsverteilung in Seillängsrichtung kann der Klemmkraftbeiwert berechnet werden.
- Bei einer um 4 % zu großen Seilklemmennut (Passungsverhältnis  $v_K=1,040$ ) und einem maximal möglichen Kontaktwinkel in der Seilklemmennut von  $75^\circ$  beträgt der Klemmkraftbeiwert bei einer Querpressung von  $100 \text{ N/mm}^2$  lediglich  $\alpha_K=2,20$ . Größere Werte sind nur mit erhöhtem Aufwand gezielt und reproduzierbar zu erreichen.
- Viele der bisherigen Untersuchungen und Bestrebungen zur Bestimmung der Verschiebekraft von Seilklemmen in Forschung und Praxis haben das Ziel einen großen Klemmkraftbeiwert zu erreichen. Meines Erachtens ist dies aufgrund der oben genannten Gründe von untergeordneter Bedeutung.

### 10.3 Dimensionierung des Scheitelbereichs

- Der Scheitelbereich sollte so dimensioniert werden, dass er gerade noch elastisch bleibt. Zur Berechnung der Dehnung auf dem Seilklemmenscheitel wurde für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Seilklemmengeometrie eine Gleichung entwickelt.
- In der Praxis ist es gebräuchlich, den Seilklemmenscheitel so weich auszubilden, dass sich dieser beim Anziehen der Schrauben plastisch verformt, in der Erwartung, dass sich die Seilklemmennut an das Seil legt und somit größere Passungsverhältnisse als  $v_K=1,00$  ausgleicht. Um den gesamten Scheitelbereich weich zu gestalten, wird außerdem ein abgestufter Querschnitt verwendet. Beides kann zu Flanschverformungen und damit zu einer schiefen Auflage des Schraubenkopfs sowie zu Berührungen zwischen Schraubenschaft und Bohrungswandung führen, was sich in einer Biegebelastung der Schrauben und in einer unvorteilhaften Beeinflussung der Drehmoment-Schraubkraft-Beziehung widerspiegelt. Deshalb ist von diesem Vorgehen abzuraten.

Durch den abgestuften Querschnitt wird zudem die Federwirkung der Schraube gemindert, was zu größeren Verlusten der Schraubenvorspannkraft bei Setzungen führt.

#### 10.4 Reibbeiwert

- Für die untersuchten offenen und vollverschlossenen Spiralseile und die durch die Korundstrahlung aufgerauhte Oberfläche der Seilklemmennut wurden in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser in der Außenlage stark unterschiedliche Reibbeiwerte festgestellt.

#### 10.5 Steifigkeit der Klemmverbindung

- Die Steifigkeit der Klemmverbindung setzt sich zusammen aus der Normalkraftnachgiebigkeit der Schrauben, der Biegenachgiebigkeit der Seilklemmschalen und der Normalkraftnachgiebigkeit der Seilklemmschalen auf Ringzug.
- Die erarbeiteten Gesetzmäßigkeiten erlauben für die untersuchten Klemmverbindungen eine Berechnung der zu erwartenden Setzungen.
- Die Normalkraftnachgiebigkeit der Schrauben kann in jeder Seilklemmgeometrie einfach berechnet werden. Die Nachgiebigkeiten der Seilklemmschalen muss entsprechend angepasst und überprüft werden. Auf der sicheren Seite liegend können die Nachgiebigkeiten der Seilklemme auch vernachlässigt werden.

#### 10.6 Zeitliche Setzungen in der Klemmverbindung

- Die zeitlichen Setzungen in der Klemmverbindung konnten auf Kriechvorgänge in den Zinkschichten der Drähte der Spiralseile zurückgeführt werden.
- Für die untersuchten Spiralseile wurde die Summe aller Zinkschichtdicken auf den Drähten als Einflussgröße angesetzt.
- Die Versuche an normalverzinkten und crapalverzinkten Drähten zeigen, dass bei letzteren eine größere Setzung zu erwarten ist. Dies sollte auch in Versuchen an Spiralseilen bestätigt werden.
- In weiteren Versuchen sollte überprüft werden, ob die gefundenen Gesetzmäßigkeiten auch auf Klemmverbindungen mit Spritzverzinkung in der Seilklemmennut übertragen werden können.

#### 10.7 Setzungen in der Klemmverbindung durch Erhöhung der Seilkraft

- Mit der Steifigkeit der Klemmverbindung und der Betrachtung des Seilkraftverlaufs im Bereich der Seilklemme kann die Setzung in der Klemmverbindung berechnet werden.
- Die Setzungen, die bei wiederholter Be- und Entlastung beobachtet wurden, sollten in Bauteilversuchen näher untersucht werden.

#### 10.8 Querpressung und Seilpressung

- Mit der Kenntnis des Kontaktwinkels kann die Seilpressung berechnet werden. Diese ist am Seilklemmscheitel am größten.
- Die Seilpressung ist aussagekräftiger als die Querpressung, da sie im Gegensatz zur Querpressung immer tatsächlich auftritt. Eine Beschränkung der Seilpressung wäre deshalb sinnvoller als die zur Zeit übliche Beschränkung der Querpressung.
- In von mir durchgeführten Bauteilversuchen hat sich auch bei deutlich überschrittenen Werten der in den Vorschriften angegebenen Grenzwerte der Querpressung stets herausgestellt, dass diese die Bruchlast des Seils nicht mindern. Die in den Normen festgelegten Werte der Grenzquerpressung scheinen sehr konservativ zu sein.

- 
- In Bauteilversuchen sollte untersucht werden, ab welcher Seilpressung tatsächlich eine Minderung der Bruchlast des Seils zu erwarten ist.

### **10.9 Temperatur**

- In weiteren Bauteilversuchen sollte untersucht werden, wie sich Temperaturänderungen auf die Vorspannkraft der Schrauben auswirken.

### **10.10 Finite-Element-Berechnungen**

- Es wurden phänomenologische Materialkennwerte für die untersuchten offenen und vollverschlossenen Spiralseile ermittelt. Diese ermöglichen es, den Klemmvorgang abzubilden.

---

**11 Schrifttum**

- [1] DIN 18800-1 bis 4, November 1990  
Stahlbauten  
Bemessung und Konstruktion
- [2] Beuth-Kommentare  
Stahlbauten  
Erläuterungen zu DIN 18 800 Teile 1 bis 4  
Beuth Verlag GmbH Berlin; 1998  
Ernst & Sohn Berlin
- [3] DIN 18800-7, September 2002  
Stahlbauten  
Ausführung und Herstellerqualifikation
- [4] DIN V ENV 1090-1  
Ausführung von Tragwerken aus Stahl  
Teil 1: Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbauten  
Deutsche Fassung ENV 1090-1:1996
- [5] Eurocode 3 - DIN V ENV 1993-1-1  
Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau  
Deutsche Fassung ENV 1993-1-1:1992
- [6] Eurocode 3 - DIN V ENV 1993-2  
Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten  
Teil 2: Stahlbrücken  
Beuth Verlag GmbH Berlin, 1997
- [7] Eurocode 3 - prEN 1993-1-11  
Design of steel structures  
Part 1.11: Design of structures with tension components  
Final draft  
CEN Brussels, February 2003
- [8] K. Feyrer  
Stehende Drahtseile und Seilendverbindungen  
Expert Verlag; 1990
- [9] K. Feyrer  
Drahtseile  
Bemessung, Betrieb, Sicherheit  
Springer Verlag; 2000
- [10] U. Peil  
Bauen mit Seilen  
Stahlbau-Kalender 2000  
Ernst & Sohn Berlin; 2000
- [11] K. Gabriel, J. Schlaich, u.a.  
Weitgespannte Flächentragwerke  
Seile und Bündel im Bauwesen  
Berichte zu einem Seminar  
Beratungsstelle für Stahlanwendung, Düsseldorf 1981
- [12] U. Peil, O. Einsiedler  
Untersuchung der Seilklemmen des Messeturms Neue Messe München  
Stahlbau 72  
Verlag Ernst & Sohn, 2003

- 
- [13] M. Bechtold, H.Saal  
Tragverhalten der Seilklemmen der Dachkonstruktion des Lehrter Bahnhofs  
Berlin  
Stahlbau 01/2004  
Verlag Ernst und Sohn, 2004
- [14] S. Ziegler  
Ansys auf Draht  
Infoplaner Cadfem, 2004  
und 2. Internationaler Seiltag in Stuttgart, 2005
- [15] H. Donandt  
Über die Berechnung von Treibscheiben im Aufzugbau  
Dissertation TH Karlsruhe, 1927
- [16] Th. Reye  
Zur Theorie der Zapfenreibung.  
Civilingenieur 6 (1860) S.235/54
- [17] G. Leloutre  
Les transmissions par courroies, cordes et câbles métalliques.  
Mémoire couronné par le Société Industrielle du Nord de la France a Lille  
Paris 1884
- [18] F. Beisteiner  
Versuche zur Ermittlung der Reibungszahl zwischen Seil und Seilklemme bei  
Einseil-Schwebeliften und Schleppliften  
VDI-Zeitschrift 102 (1960) Nr. 32
- [19] B. Häberle  
Pressung zwischen Drahtseil und Seilscheibe  
Dissertation  
Institut für Fördertechnik, Universität Stuttgart, 1995
- [20] SFB 64 - Hans Altmann  
Seilkonstruktionen - Untersuchungen an Klemmen für verschlossene Spiral-  
seile  
SFB 64 - Mitteilungen 5/1972
- [21] SFB 64 - Günter Mayr  
Seilkonstruktionen - Untersuchungen an verschlossenen Spiralseilen  
Werner-Verlag Düsseldorf; 1973
- [22] M. Roth  
Ermittlung von Reibwerten zwischen Seil und Klemme  
Internationale Seilbahn-Rundschau, 1973
- [23] H. Babel  
Metallische und nichtmetallische Futterwerkstoffe für Aufzugtreibscheiben  
Dissertation TH Karlsruhe, 1980
- [24] VDI-Richtlinie 2230  
Systematische Berechnung hochfester Schraubenverbindungen  
Zylindrische Einschraubenverbindungen  
Februar 2003
- [25] Wilhelm Domke  
Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung  
Girardet, 1986
- [26] Taylor Lyman  
Metals Handbook  
Band 2: Properties and selection, nonferrous alloys and special purpose mate-

- 
- rials  
ASM International, 1990
- [27] Gross, Hauger, Schnell, Wriggers  
Technische Mechanik 4  
Springer, 2002
- [28] DIN 2078, 1990  
Stahldrähte für Drahtseile
- [29] DIN 779, 1980  
Formstahldrähte für vollverschlossene Spiralseile
- [30] DIN EN 10264, 2002  
Stahldraht für Seile
- [31] DIN EN 24014, 1992  
Sechskantschrauben mit Schaft
- [32] DIN 3054, 1972  
Drahtseile aus Stahldrähten  
Spiralseil 1x37
- [33] S. G. Lechnitzky  
Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body  
Holden-Day, Inc., 1963

## 12 Anhang

### 12.1 Übersicht über die Versuchsseile

Die Belastungskennwerte werden mit den folgenden Gleichungen berechnet:

$$A_{Z,m} = f * \frac{\pi * d_{Z,N}^2}{4} \quad (12-1)$$

$$F_{Z,RBK} = A_{Z,m} * f_{D,u,k} \quad (12-2)$$

$$F_{Z,MBK} = k_{Z,S} * F_{Z,RBK} \quad (12-3)$$

$$Z_{R,d} = F_{Z,MBK} * k_{Z,e} / 1,5 / \gamma_M \quad ; \quad \gamma_M = 1,1 \quad (12-4)$$

Der Verformungsmodul des Seils nach [9] berechnet sich mit:

$$V_Z = \frac{1}{A_{Z,m}} * E_D * \sum_{i=0}^{n_{D,i}} \frac{n_{D,i} * \cos^3 \alpha_D}{1 + \mu_D * \sin^2 \alpha_D} * A_{D,i} \quad (12-5)$$

Die Querkontraktionszahl des Seils ergibt sich nach [6] aus:

$$\mu_Z = \mu_D - 0,008554 * \alpha_D + 0,001583 * \alpha_D^2 + 0,0000106 * \alpha_D^3 \quad (12-6)$$

In Tabelle 12-1 und Tabelle 12-2 bedeutet die Abkürzung zn, dass das Seil aus verzinkten Drähten und die Abkürzung niro, dass das Seil aus Drähten aus nichtrostendem Stahl aufgebaut ist.

## 12.1.1 Offene Spiralseile

	OSS 1x37 12 zn	OSS 1x37 16 zn	OSS 1x37 20 zn	OSS 1x37 24 zn	OSS 1x37 28 zn	OSS 1x37 36 zn	OSS 1x19 12 niro	Bemerkung	
Draht- oberfläche	crapalbeschichtet (normalverzinkt nach DIN 2078 [24])						blank		
Seilgrund- schmierung	Innenlage mit Zinkstaubfarbe, Außenlage trocken						keine		
Schlagrichtung der Außenlage	rechts								
Endverbindung	Aufgerollt oder aufgepresst mit Außengewinde								
Drahtaufbau	1 x 1,87 6 x 1,75 12 x 1,77 18 x 1,77	1 x 2,48 6 x 2,32 12 x 2,35 18 x 2,35	1 x 3,05 6 x 2,90 12 x 2,90 18 x 2,90	1 x 3,70 6 x 3,40 12 x 3,40 18 x 3,40	1 x 4,10 6 x 4,10 12 x 4,10 18 x 4,10	1 x 4,30 6 x 4,00 12 x 4,00 18 x 4,00 24 x 4,00	1 x 2,62 6 x 2,45 12 x 2,48		
$b_{Sch,4}$	[mm]	119	150	220	238	289	363	112	gemessen
$\alpha_{D,4}$	[°]	15,7	16,5	14,1	15,3	15,0	15,6	15,7	berechnet
$f_z$	[--]	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,76	nach DIN 18800 [1]
$k_{z,s}$	[--]	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	nach DIN 18800 [1]
$k_{z,e}$	[--]	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	nach Zulassung
$f_{D,u,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	1.770	1.770	1.770	1.770	1.770	1.770	1.570	Nenngröße
$d_{z,N}$	[mm]	12	16	20	24	28	36	12	Nenngröße
$A_{z,m}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	85	151	236	339	462	763	86	mit Gl. 13-1
$F_{z,RBK}$	[kN]	150	267	417	601	817	1.351	135	mit Gl. 13-2
$F_{z,MBK}$	[kN]	131	232	363	522	711	1.176	119	mit Gl. 13-3
$Z_{R,d}$	[kN]	79	141	220	317	431	712	72	mit Gl. 13-4
$V_z$	[N/mm <sup>2</sup> ]	172.000	169.000	176.000	173.000	174.000	172.000	132.000	mit Gl. 13-5
$V_z$	[N/mm <sup>2</sup> ]	170.000	181.000	166.000	172.000	-----	-----	131.000	gemessen
$\mu_z$	[--]	0,60	0,64	0,52	0,58	0,56	0,59	0,60	mit Gl. 13-6
$G_{z,T}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	15.400	16.500	11.700	12.700	13.400	13.700	11.100	mit Gl. 4-64

Tabelle 12-1: Kennwerte der offenen Spiralseile

Folgende Seildurchmesser wurden gemessen:

		OSS 1x37 12 zn		OSS 1x37 16 zn		OSS 1x37 20 zn		OSS 1x37 24 zn		OSS 1x37 28 zn		OSS 1x37 36 zn		OSS 1x19 12 niro	
		10%	80%	10%	80%	10%	80%	10%	80%	10%	80%	10%	80%	10%	80%
Seil- kraft		$Z_{R,d}$	$Z_{R,d}$	$Z_{R,d}$	$Z_{R,d}$										
Lage 1	Wert 1	11,99	11,99	16,39	16,26	20,23	20,19	24,55	24,42	28,20	28,13	nicht gemessen	nicht gemessen	12,30	
	Wert 2	12,03	11,96	16,45	16,42	20,26	20,20	24,49	24,39	28,20	28,12			12,10	
Lage 2	Wert 1	12,01	12,01	16,36	16,25	20,23	20,19	24,54	24,42	28,17	28,12			12,20	
	Wert 2	12,04	12,00	16,43	16,41	20,25	20,22	24,49	24,42	28,17	28,13			12,30	
	Mittel- wert	12,02	11,99	16,41	16,34	20,24	20,20	24,52	24,41	28,19	28,13			12,20	

Tabelle 12-2: Seildurchmesser der offenen Spiralseile in mm

### 12.1.2 Vollverschlossene Spiralseile

		VVS-2 34	VVS-2 42	Bemerkung
Draht- oberfläche		Runddrähte dickverzinkt Profildrähte crapalbeschichtet (dickverzinkt nach DIN 2078 [24])		
Seilgrund- schmierung		Innenlage mit Zinkstaubfarbe, Außenlage trocken		
Schlagrichtung der Außenlage		rechts		
Endverbindung		Gabelkopfvergussfitting		
Drahtaufbau		1 x 3,77 6 * 3,67 6 x 1,50 12 x 3,43 20 x Z4,20 26 x Z4,20	1 x 3,77 6 * 3,67 12 x 3,43 21 x Z5 28 x Z5	
$l_{b, Sch, S}$	[mm]	320	395	gemessen
$\alpha_{D, S}$	[°]	18,2	16,5	berechnet
$f_z$	[--]	0,84	0,84	nach DIN 18800 [1]
$k_{Z, S}$	[--]	0,95	0,95	nach DIN 18800 [1]
$k_{Z, e}$	[--]	1,00	1,00	nach DIN 18800 [1]
$f_{D, u, k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	1.570	1.618	Nenngröße
$d_{Z, N}$	[mm]	34	42	Nenngröße
$A_{Z, m}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	784	1.217	mit Gl. 13-1
$F_{Z, RBK}$	[kN]	1.231	1.969	mit Gl. 13-2
$F_{Z, MBK}$	[kN]	1.169	1.871	mit Gl. 13-3
$Z_{R, d}$	[kN]	709	1.134	mit Gl. 13-4
$V_z$	[N/mm <sup>2</sup> ]	164.000	169.000	mit Gl. 13-5
$V_z$	[N/mm <sup>2</sup> ]	163.500	175.000	gemessen
$\mu_z$	[--]	0,74	0,64	mit Gl. 13-6
$G_{Z, T}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	23.200	15.300	mit Gl. 4-64

Tabelle 12-3: Kennwerte der vollverschlossenen Spiralseile

Folgende Seildurchmesser wurden gemessen:

		VVS-2 34		VVS-2 42	
Seil- kraft		10% $Z_{R, d}$	80% $Z_{R, d}$	10% $Z_{R, d}$	80% $Z_{R, d}$
Lage 1	Wert 1	34,49	34,32	42,91	42,82
	Wert 2	34,45	34,39	42,95	42,84
Lage 2	Wert 1	34,39	34,30	42,81	42,71
	Wert 2	34,49	34,41	42,96	42,82
	Mittel- wert	34,46	34,36	42,91	42,80

Tabelle 12-4: Seildurchmesser der vollverschlossenen Spiralseile in mm

## 12.2 Übersicht über die Versuchsklemmen

### 12.2.1 Allgemeines

Die Bezeichnung der Seilklemmen beginnt mit dem Seildurchmesser. Mit einem Bindestrich verbunden ist der Buchstabe K und direkt anschließend eine laufende Nummer.

Der Radius  $r_K$  der Seilklemmennut wurde an beiden Enden längs der Seilklemmennut unter einem Mikroskop unter 10-facher Vergrößerung gemessen. Die Scheitelhöhe  $h_{K,1}$  wurde mit einer Schieblehre gemessen. Diese Abmessungen werden mit den ermittelten Größen, die restlichen Abmessungen mit ihren Sollwerte angegeben. Die verwendeten Bezeichnungen sind zu Beginn der Arbeit und in Bild 12-1 erläutert.

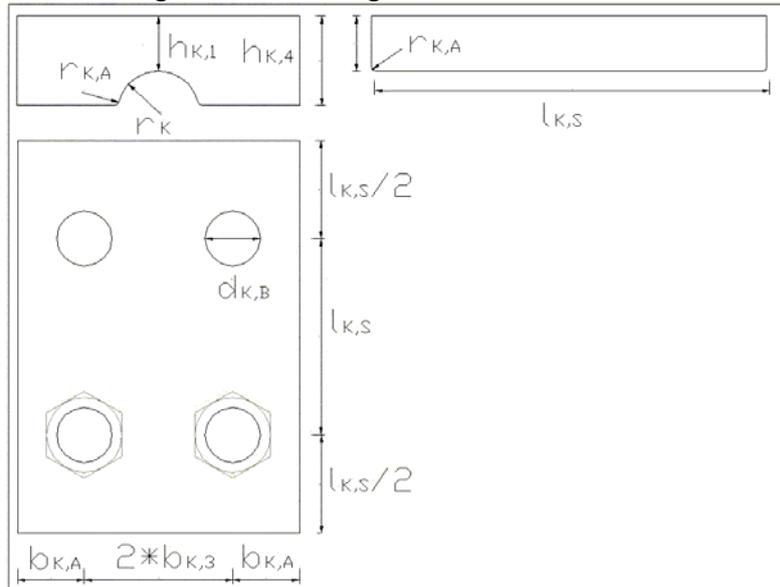


Bild 12-1: Bezeichnungen für die Seilklemmenabmessungen

### 12.2.2 Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=12 mm

	12-K1	12-K2	12-K3	12-K4	12-K1	12-K2	12-K3	12-K4
	Abmessung				$v_K$ bei 10% $Z_{R,d}$			
$r_K$	6,14	6,15	6,31	6,43	1,022	1,023	1,050	1,070
	Abmessung				Abmessung / $d_z$ bei 10% $Z_{R,d}$			
$h_{K,1}$	7,82	4,80	7,83	4,81	0,65	0,40	0,65	0,40
$h_{K,4}$	13,0	10,0	13,0	10,0	1,08	0,83	1,08	0,83
$l_{K,S}$	30,0				2,50			
$b_{K,3}$	11,5				0,96			
$b_{K,a}$	10,0				0,83			
$d_{K,b}$	8,5				0,71			
$r_{K,a}$	0,9				0,07			
Schrauben M8 8.8 nach EN 24014								

Tabelle 12-5: Abmessungen in mm der Seilklemmen für das Seil OSS d=12mm ( $d_z$  bei 10% $Z_{R,d}$  = 12,02 mm)

### 12.2.3 Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=16 mm

	16-K1	16-K2	16-K1	16-K2
	Abmessung		$v_K$ bei 10% $Z_{R,d}$	
$r_K$	8,29	8,55	1,012	1,044
	Abmessung		Abmessung / $d_z$ bei 10% $Z_{R,d}$	
$h_{K,1}$	11,05	11,05	0,67	0,67
$h_{K,4}$	18,0		1,10	0,00
$l_{K,s}$	40,0		2,44	
$b_{K,3}$	16,0		0,98	
$b_{K,a}$	13,0		0,79	
$d_{K,b}$	13,0		0,79	
$r_{K,a}$	0,8		0,05	
Schrauben M12 8.8 nach EN 24014				

Tabelle 12-6: Abmessungen in mm der Seilklemmen für das Seil OSS d=16mm  
( $d_z$  bei 10% $Z_{R,d}$  = 16,38 mm)

### 12.2.4 Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=20 mm

	20-K1	20-K2	20-K3	20-K1	20-K2	20-K3
	Abmessung			$v_K$ bei 10% $Z_{R,d}$		
$r_K$	10,04	10,19	10,34	0,992	1,007	1,022
	Abmessung			Abmessung / $d_z$ bei 10% $Z_{R,d}$		
$h_{K,1}$	13,53	13,53	13,54	0,67	0,67	0,67
$h_{K,4}$	22,0			1,09	0,00	0,00
$l_{K,s}$	50,0			2,47		
$b_{K,3}$	19,0			0,94		
$b_{K,a}$	17,0			0,84		
$d_{K,b}$	15,0			0,74		
$r_{K,a}$	1,0			0,05		
Schrauben M14 8.8 nach EN 24014						

Tabelle 12-7: Abmessungen in mm der Seilklemmen für das Seil OSS d=20mm  
( $d_z$  bei 10% $Z_{R,d}$  = 20,24 mm)

### 12.2.5 Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=24 mm

	24-K1	24-K2	24-K1	24-K2
	Abmessung		$v_K$ bei 10% $Z_{R,d}$	
$r_K$	12,30	12,67	1,003	1,033
	Abmessung		Abmessung / $d_z$ bei 10% $Z_{R,d}$	
$h_{K,1}$	16,06	16,04	0,65	0,65
$h_{K,4}$	26,5		1,08	0,00
$l_{K,s}$	60,0		2,45	
$b_{K,3}$	23,0		0,94	
$b_{K,a}$	20,0		0,82	
$d_{K,b}$	17,0		0,69	
$r_{K,a}$	1,2		0,05	
Schrauben M16 8.8 nach EN 24014				

Tabelle 12-8: Abmessungen in mm der Seilklemmen für das Seil OSS d=24mm  
( $d_z$  bei 10% $Z_{R,d}$  = 24,52 mm)

### 12.2.6 Seilklemmen am offenen Spiralseil 1x37 d=28 mm

	28-K1	28-K2	28-K3	28-K4	28-K1	28-K2	28-K3	28-K4
	Abmessung				$v_K$ bei 10% $Z_{R,d}$			
$r_K$	14,11	14,11	14,76	14,79	1,003	1,003	1,049	1,052
	Abmessung				Abmessung / $d_z$ bei 10% $Z_{R,d}$			
$h_{K,1}$	18,62	11,66	18,69	11,61	0,66	0,41	0,66	0,41
$h_{K,4}$	31,0	24,0	31,0	24,0	1,10	0,85	1,10	0,85
$l_{K,s}$	68,0				2,42			
$b_{K,3}$	25,5				0,91			
$b_{K,a}$	23,0				0,82			
$d_{K,b}$	19,0				0,68			
$r_{K,a}$	1,5				0,05			
Schrauben M18 8.8 nach EN 24014								

Tabelle 12-9: Abmessungen in mm der Seilklemmen für das Seil OSS d=28mm  
( $d_z$  bei 10% $Z_{R,d}$  = 28,13 mm)

### 12.2.7 Seilklemmen am vollverschlossenen Spiralseil VVS-2 d=34 mm

	34-K1	34-K2	34-K3	34-K1	34-K2	34-K3
	Abmessung			$v_k$ bei 10% $Z_{R,d}$		
$r_k$	17,25	17,50	17,75	1,001	1,016	1,030
	Abmessung			Abmessung / $d_z$ bei 10% $Z_{R,d}$		
$h_{k,1}$	23,50	23,50	23,50	0,68	0,68	0,68
$h_{k,4}$	37,50			1,09	0,00	0,00
$l_{k,s}$	85,00			2,47		
$b_{k,3}$	32,00			0,93		
$b_{k,a}$	28,00			0,81		
$d_{k,b}$	24,00			0,70		
$r_{k,a}$	2,00			0,06		
Schrauben M22 8.8 nach EN 24014						

Tabelle 12-10: Abmessungen in mm der Seilklemmen für das Seil VVS-2 d=34mm  
( $d_z$  bei 10% $Z_{R,d}$  = 34,46 mm)

### 12.2.8 Seilklemmen am vollverschlossenen Spiralseil VVS-2 d=34 mm

	42-K1	42-K1
	Abmessung	$v_k$ bei 10% $Z_{R,d}$
$r_k$	21,80	1,015
	Abmessung	Abmessung / $d_z$ bei 10% $Z_{R,d}$
$h_{k,1}$	29,50	0,69
$h_{k,4}$	47,00	1,09
$l_{k,s}$	105,00	2,44
$b_{k,3}$	40,00	0,93
$b_{k,a}$	35,00	0,81
$d_{k,b}$	29,00	0,68
$r_{k,a}$	2,50	0,06
Schrauben M27 8.8 nach EN 24014		

Tabelle 12-11: Abmessungen in mm der Seilklemmen für das Seil VVS-2 d=42mm  
( $d_z$  bei 10% $Z_{R,d}$  = 42,91 mm)

## 12.3 Ergebnisse der Verschiebeversuche und –berechnungen

### 12.3.1 Scheiteldehnung

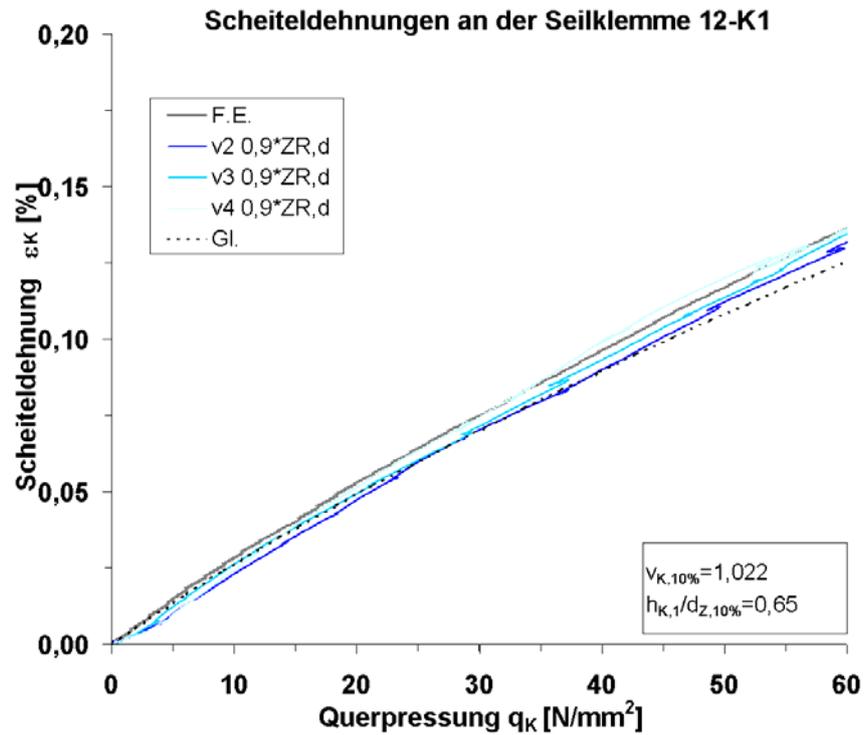


Bild 12-2: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 12-K1

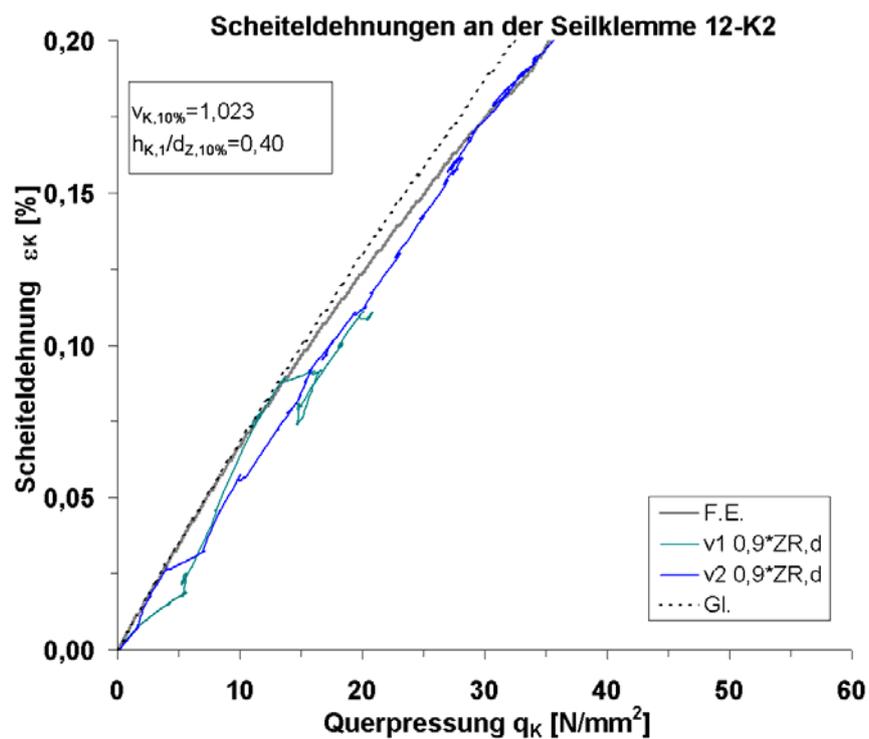


Bild 12-3: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 12-K2

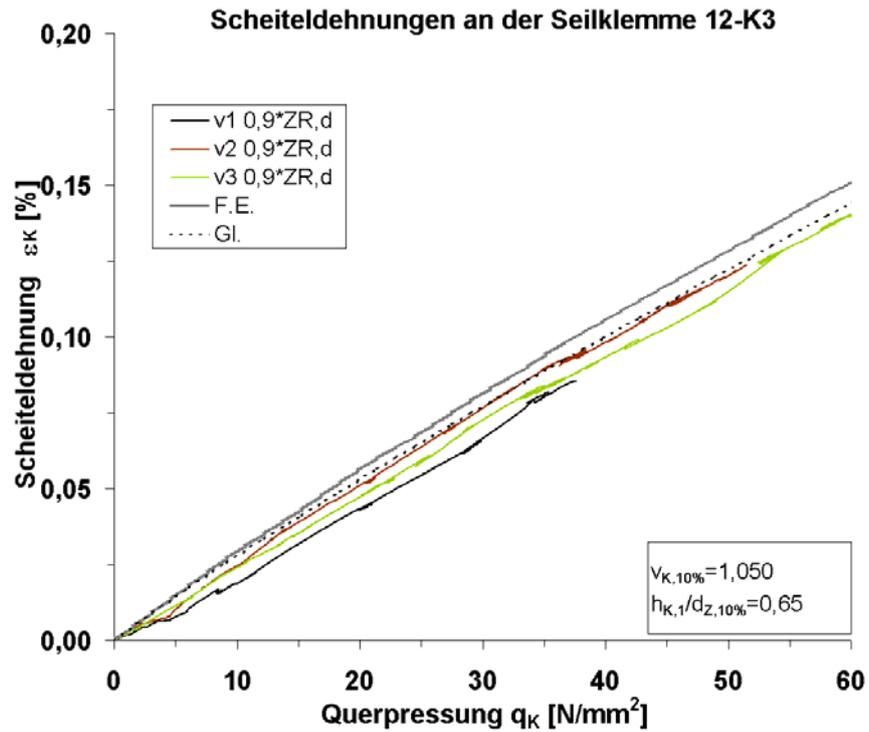


Bild 12-4: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 12-K3

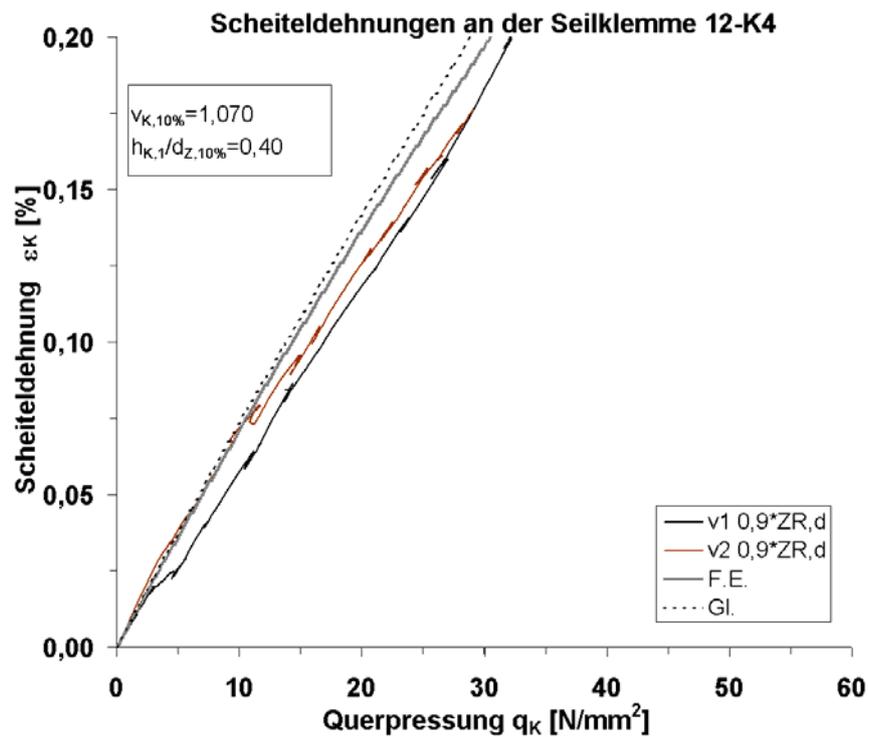


Bild 12-5: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 12-K4

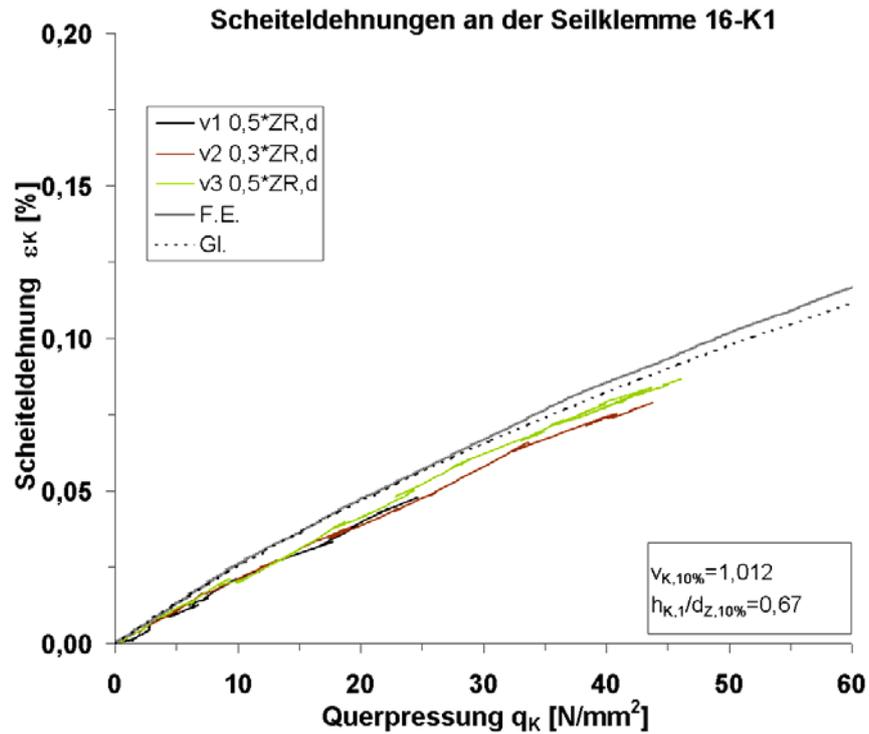


Bild 12-6: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 16-K1

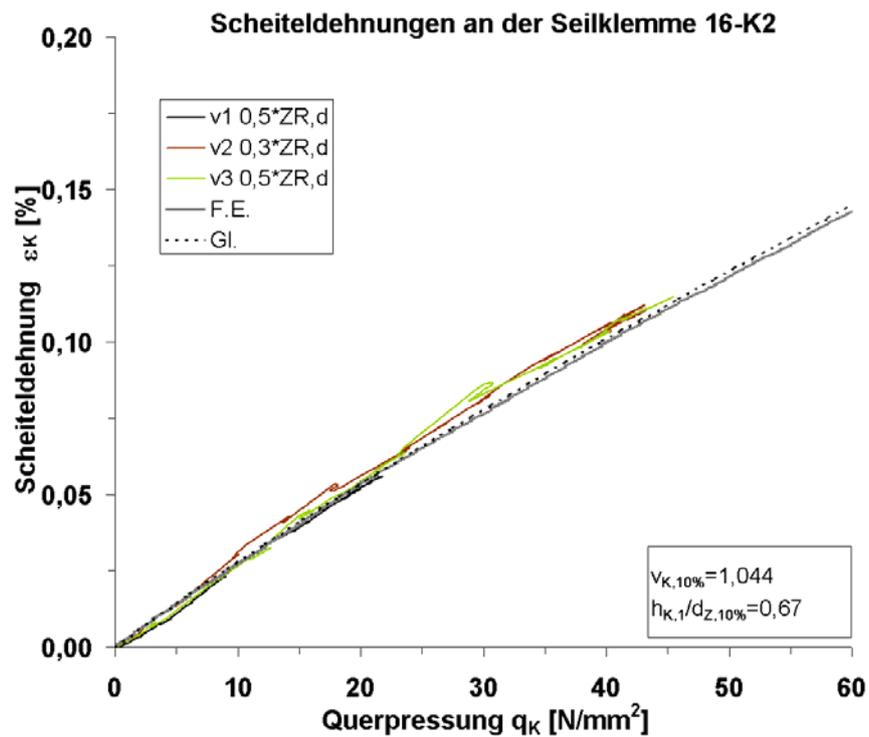


Bild 12-7: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 16-K2

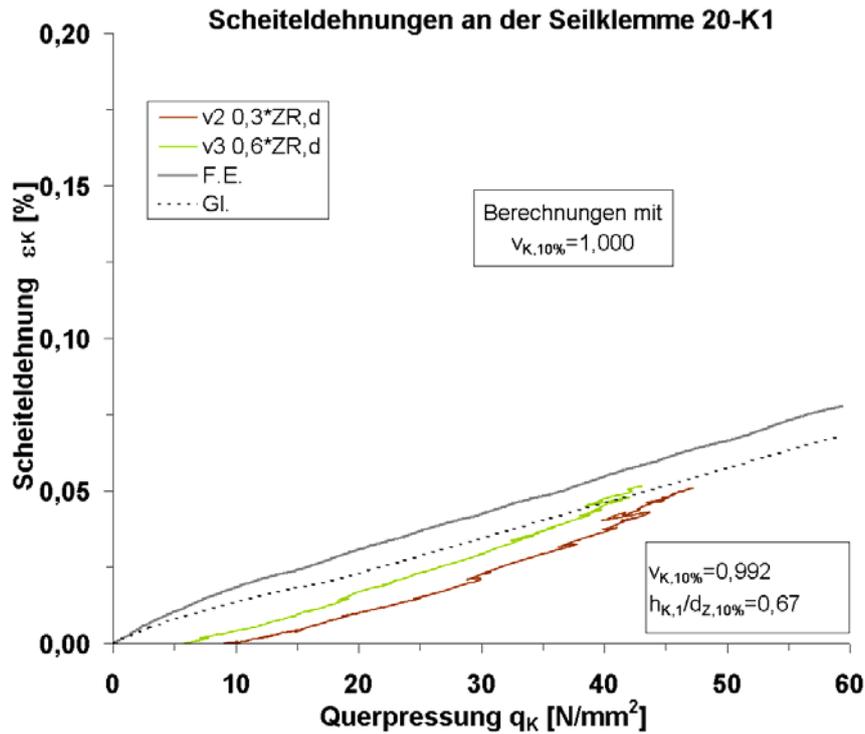


Bild 12-8: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 20-K1

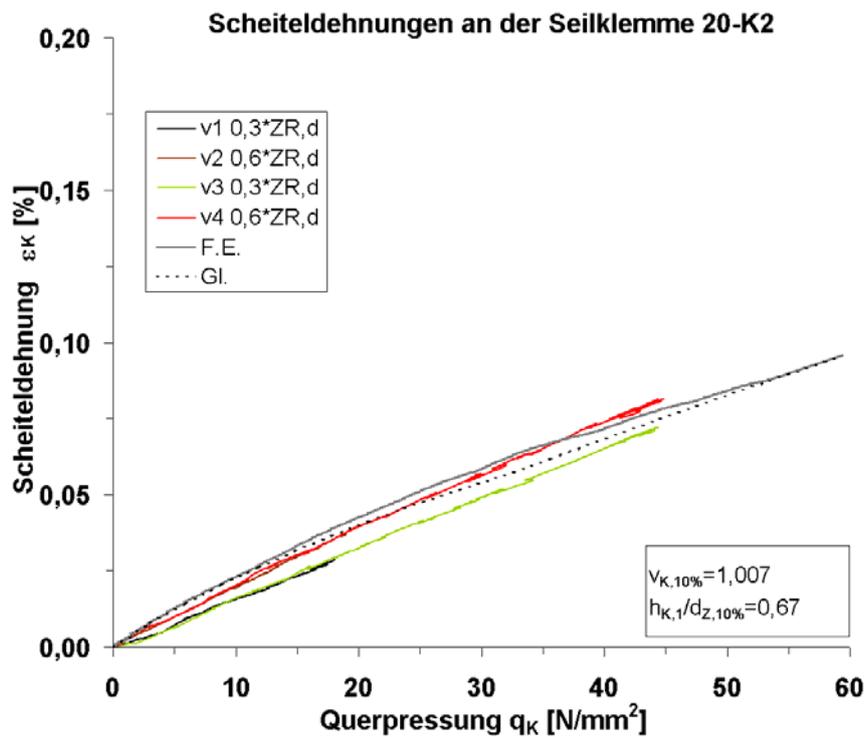


Bild 12-9: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 20-K2

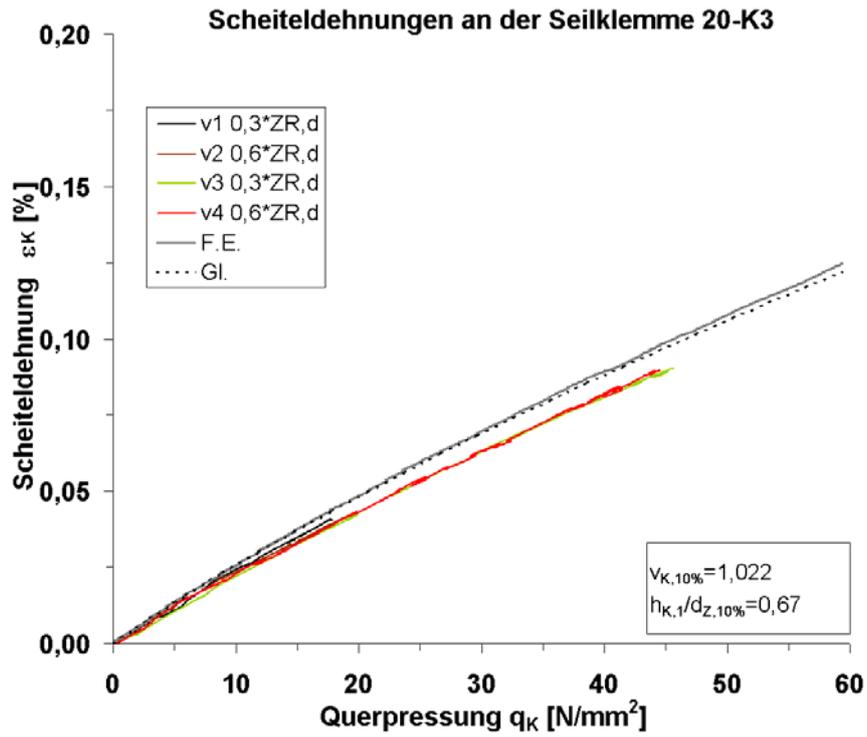


Bild 12-10: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 20-K3

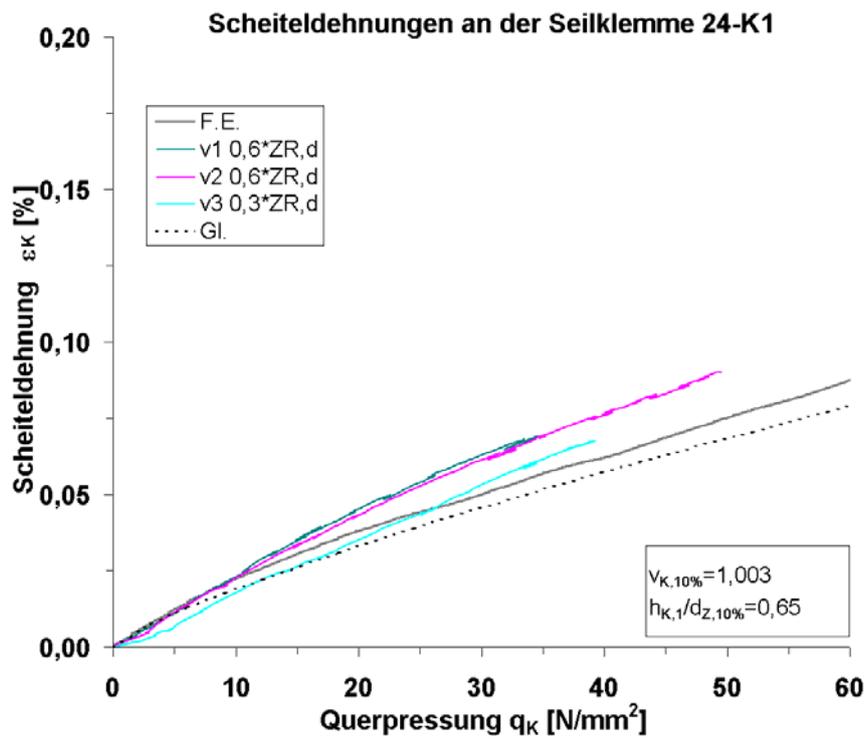


Bild 12-11: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 24-K1

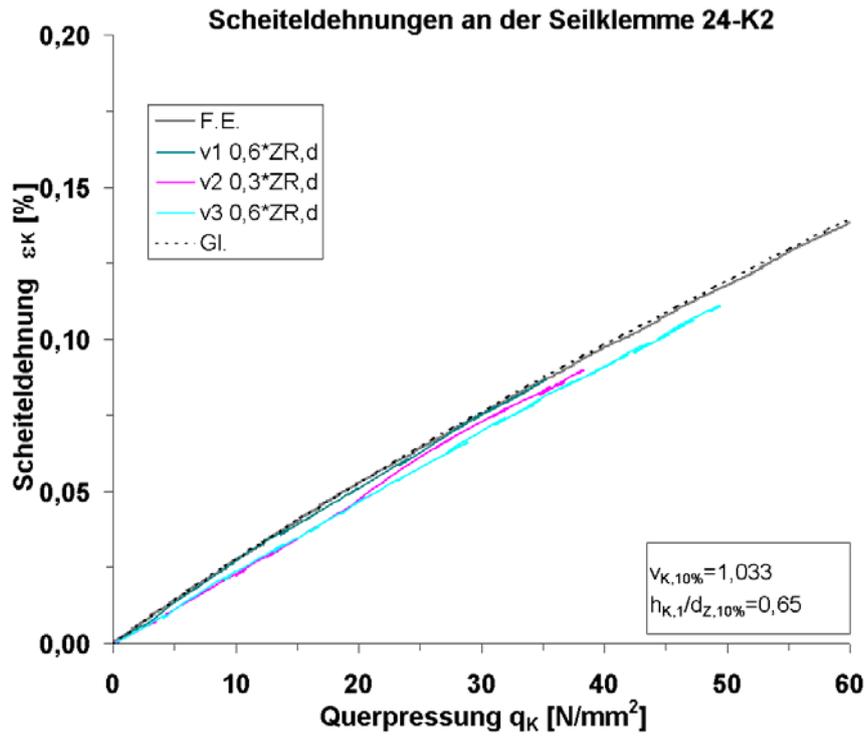


Bild 12-12: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 24-K2

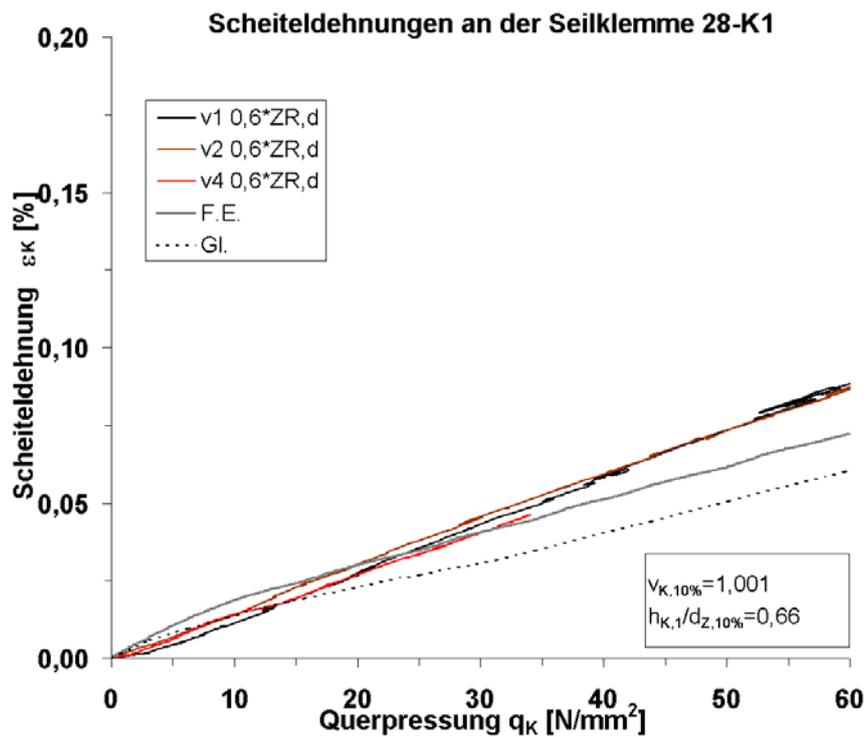


Bild 12-13: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 28-K1

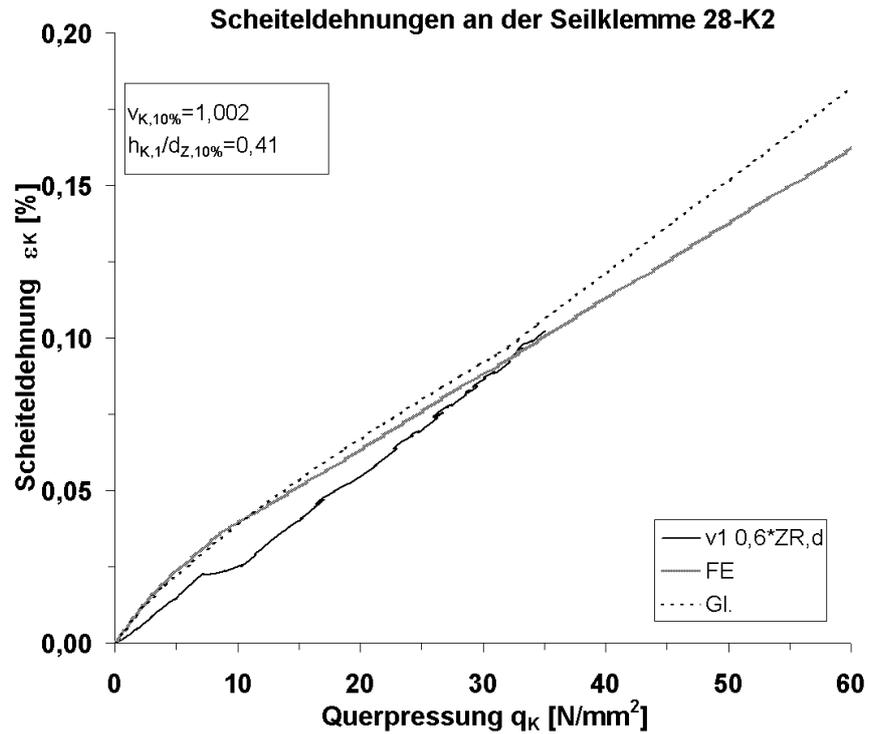


Bild 12-14: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 28-K2

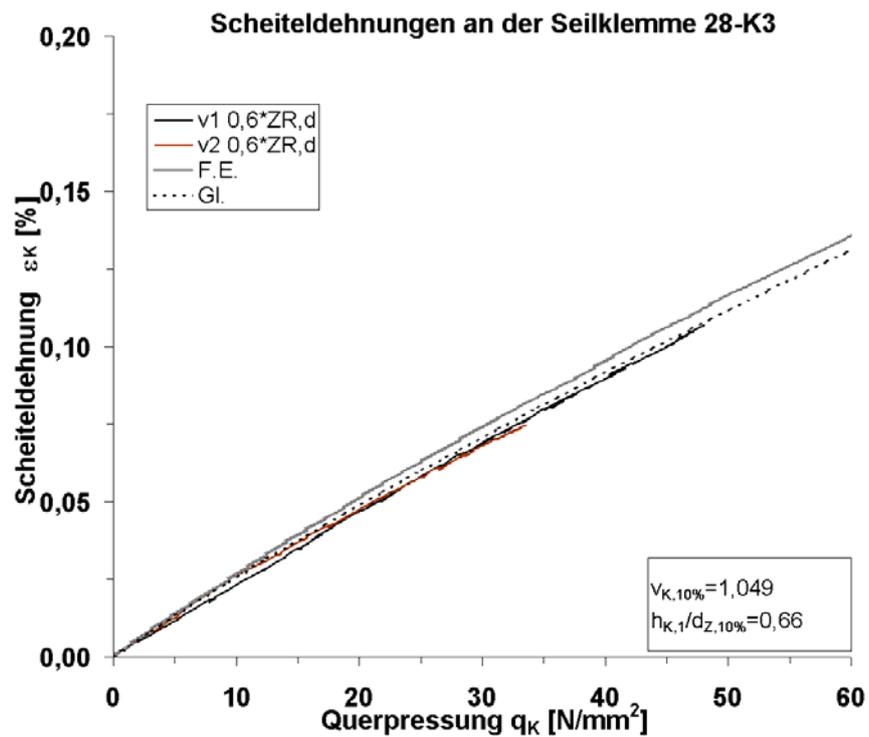


Bild 12-15: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 28-K3

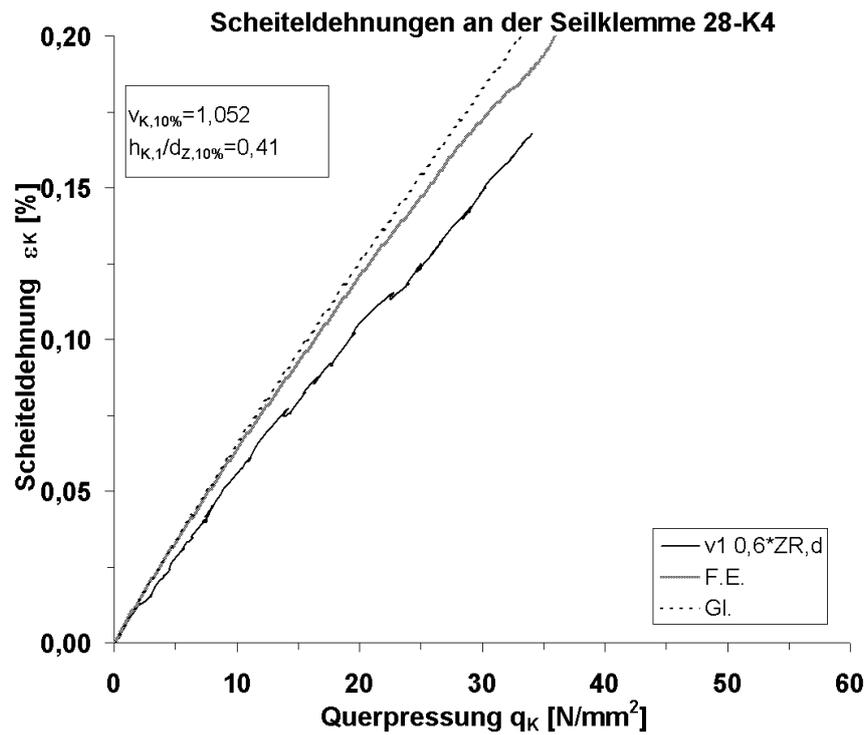


Bild 12-16: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 28-K4

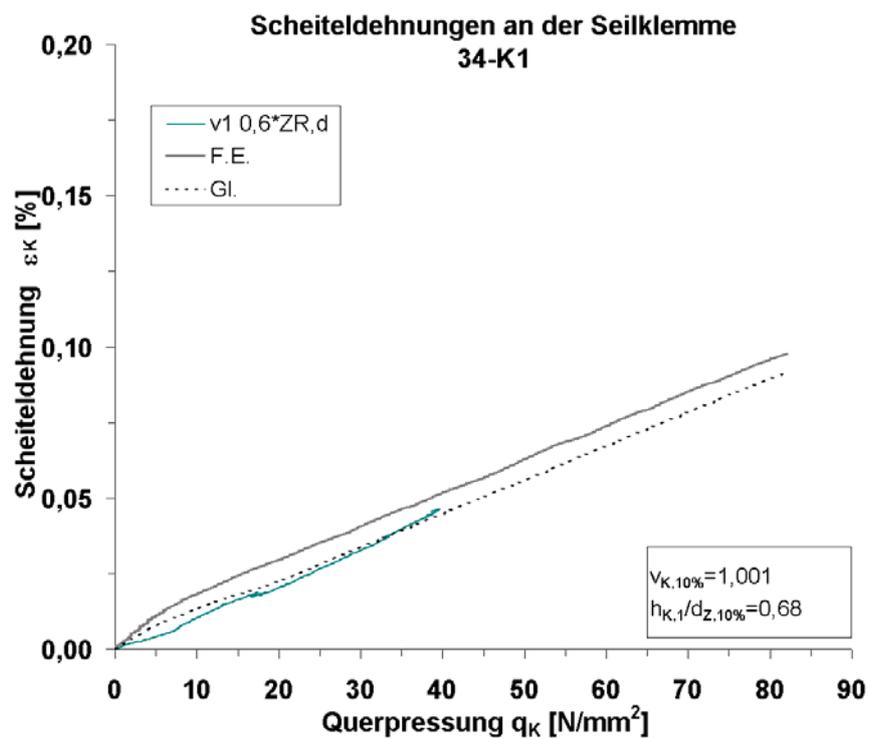


Bild 12-17: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 34-K1

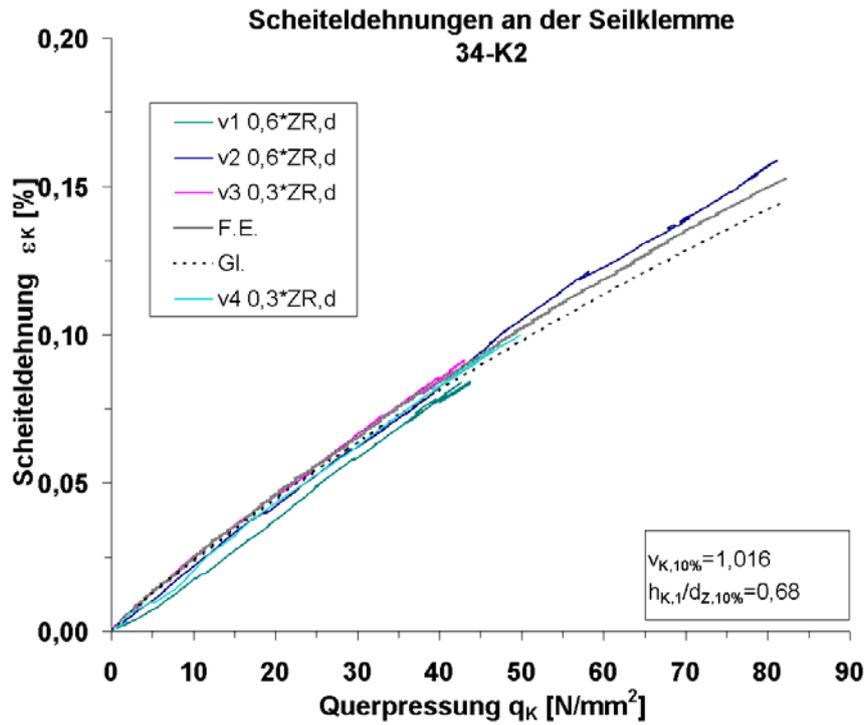


Bild 12-18: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 34-K2

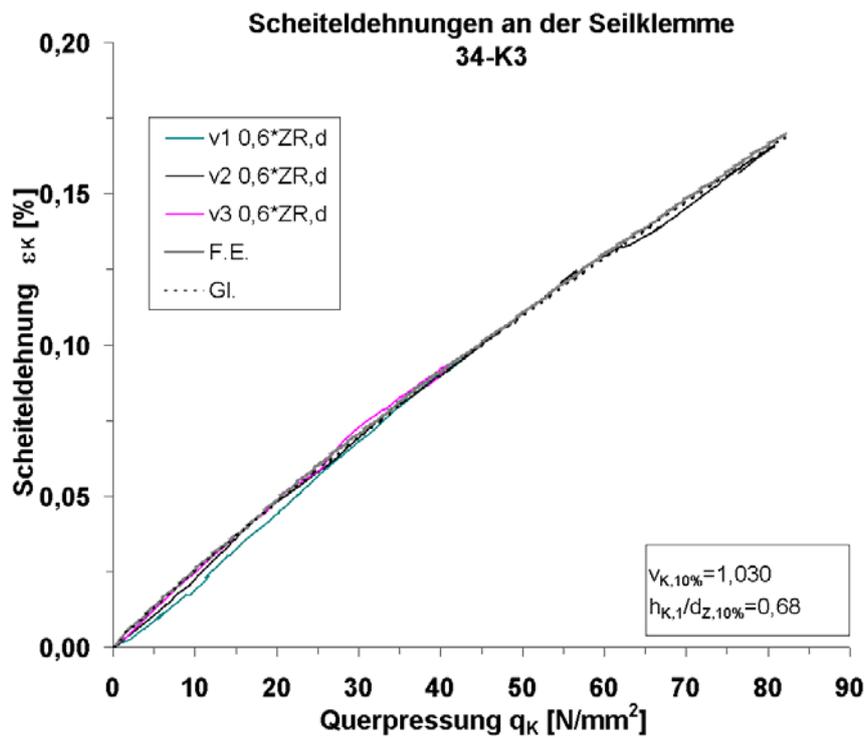


Bild 12-19: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 34-K3

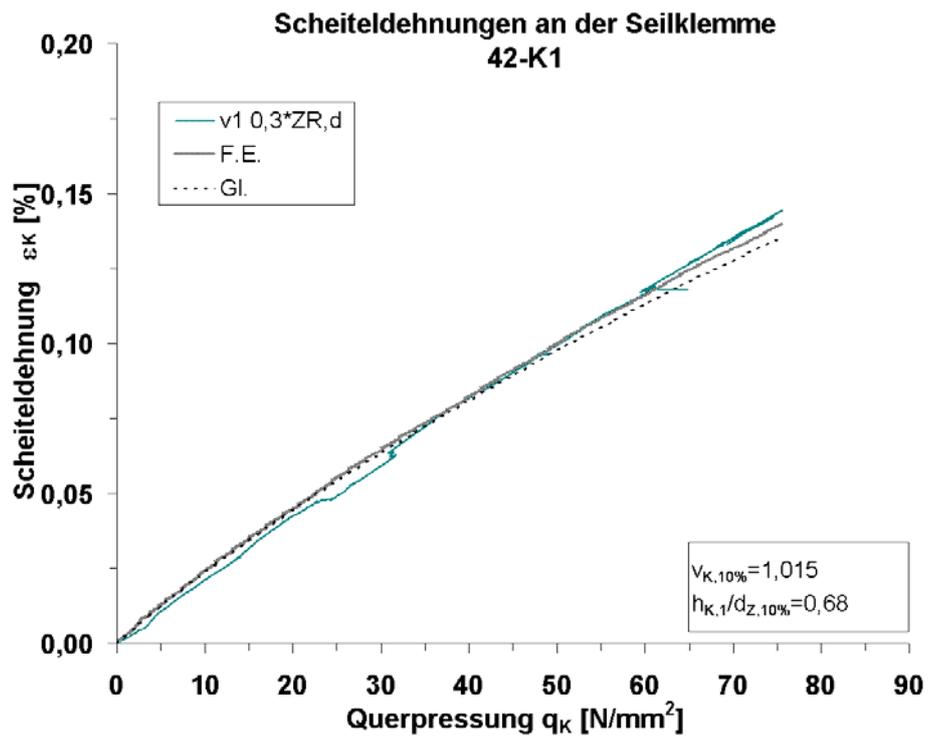


Bild 12-20: Scheiteldehnungen an der Seilklemme 42-K1

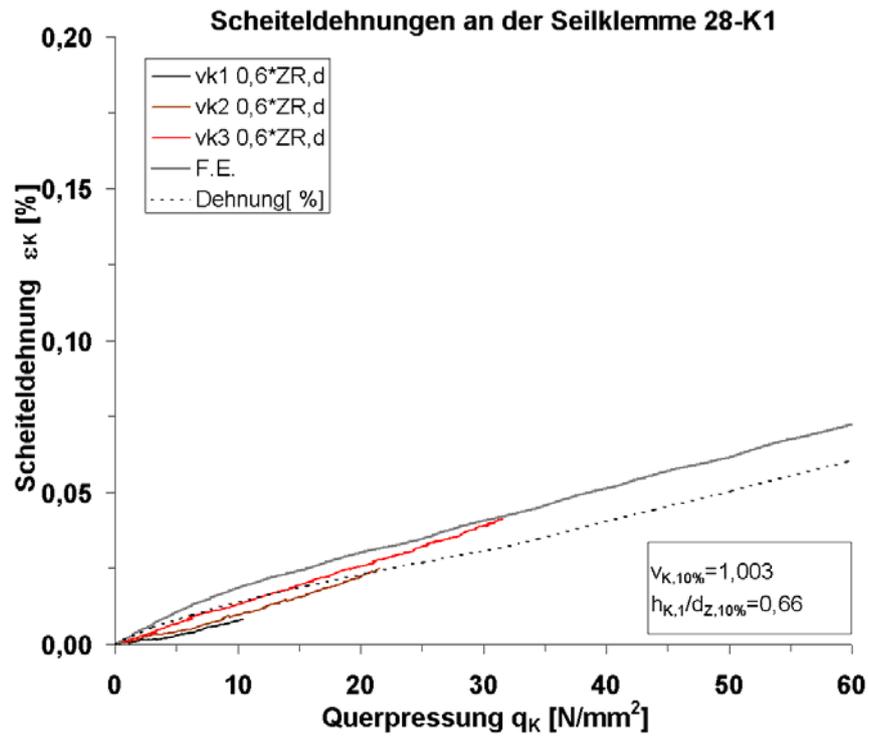


Bild 12-21: Weitere Scheiteldehnungen an der Seilklemme 28-K1

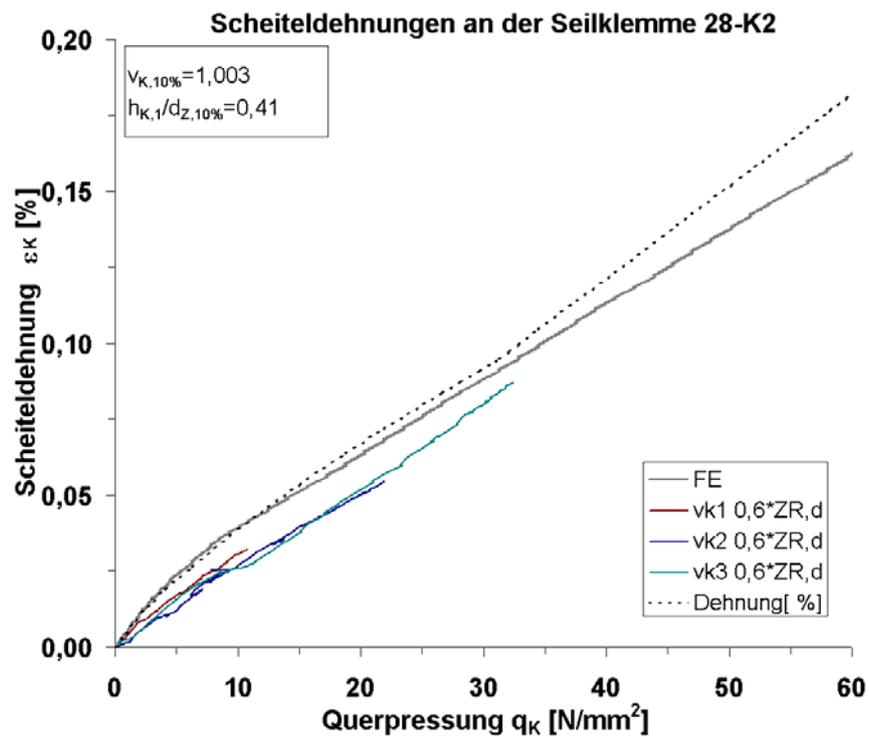


Bild 12-22: Weitere Scheiteldehnungen an der Seilklemme 28-K2

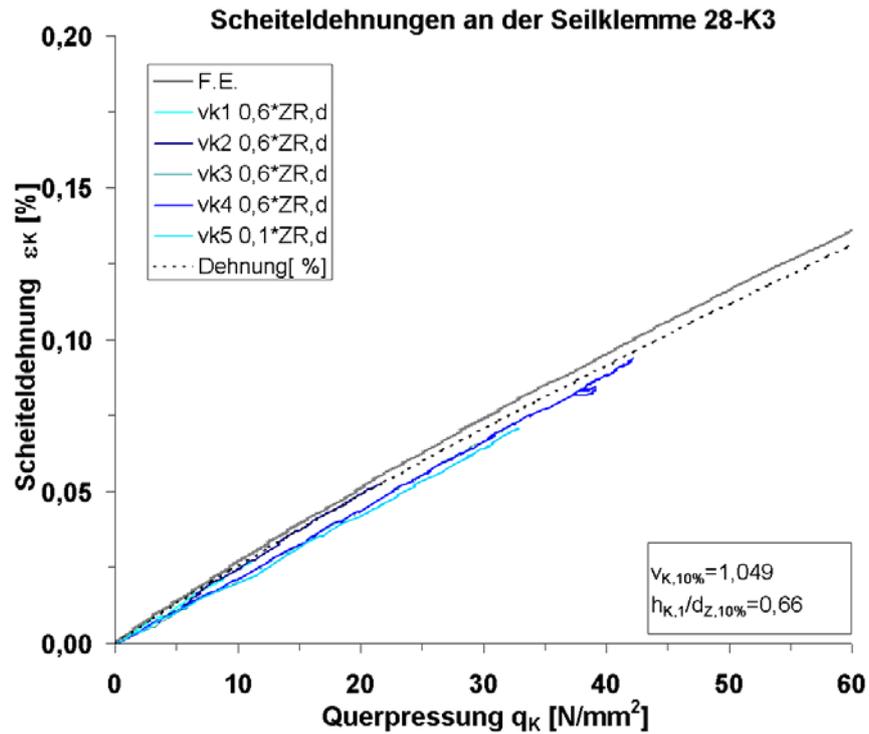


Bild 12-23: Weitere Scheiteldehnungen an der Seilklemme 28-K3

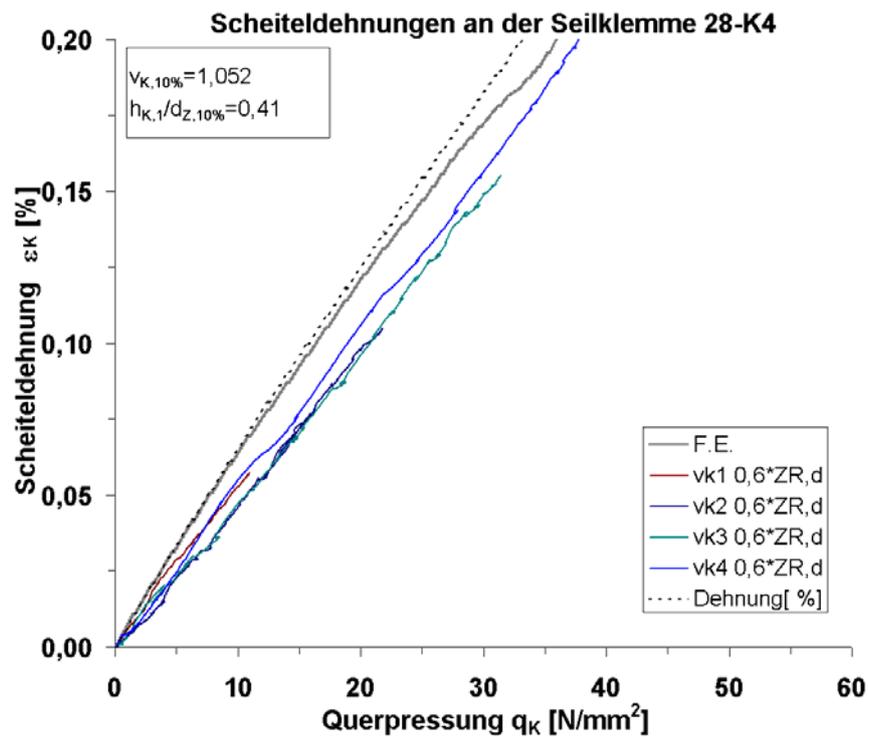


Bild 12-24: Weitere Scheiteldehnungen an der Seilklemme 28-K4

Versuch	q <sub>k</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Winkel		
		Versuch [°]	F.E. [°]	Gleichung [°]
28-1-vk1	9	72	68	77
28-1-vk2	20	77	79	77
28-1-vk3	27	77	79	77
28-2-vk1	10	77	79	77
28-2-vk2	19	77	79	77
28-2-vk3	29	77	79	77
28-3-vk1	11	25	22	25
28-3-vk2	21	27	30	27
28-3-vk3	30	34	34	34
28-3-vk4	39	38	38	38
28-3-vk5	30	35	34	35
28-4-vk1	11	22	21	22
28-4-vk2	21	28	30	28
28-4-vk3	29	30	34	30
28-4-vk4	39	35	41	35

Tabelle 12-12: Kontaktwinkel der zusätzlichen Versuche im Vergleich

## 12.3.2 Verschiebekraft

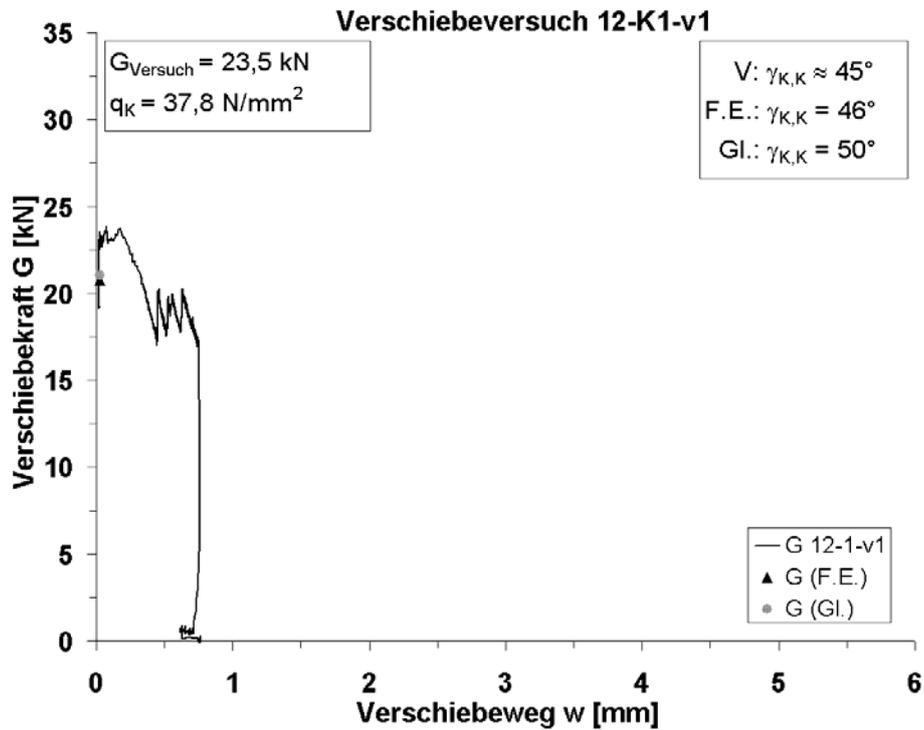


Bild 12-25: Verschiebeversuch 12-K1-v1

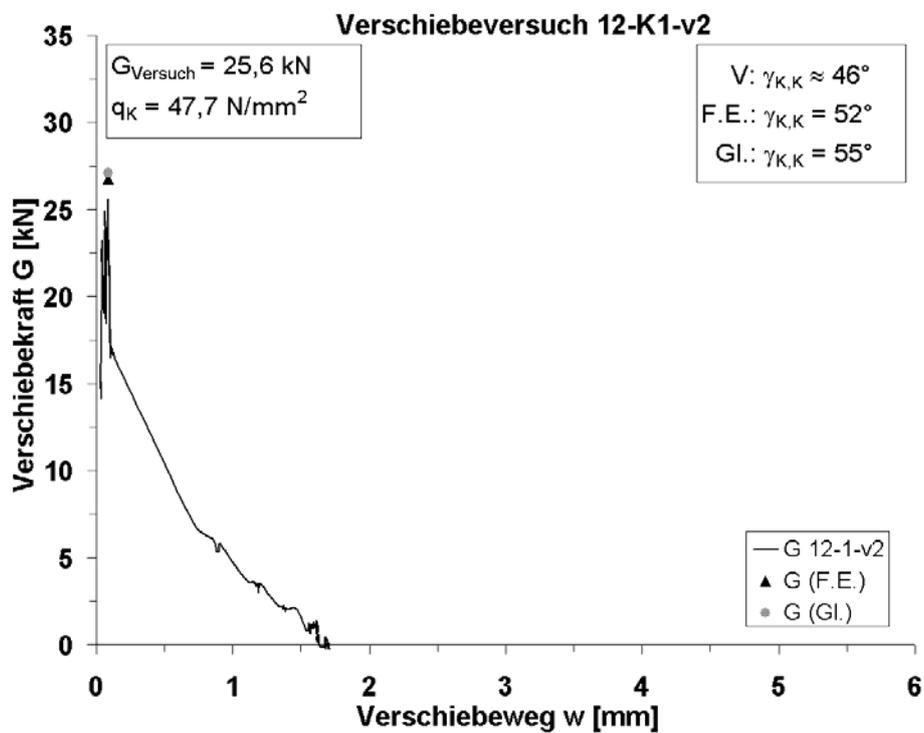


Bild 12-26: Verschiebeversuch 12-K1-v2

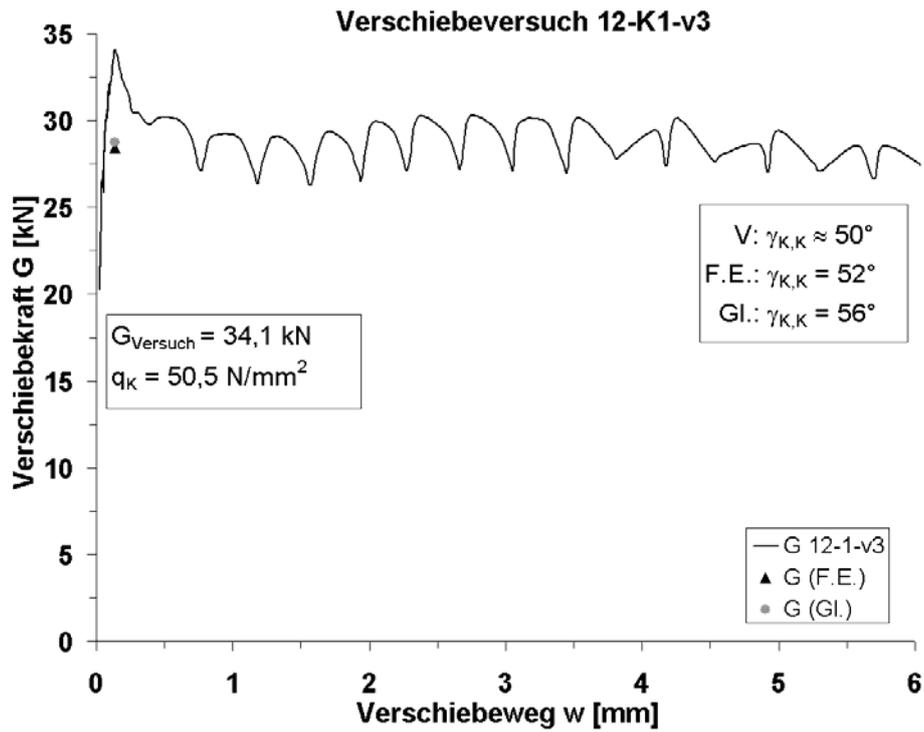


Bild 12-27: Verschiebeversuch 12-K1-v3

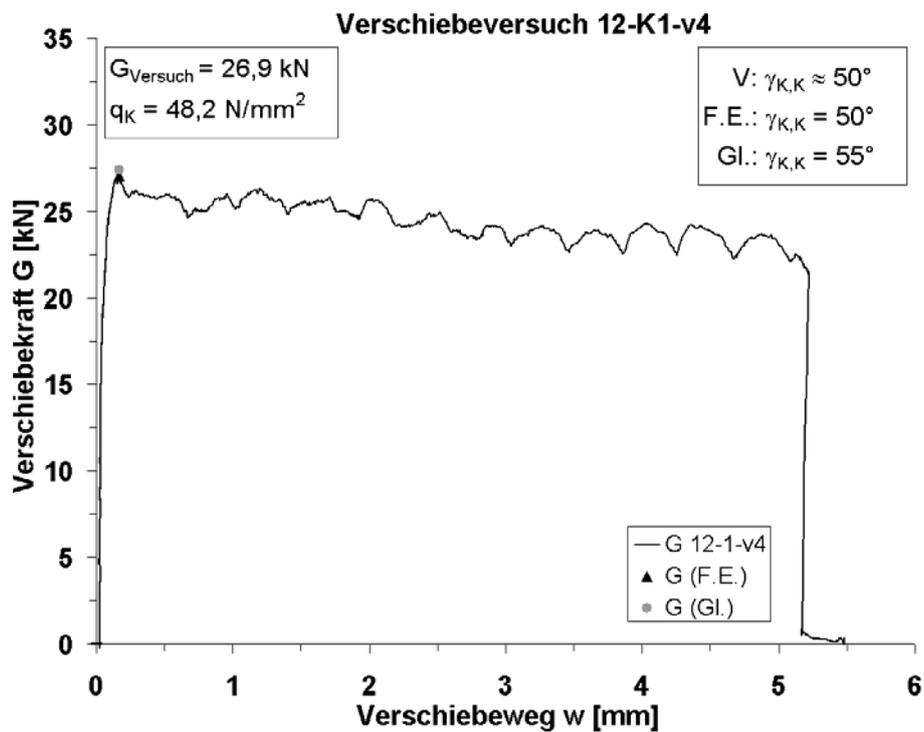


Bild 12-28: Verschiebeversuch 12-K1-v4

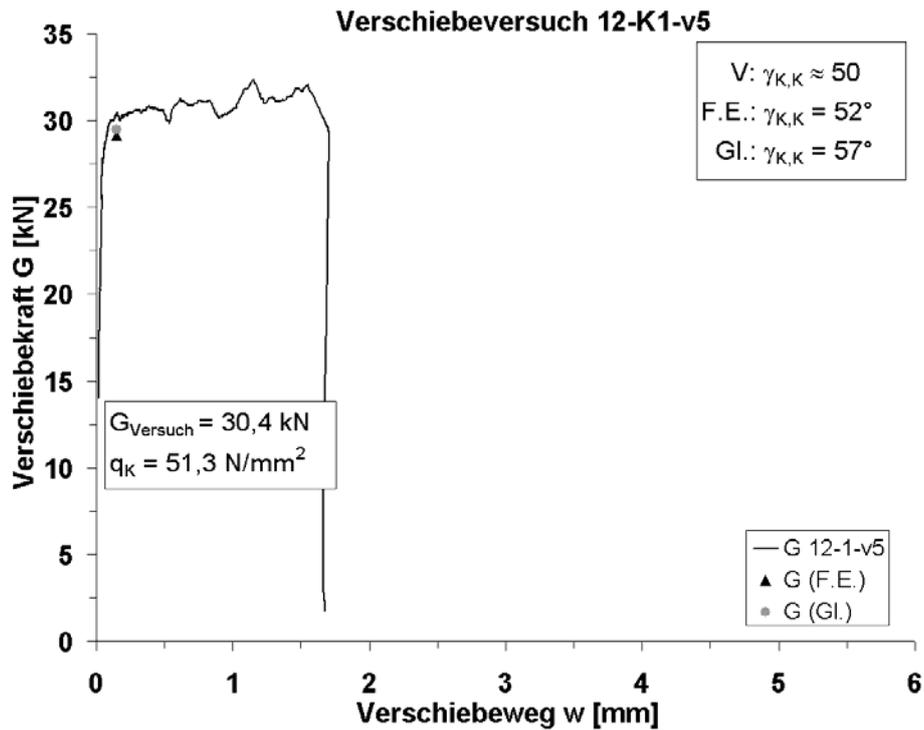


Bild 12-29: Verschiebeversuch 12-K1-v5

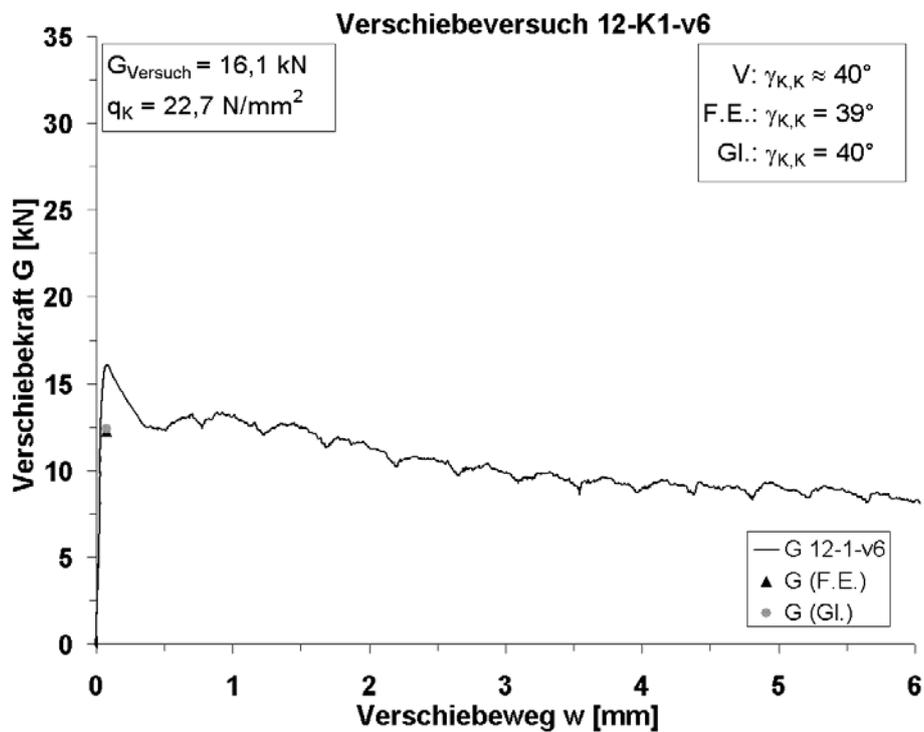


Bild 12-30: Verschiebeversuch 12-K1-v6

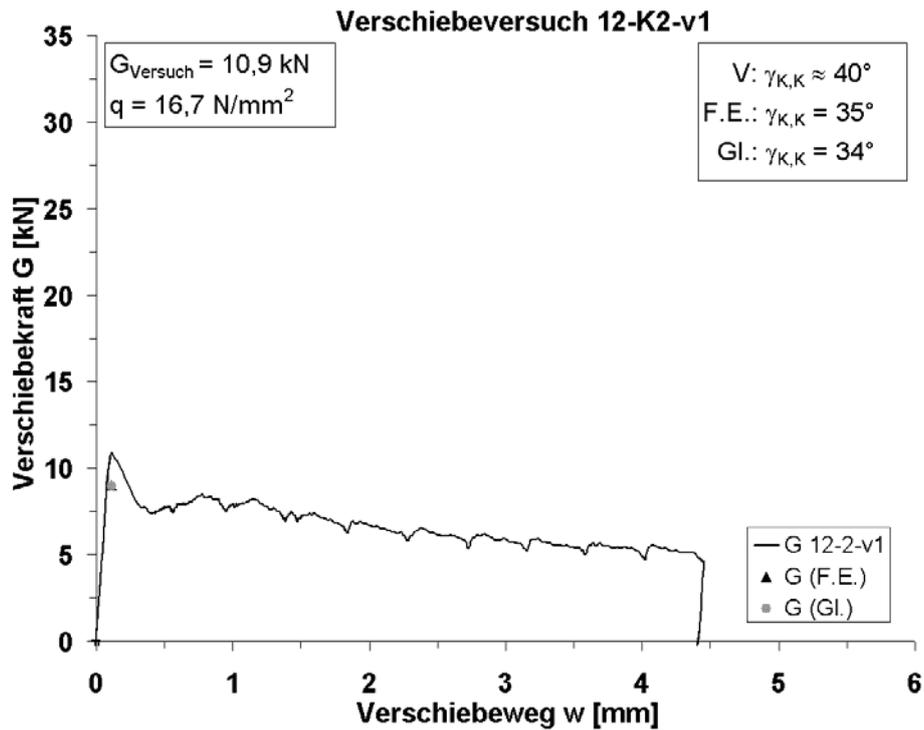


Bild 12-31: Verschiebeversuch 12-K2-v1

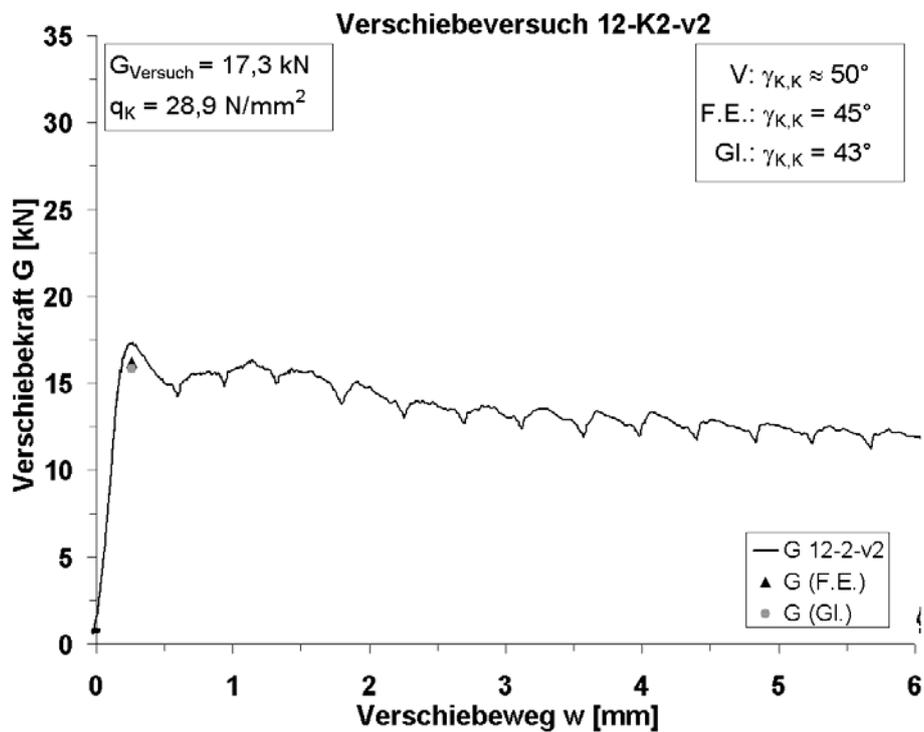


Bild 12-32: Verschiebeversuch 12-K2-v2

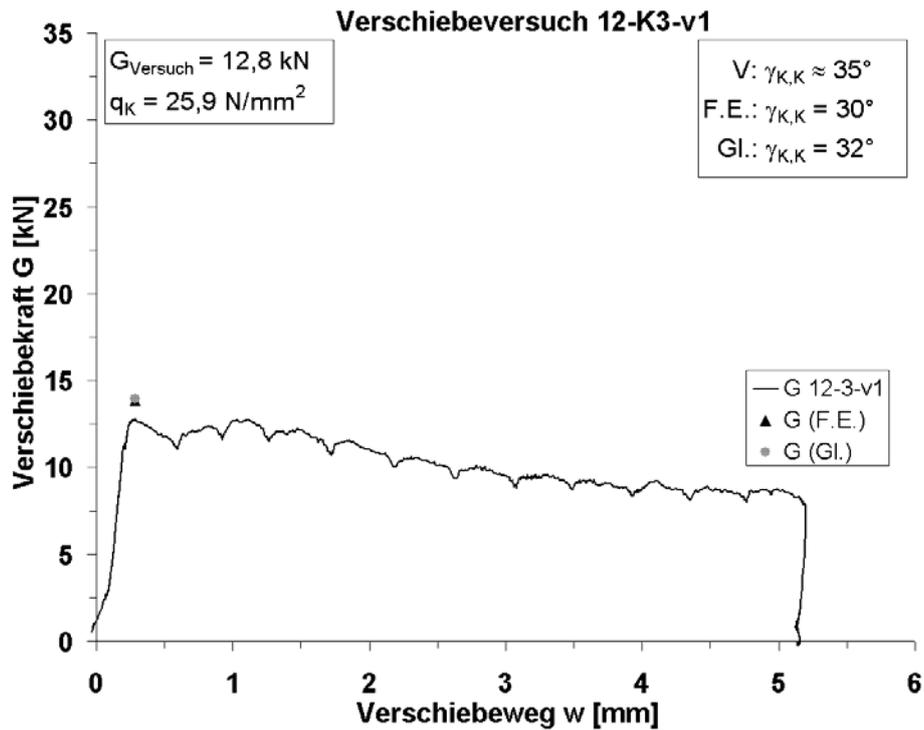


Bild 12-33: Verschiebeversuch 12-K3-v1

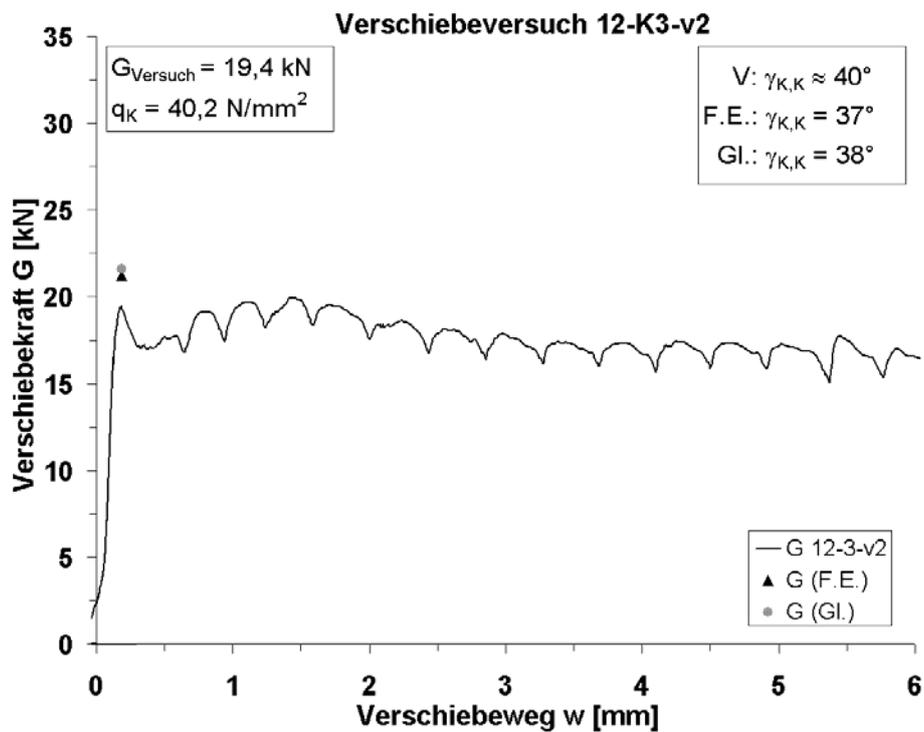


Bild 12-34: Verschiebeversuch 12-K3-v2

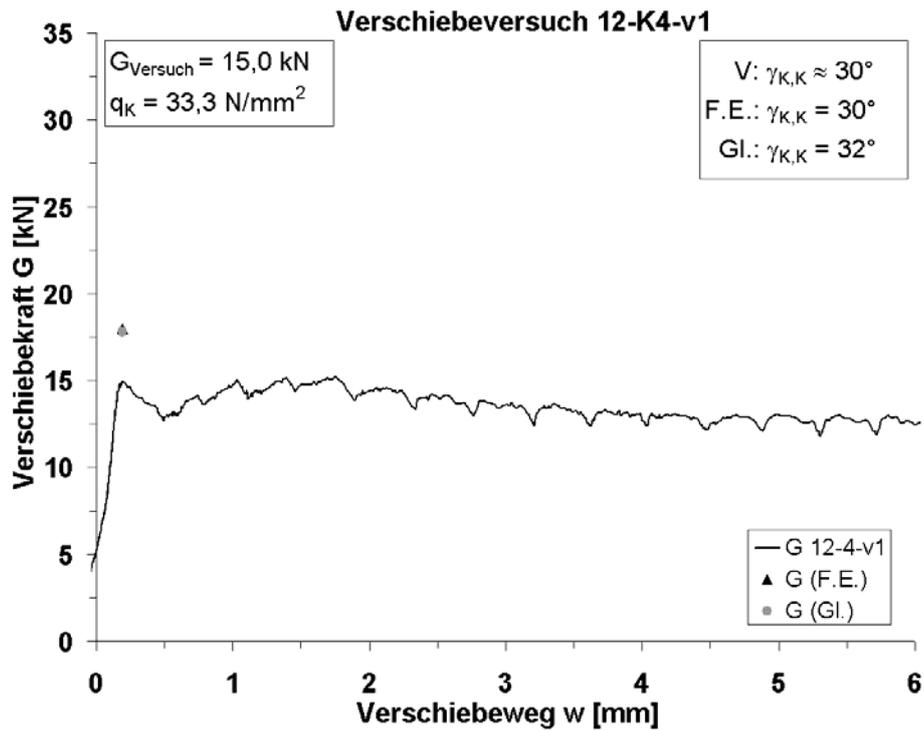


Bild 12-35: Verschiebeversuch 12-K4-v1

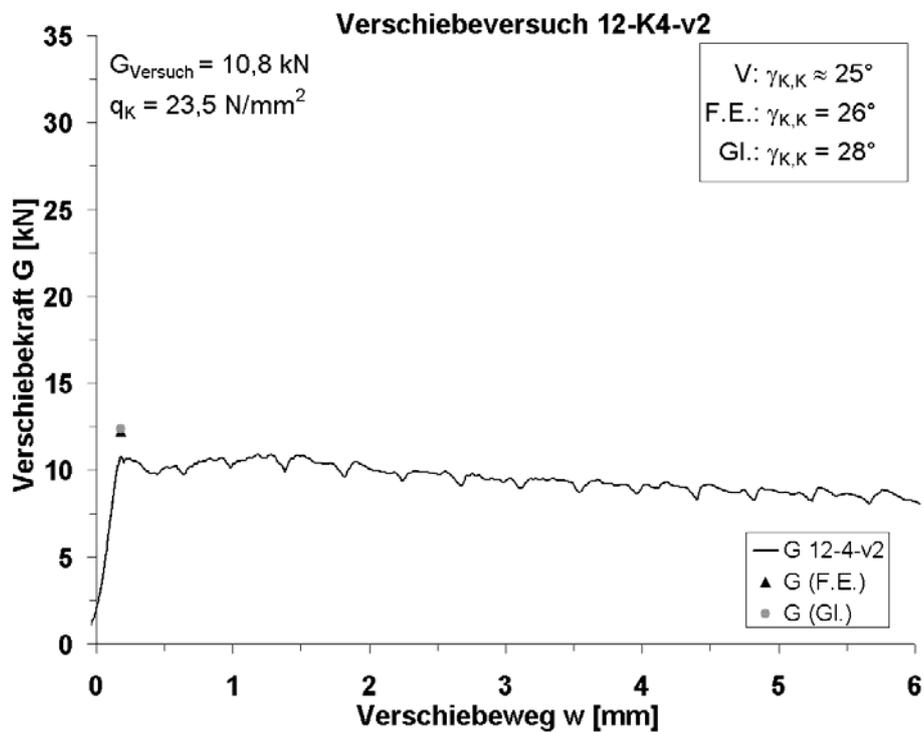
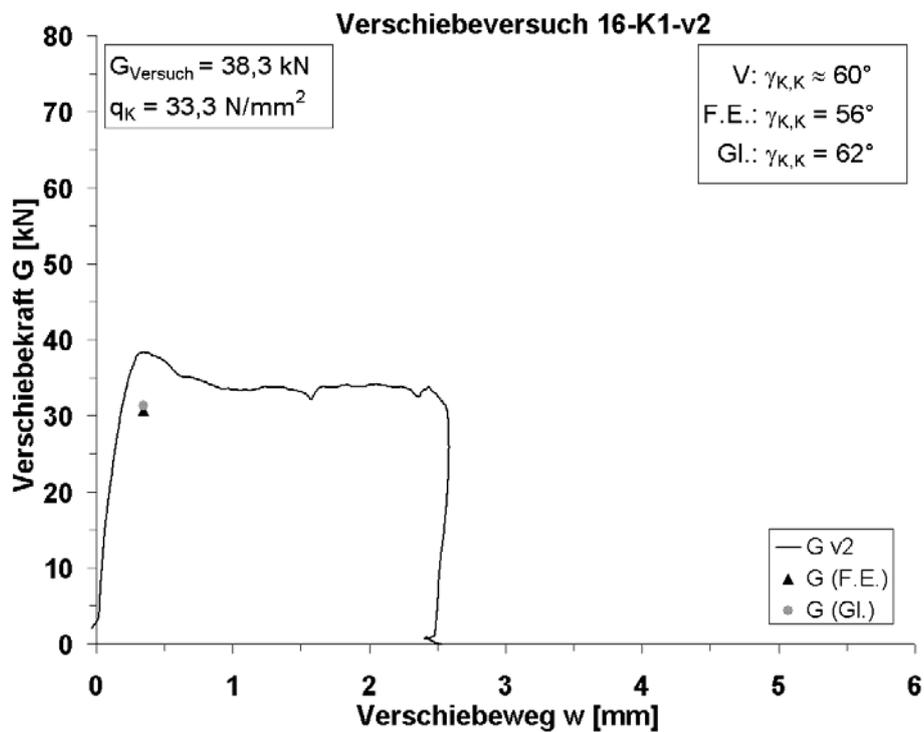
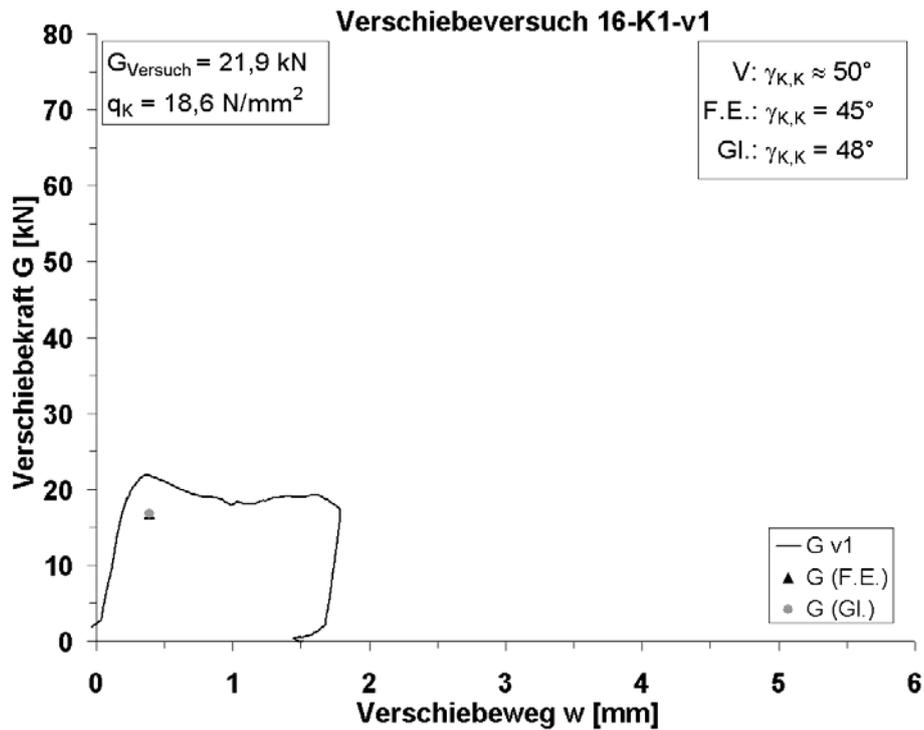


Bild 12-36: Verschiebeversuch 12-K4-v2



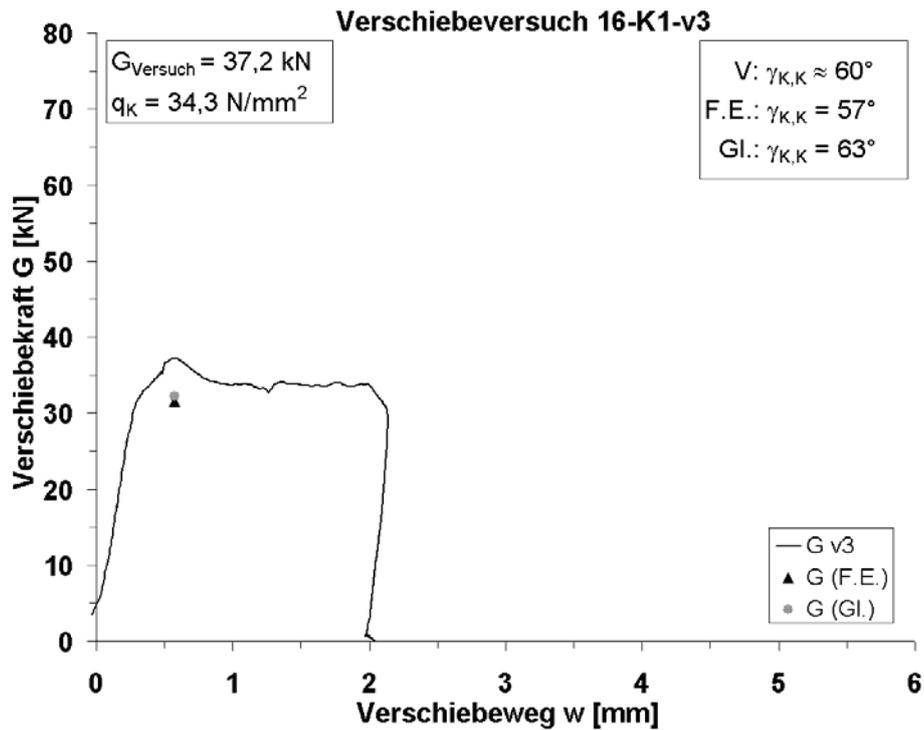


Bild 12-39: Verschiebeversuch 16-K1-v3

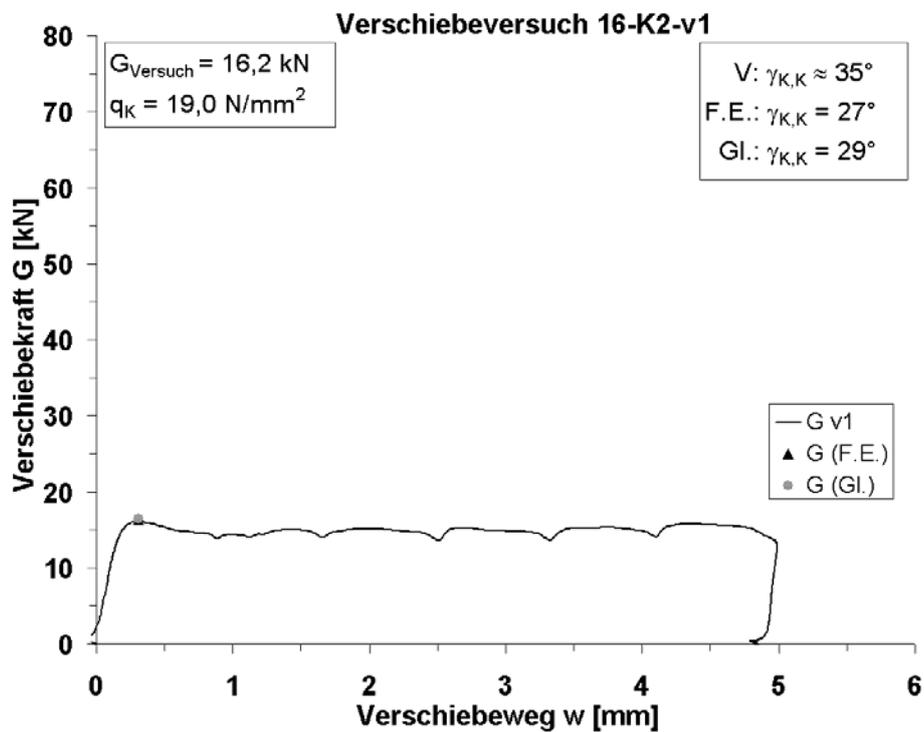
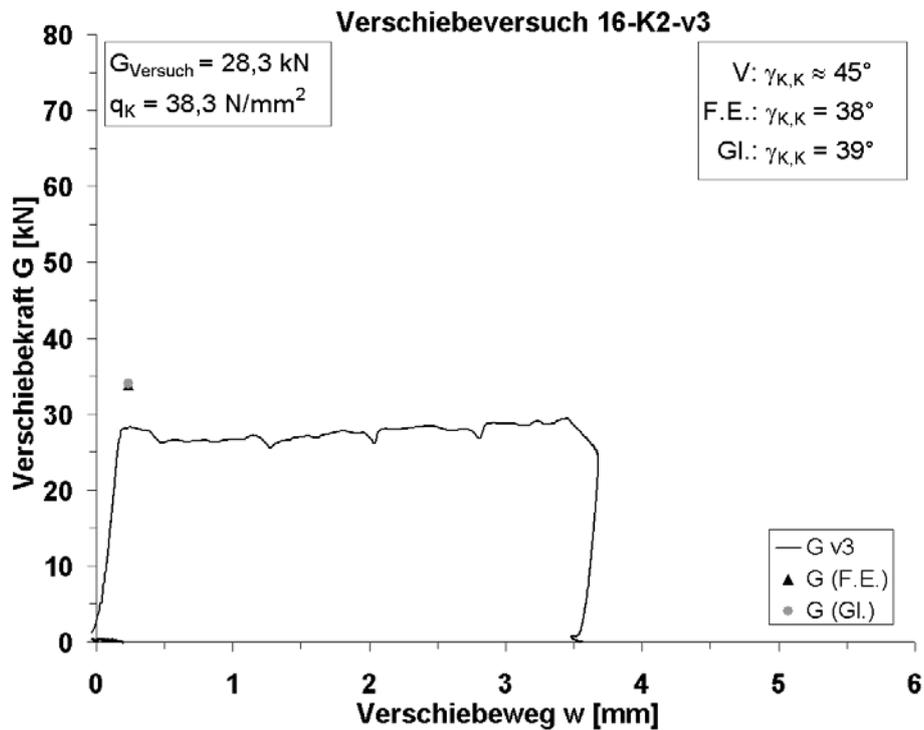
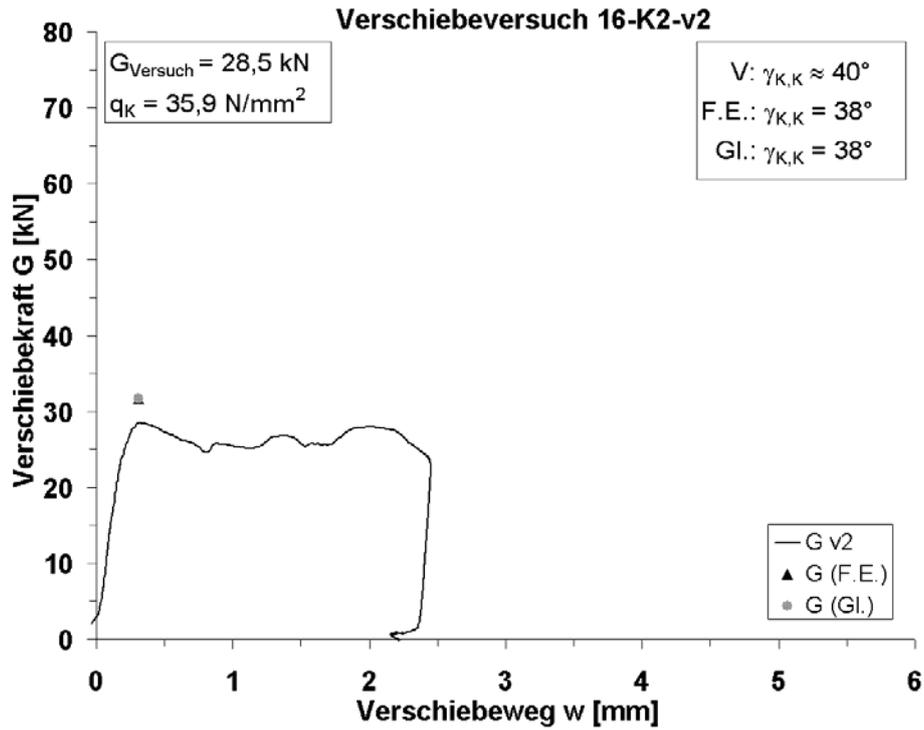


Bild 12-40: Verschiebeversuch 16-K2-v1



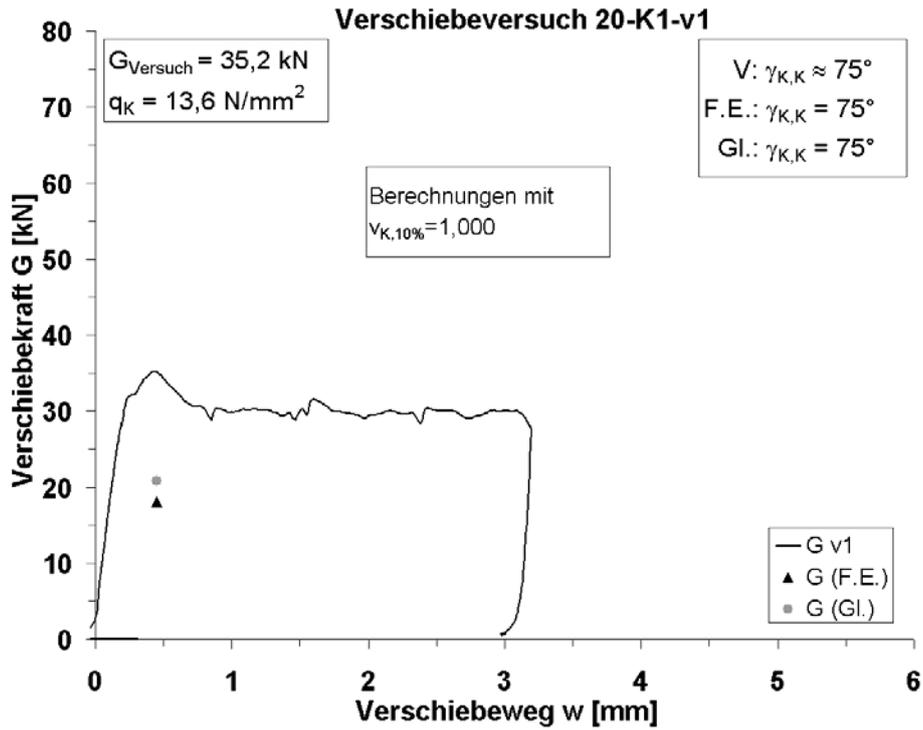


Bild 12-43: Verschiebeversuch 20-K1-v1

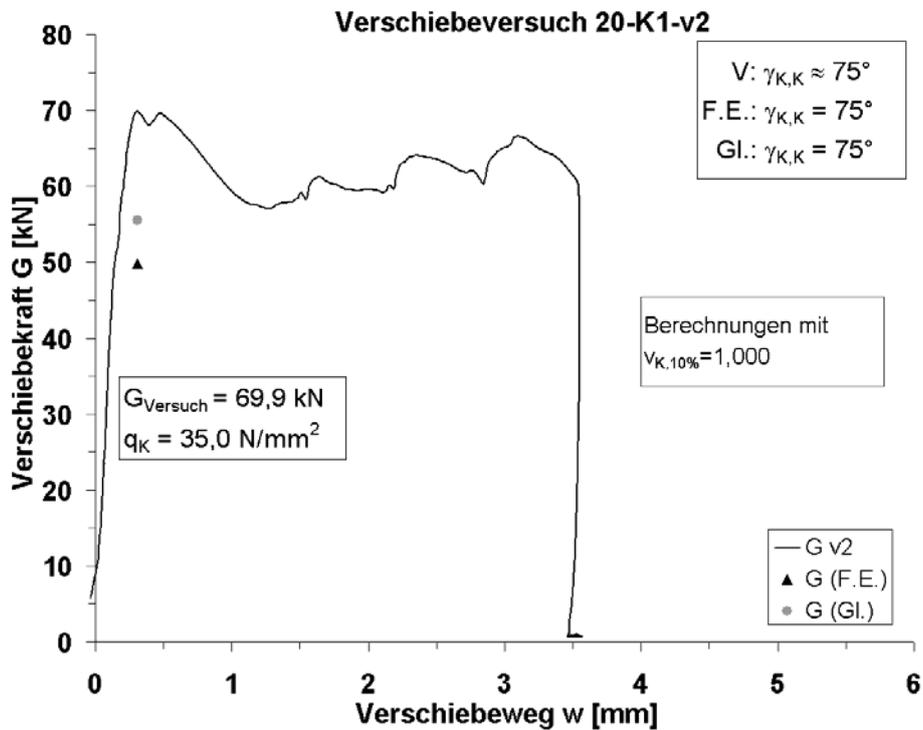


Bild 12-44: Verschiebeversuch 20-K1-v2

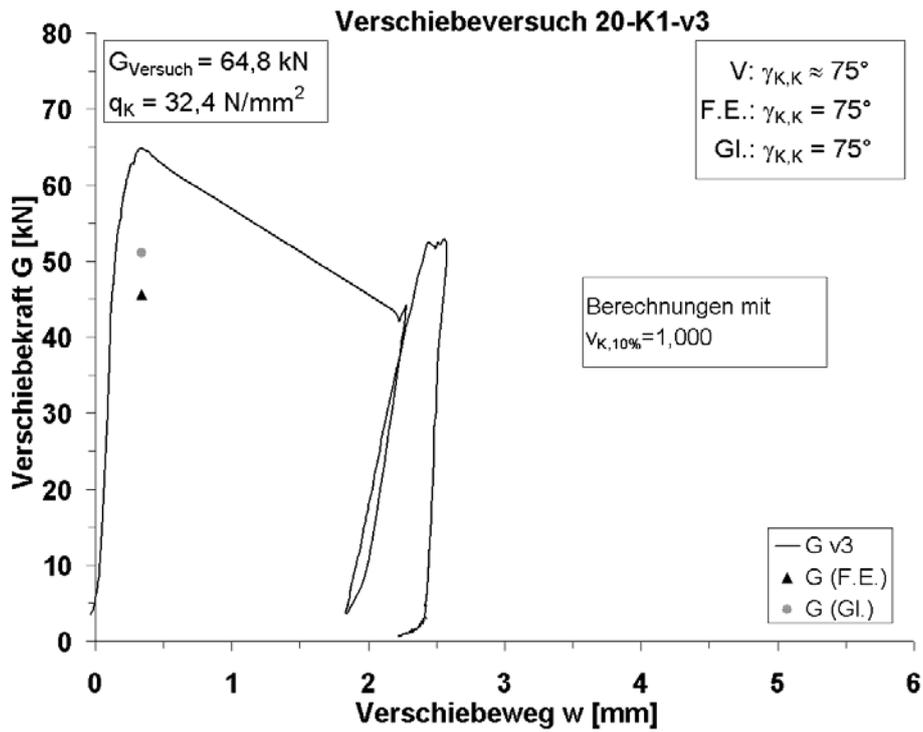


Bild 12-45: Verschiebeversuch 20-K1-v3

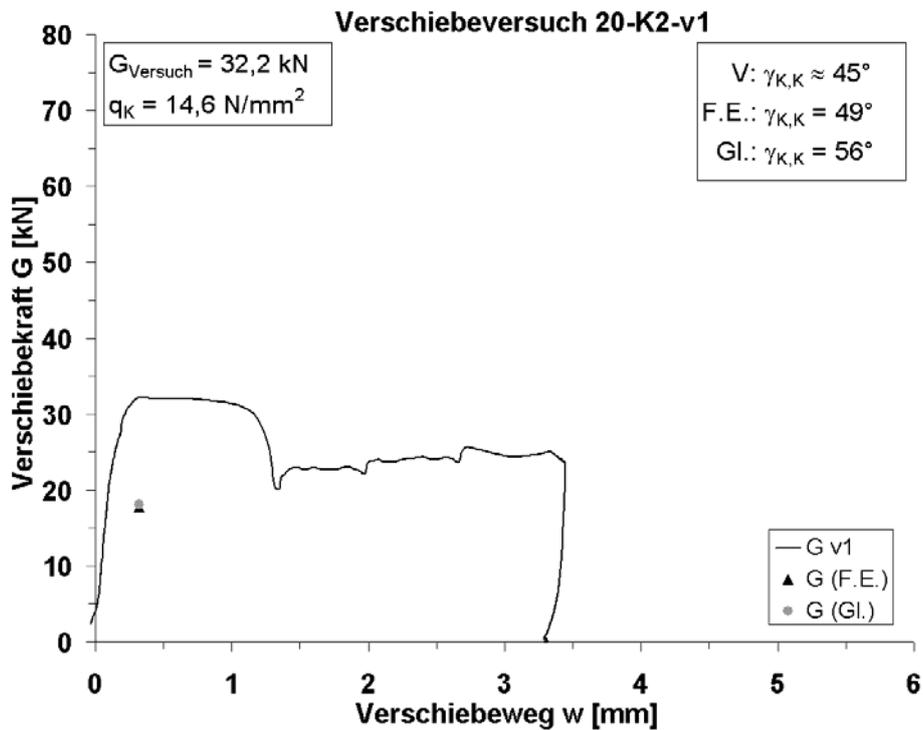


Bild 12-46: Verschiebeversuch 20-K2-v1

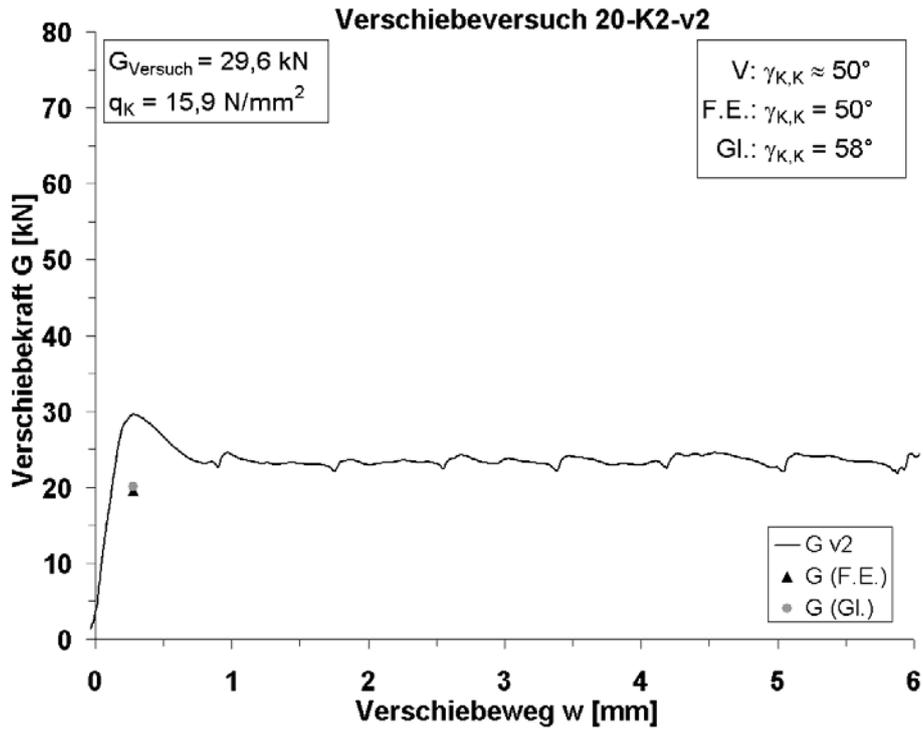


Bild 12-47: Verschiebeversuch 20-K2-v2

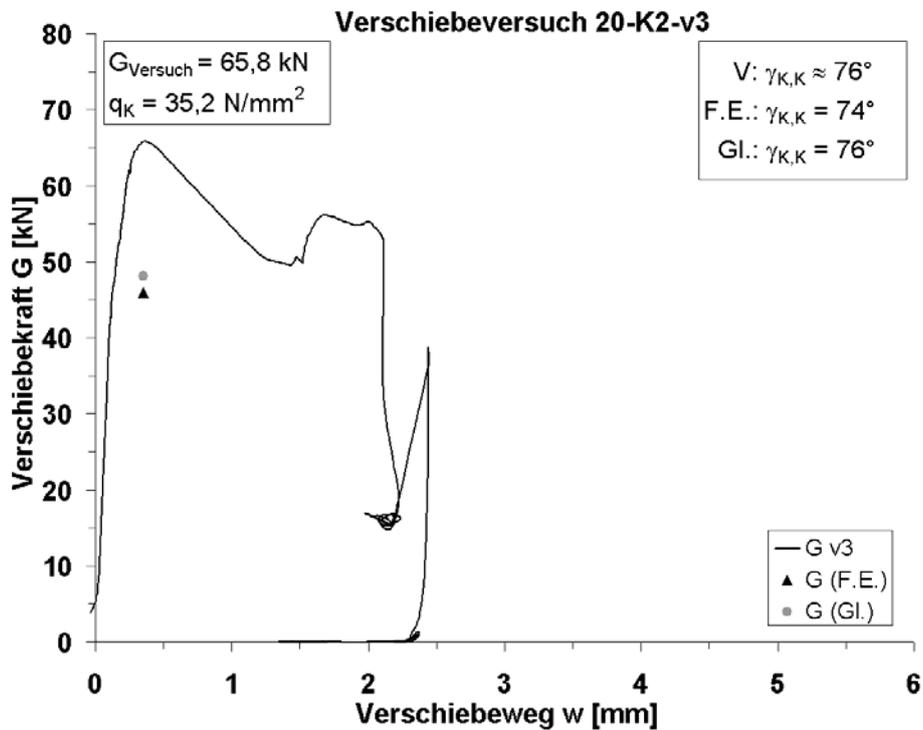


Bild 12-48: Verschiebeversuch 20-K2-v3

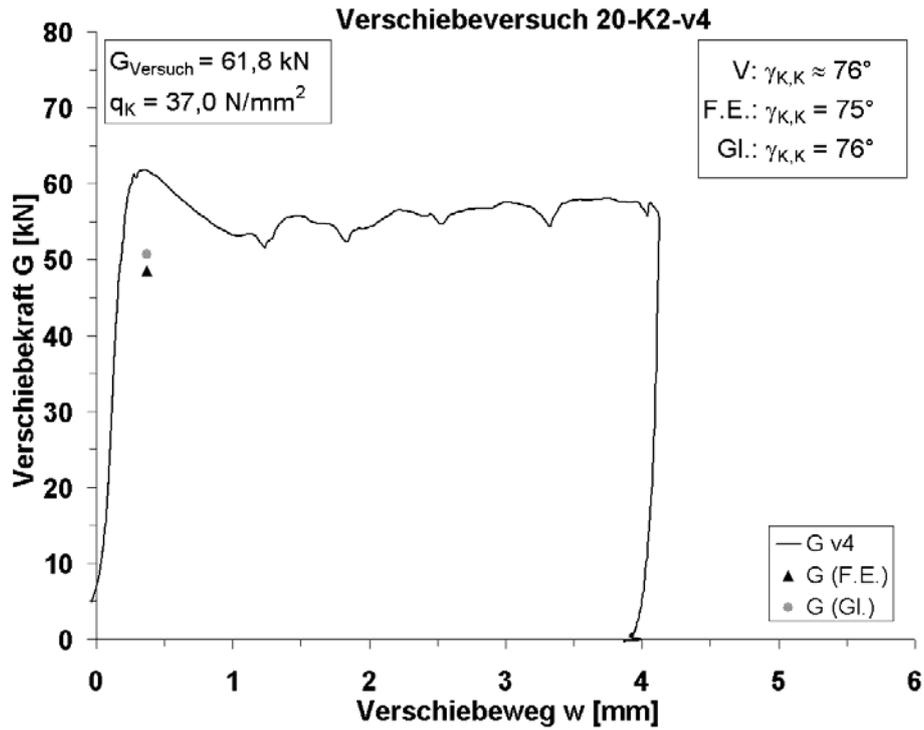


Bild 12-49: Verschiebeversuch 20-K2-v4

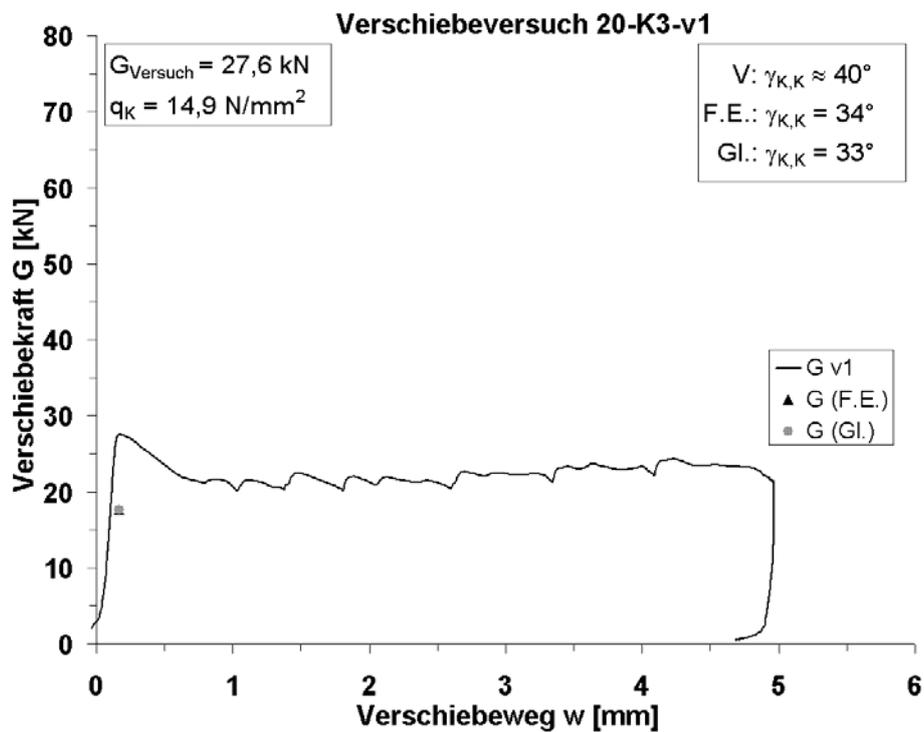


Bild 12-50: Verschiebeversuch 20-K3-v1

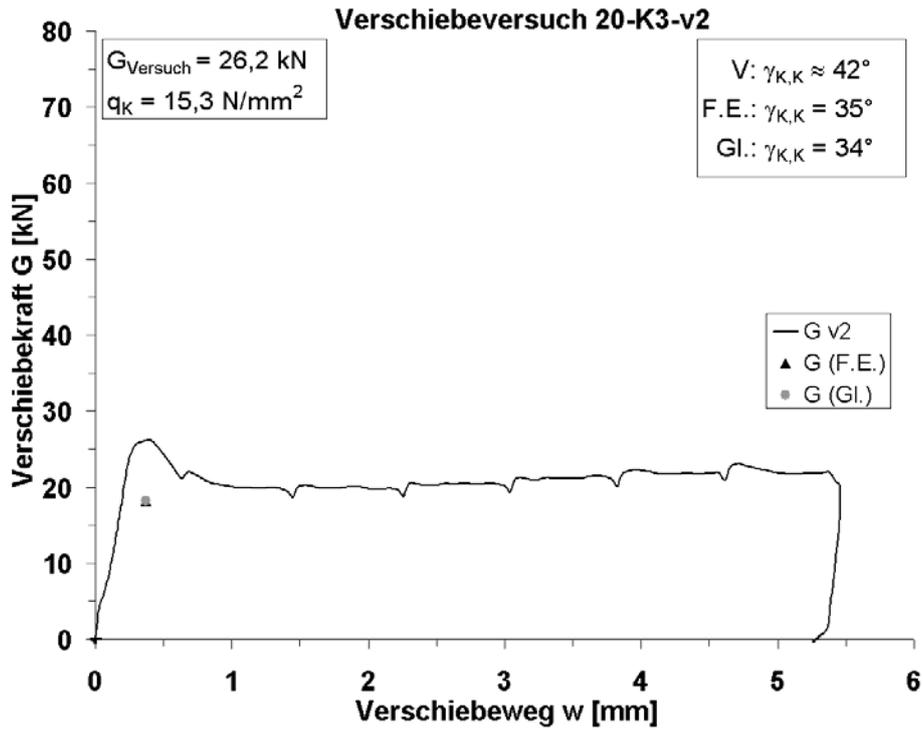


Bild 12-51: Verschiebeversuch 20-K3-v2

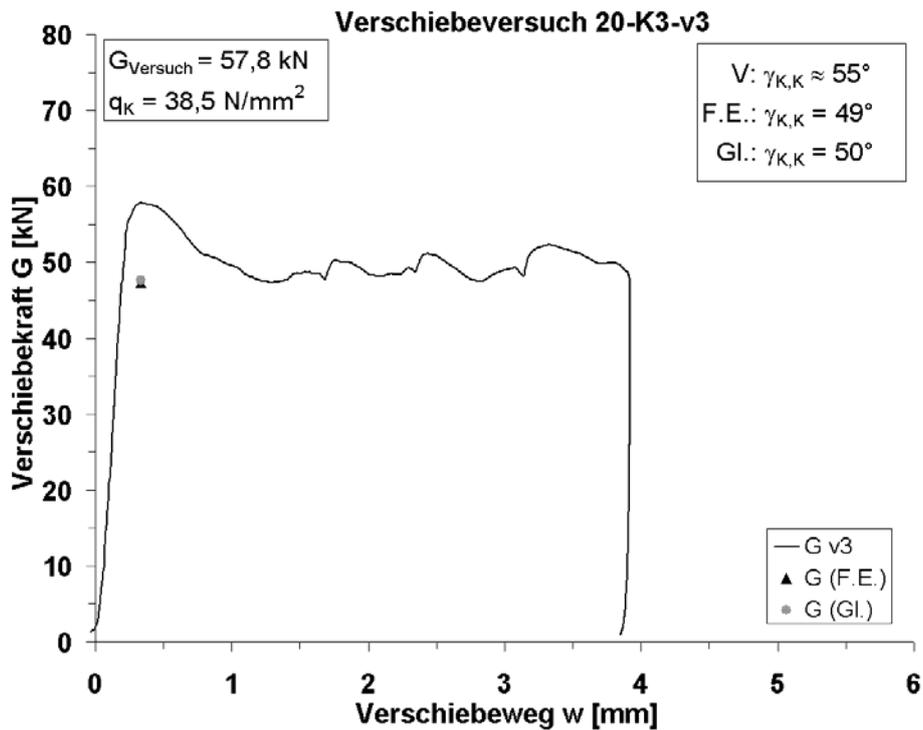
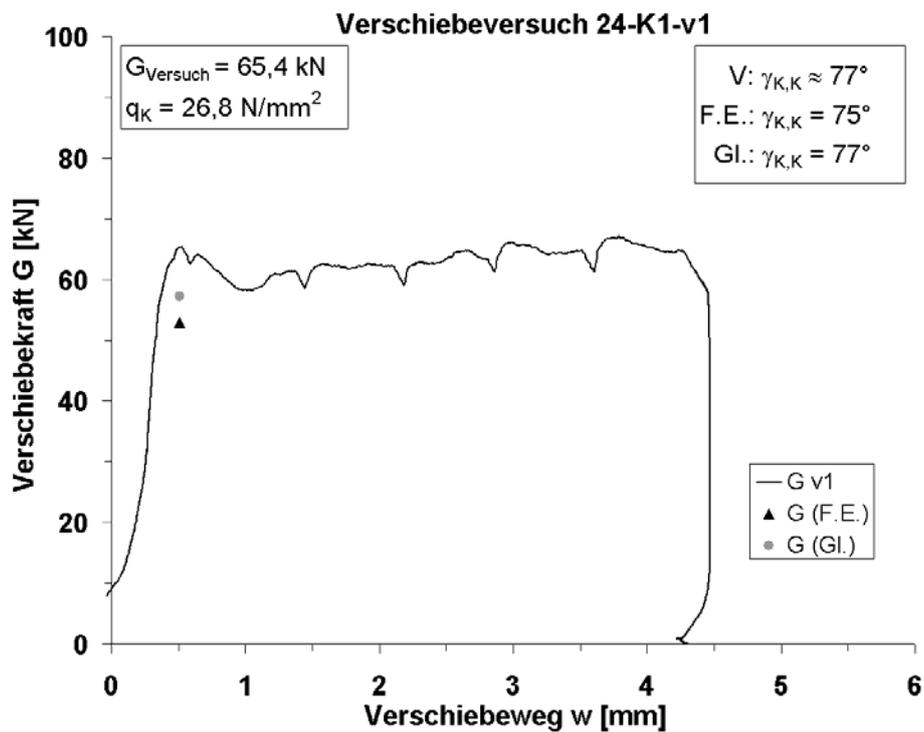
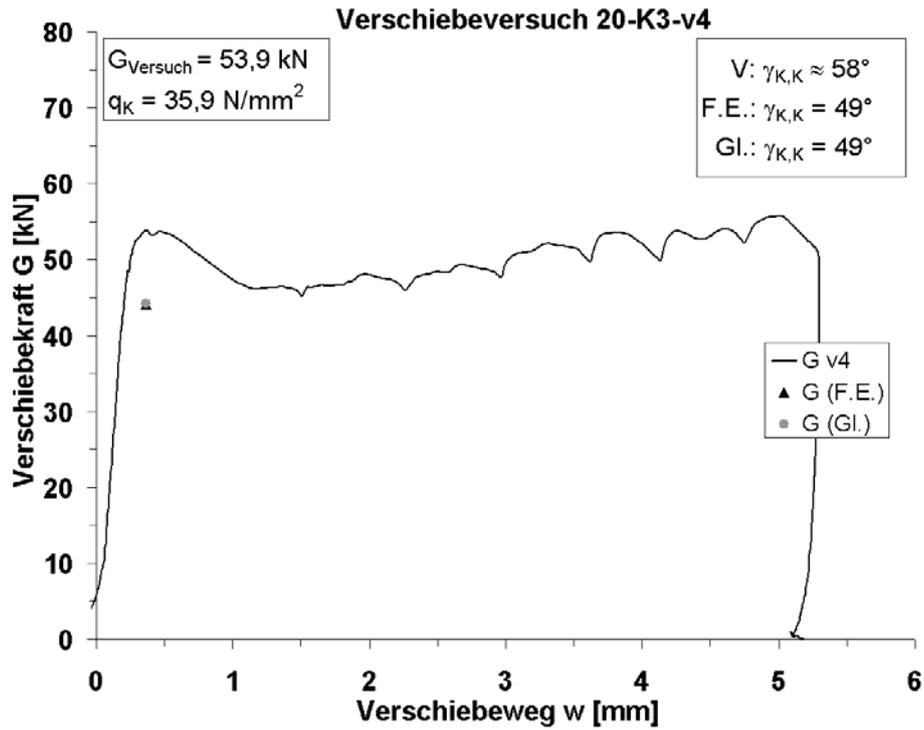


Bild 12-52: Verschiebeversuch 20-K3-v3



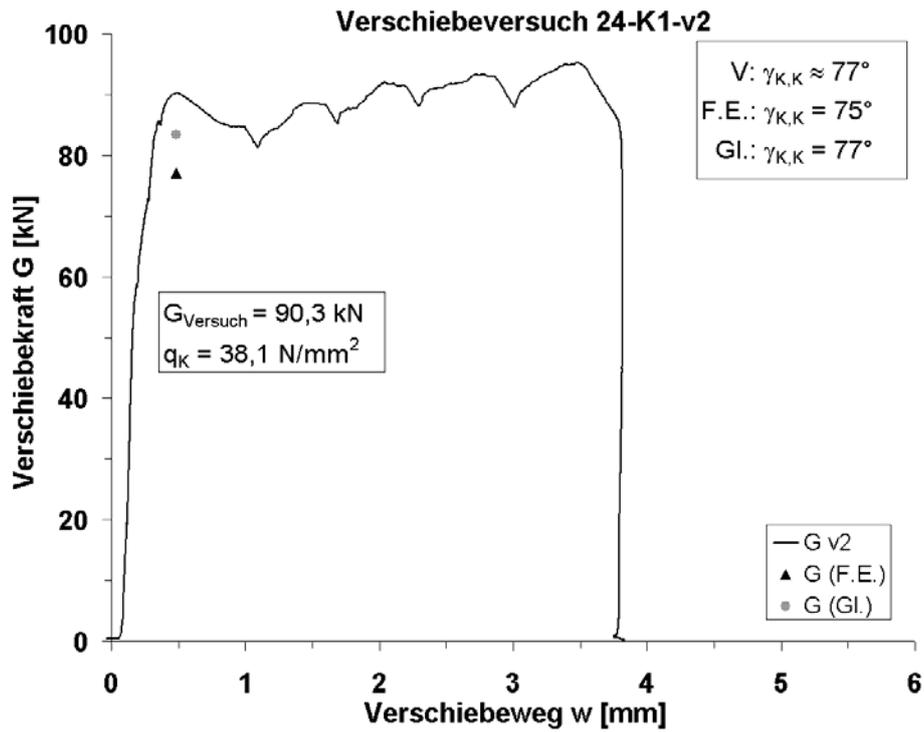


Bild 12-55: Verschiebeversuch 24-K1-v2

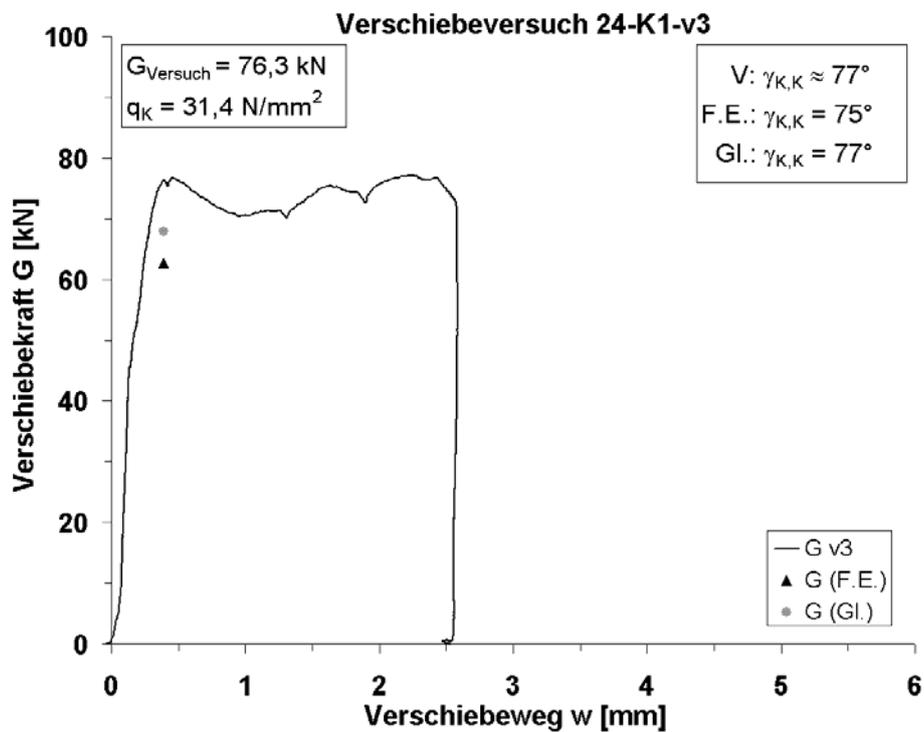


Bild 12-56: Verschiebeversuch 24-K1-v3

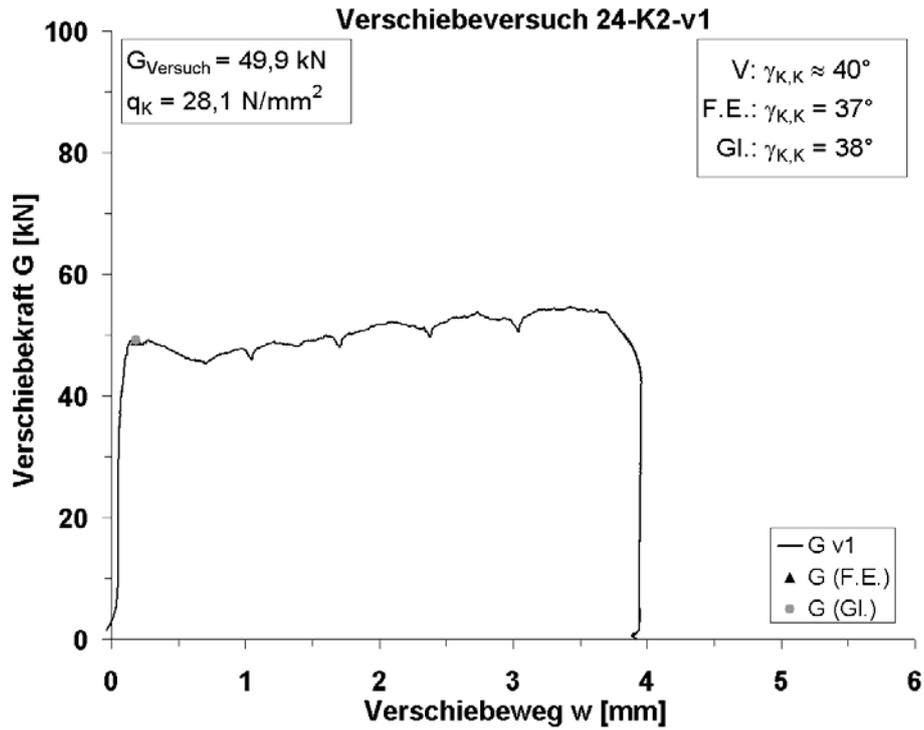


Bild 12-57: Verschiebeversuch 24-K2-v1

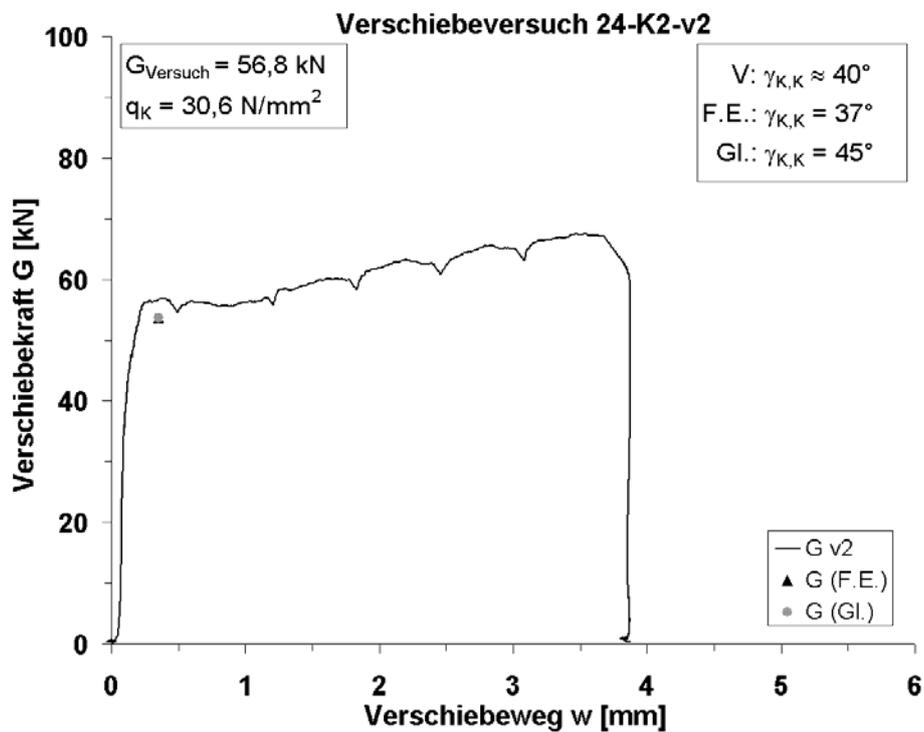
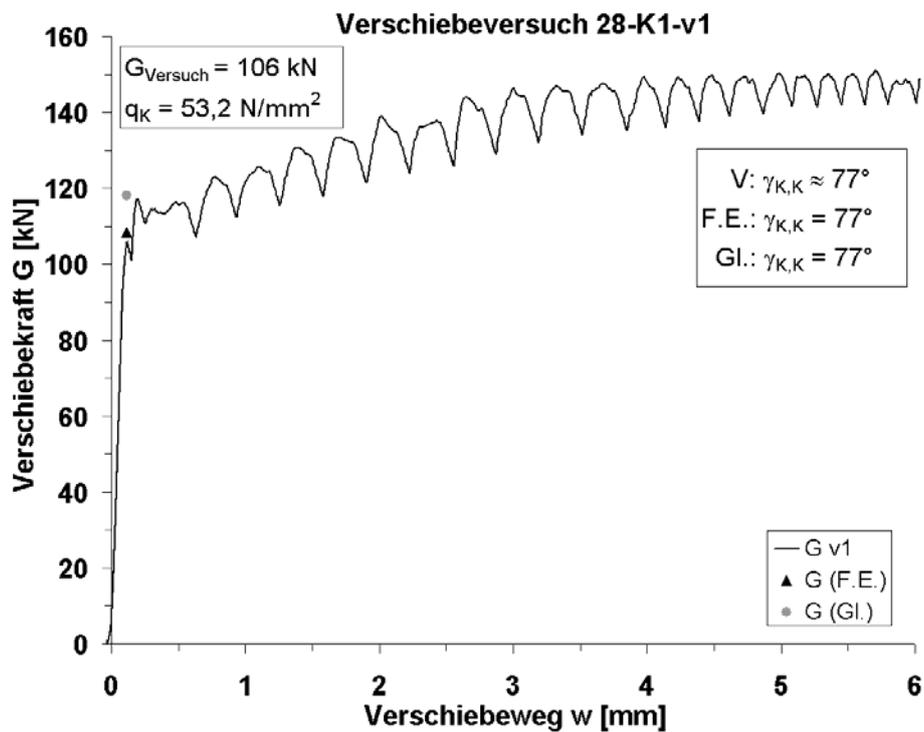
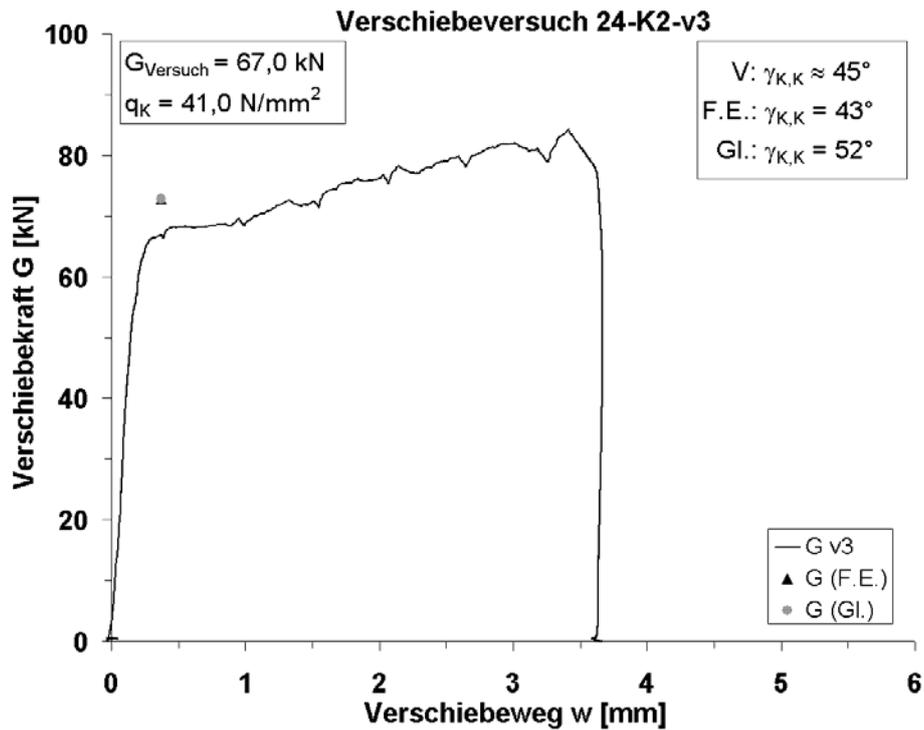


Bild 12-58: Verschiebeversuch 24-K2-v2



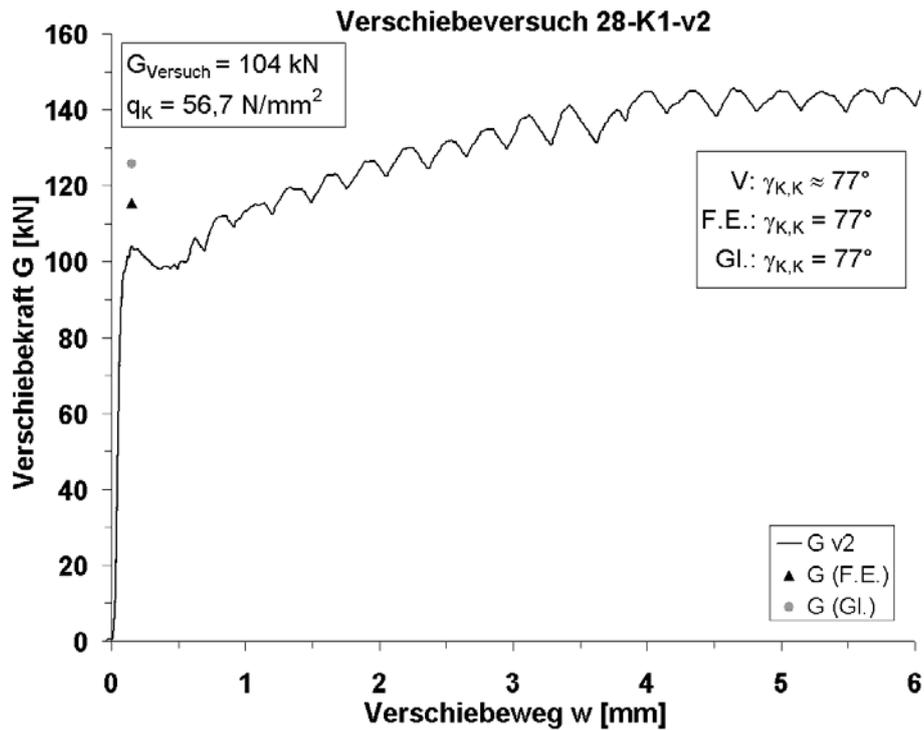


Bild 12-61: Verschiebeversuch 28-K1-v2

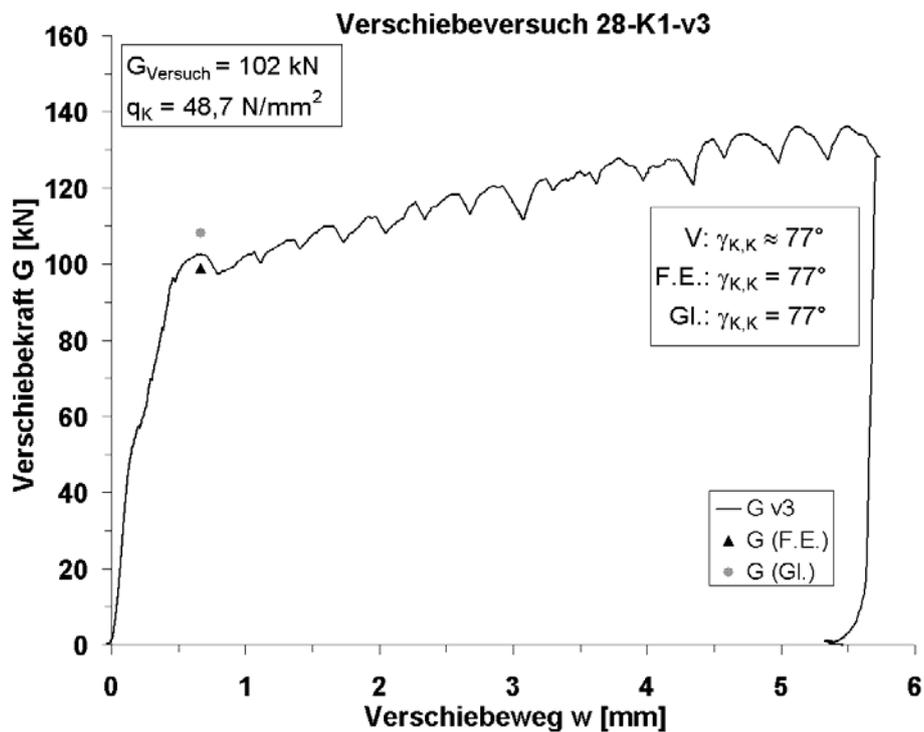


Bild 12-62: Verschiebeversuch 28-K1-v3

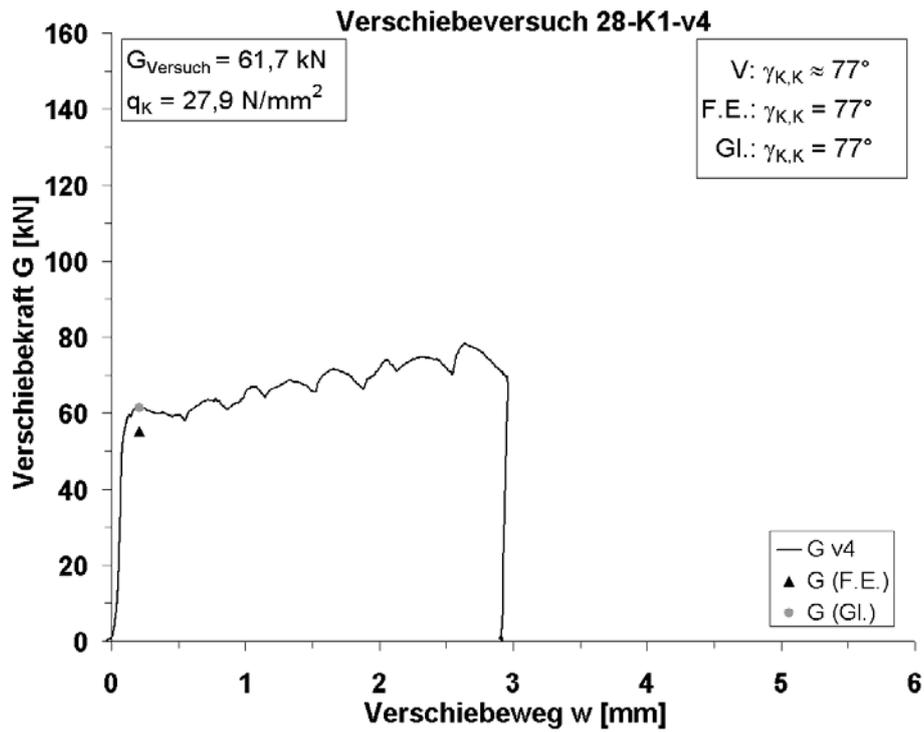


Bild 12-63: Verschiebeversuch 28-K1-v4

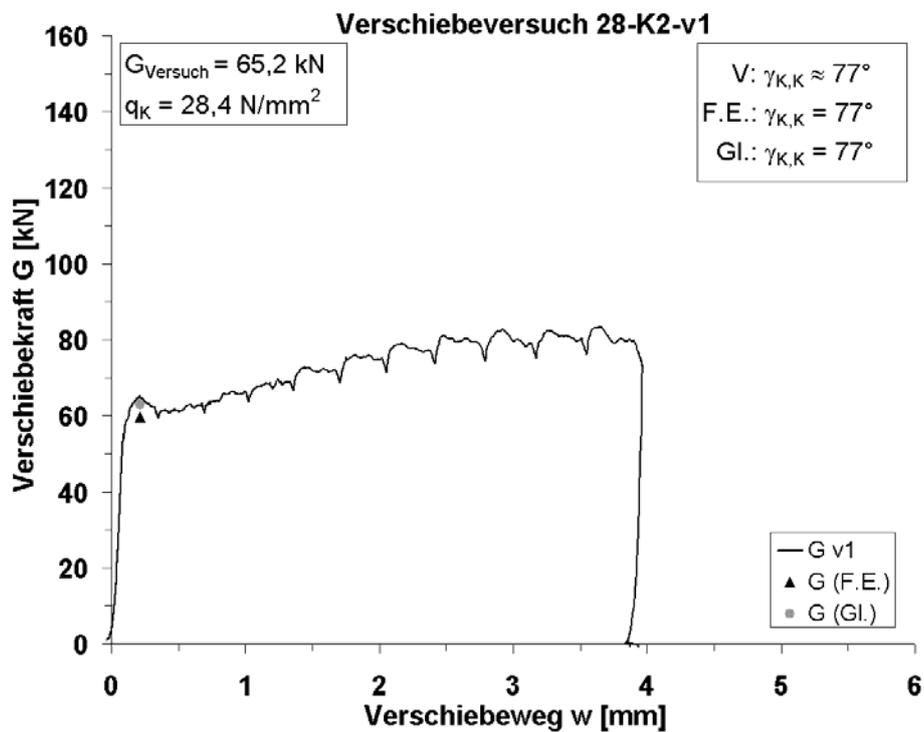


Bild 12-64: Verschiebeversuch 28-K2-v1

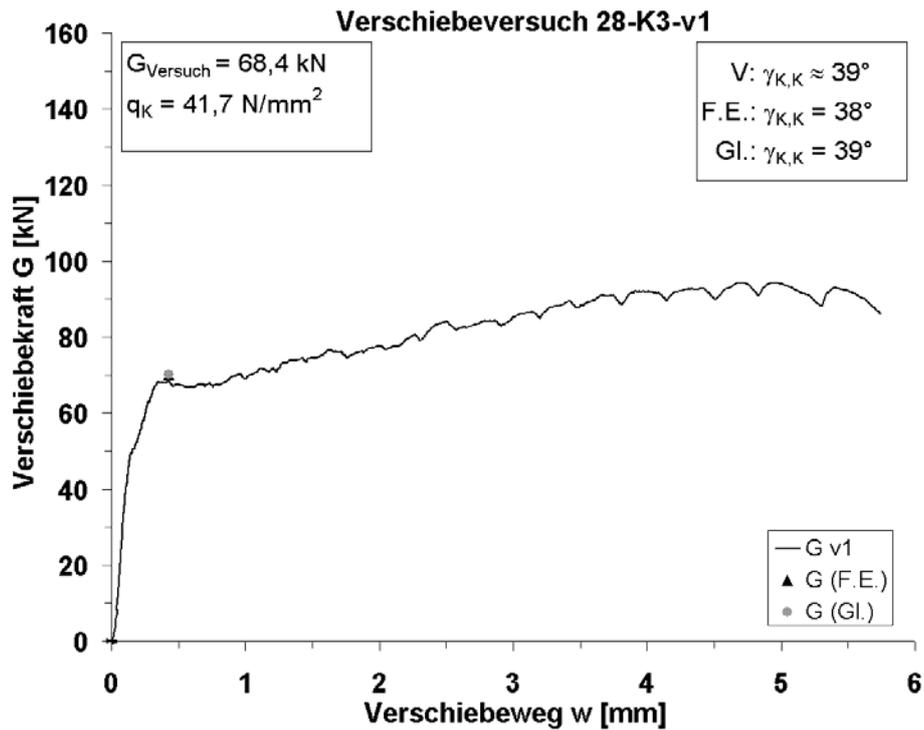


Bild 12-65: Verschiebeversuch 28-K3-v1

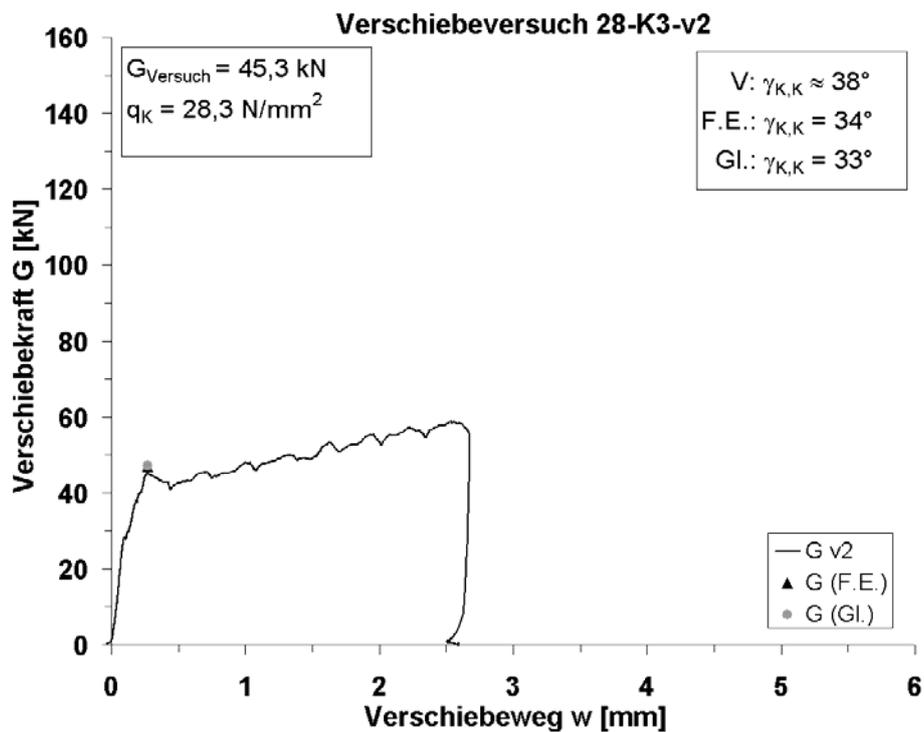


Bild 12-66: Verschiebeversuch 28-K3-v2

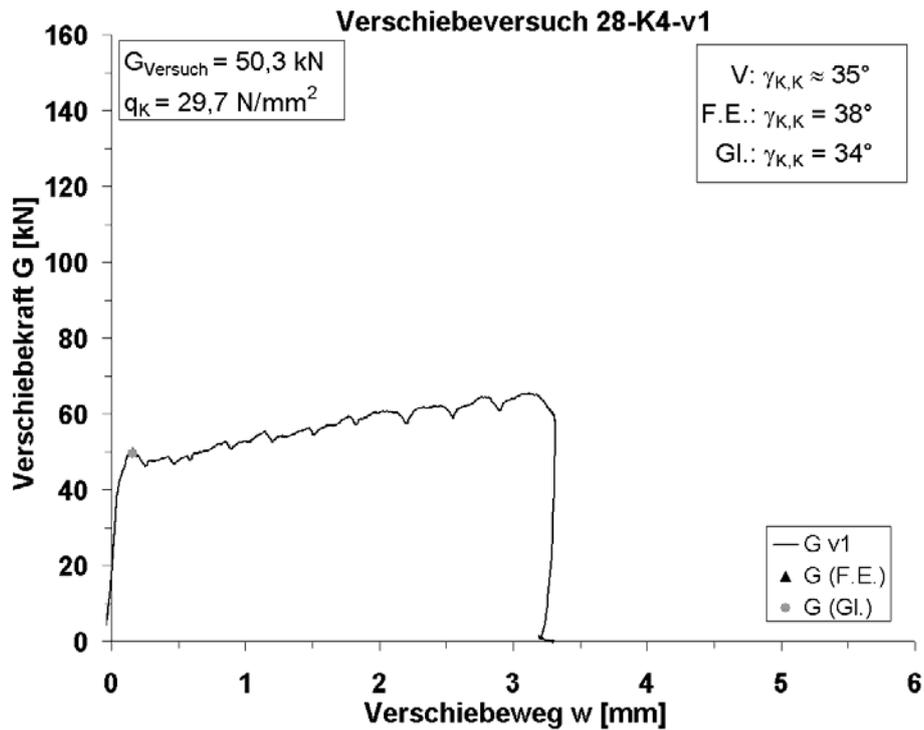


Bild 12-67: Verschiebeversuch 28-K4-v1

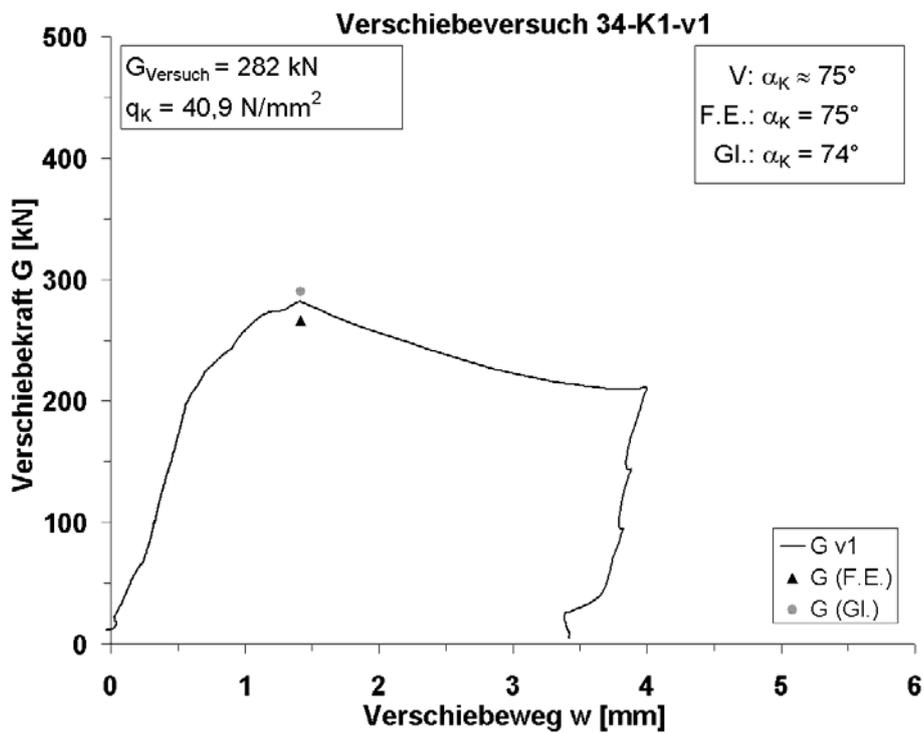


Bild 12-68: Verschiebeversuch 34-K1-v1

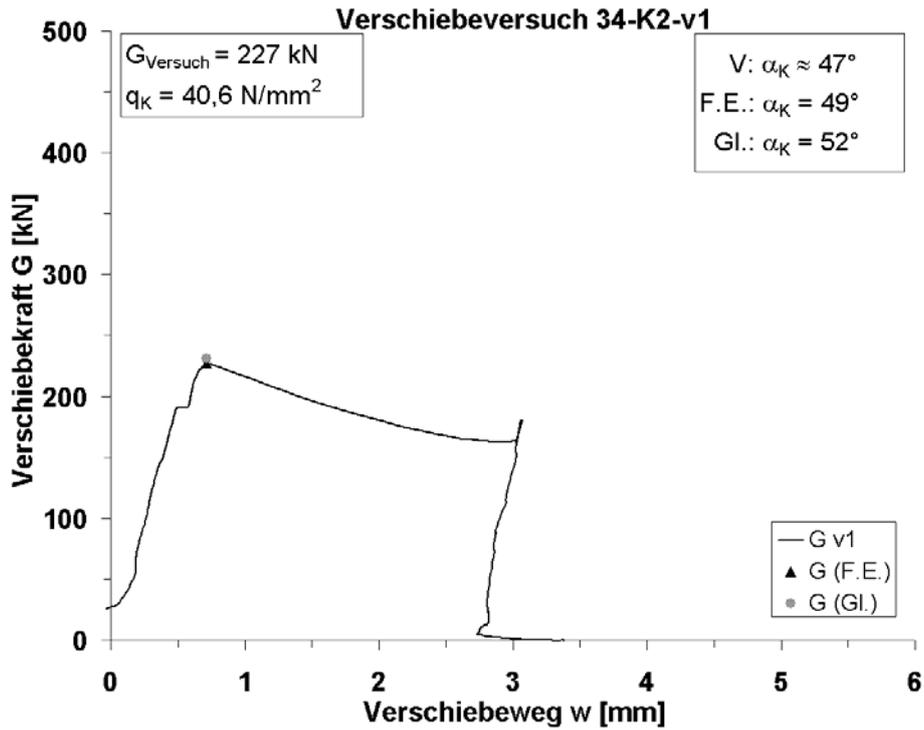


Bild 12-69: Verschiebeversuch 34-K2-v1

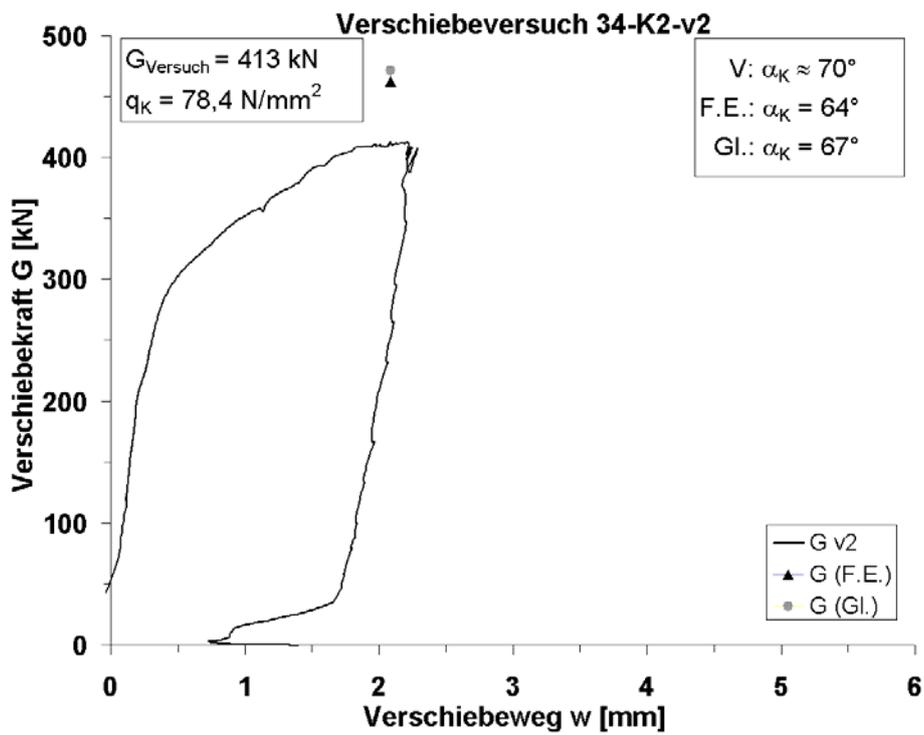


Bild 12-70: Verschiebeversuch 34-K2-v2

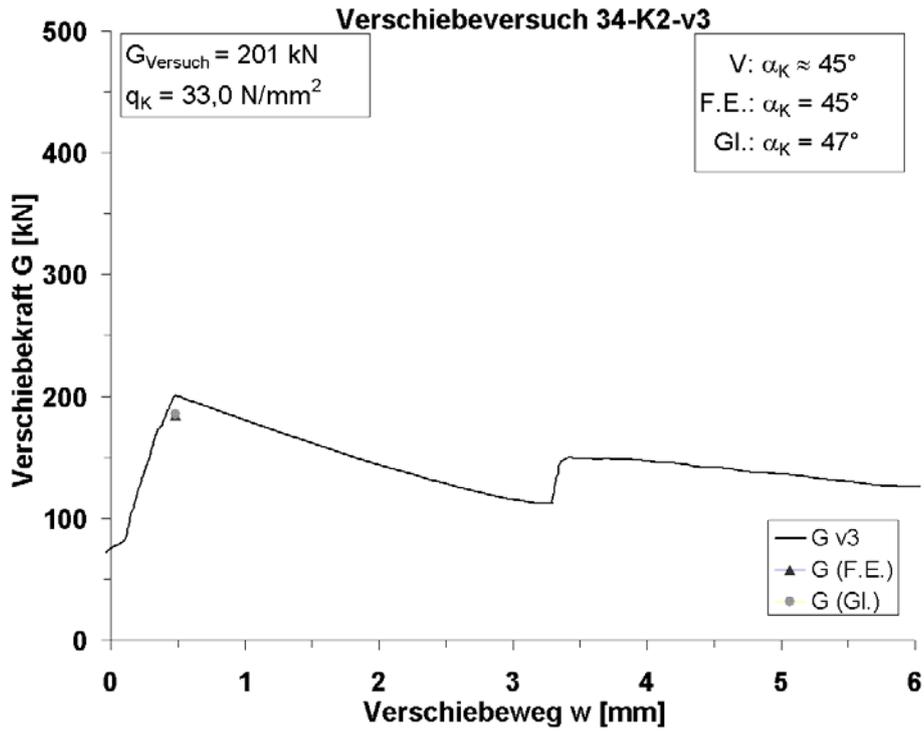


Bild 12-71: Verschiebeversuch 34-K2-v3

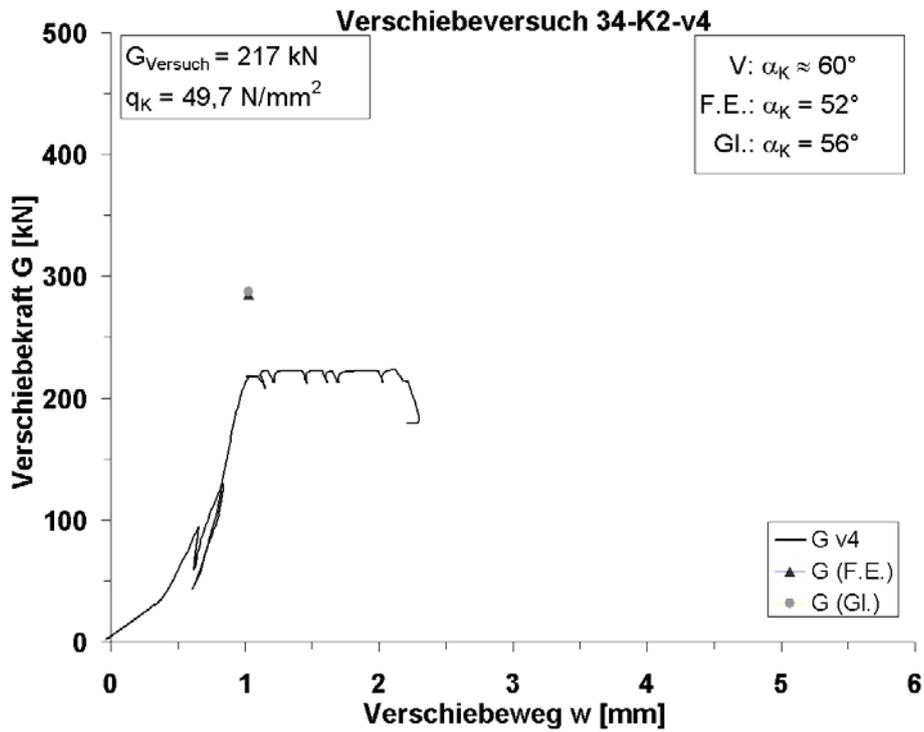


Bild 12-72: Verschiebeversuch 34-K2-v4

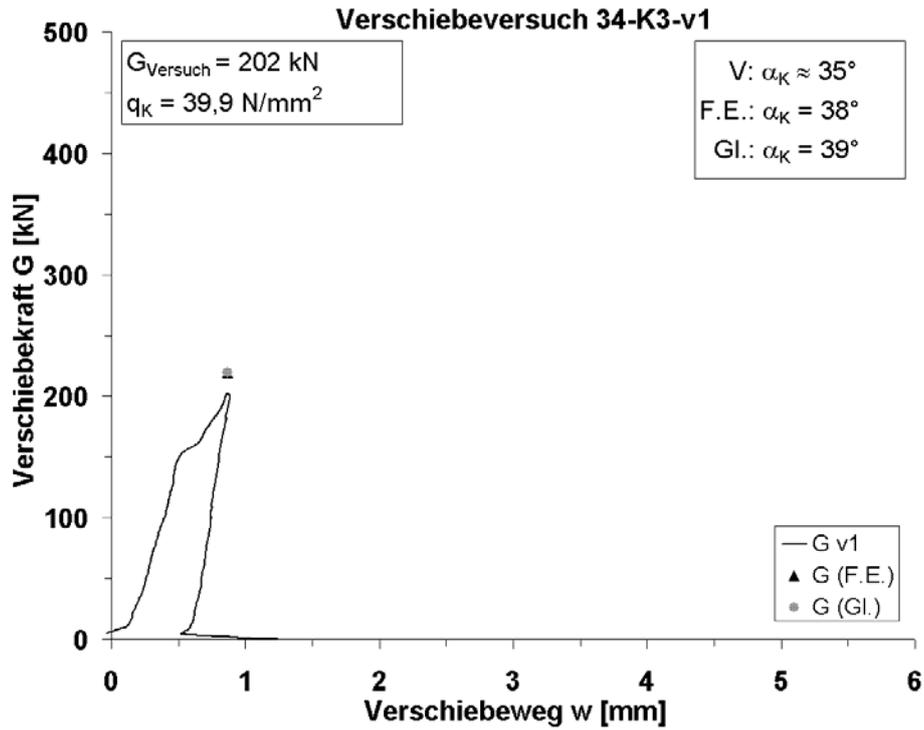


Bild 12-73: Verschiebeversuch 34-K3-v1

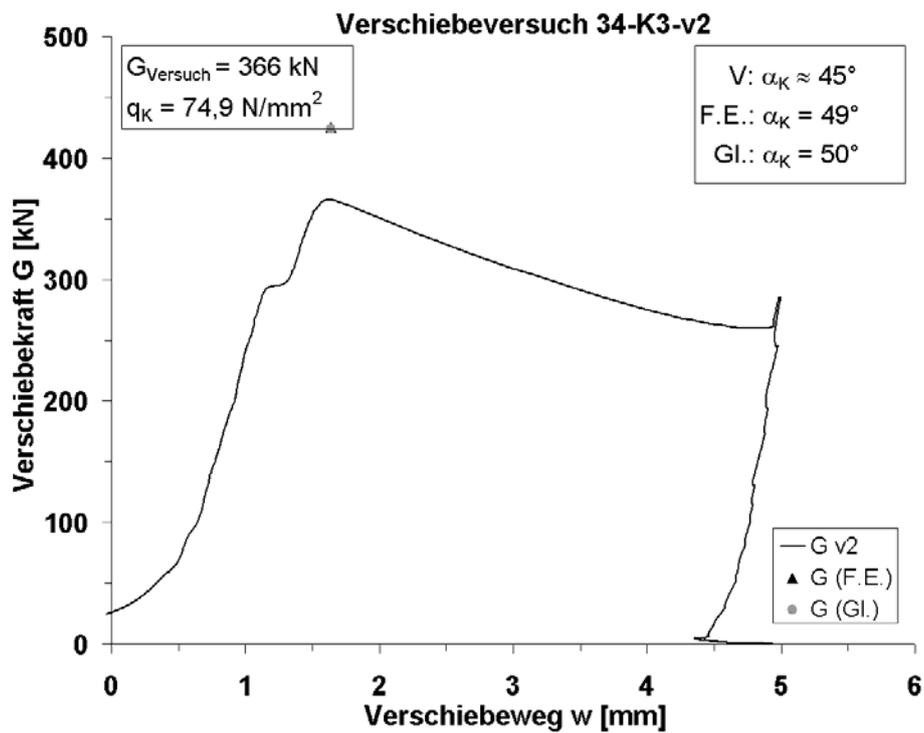


Bild 12-74: Verschiebeversuch 34-K3-v2

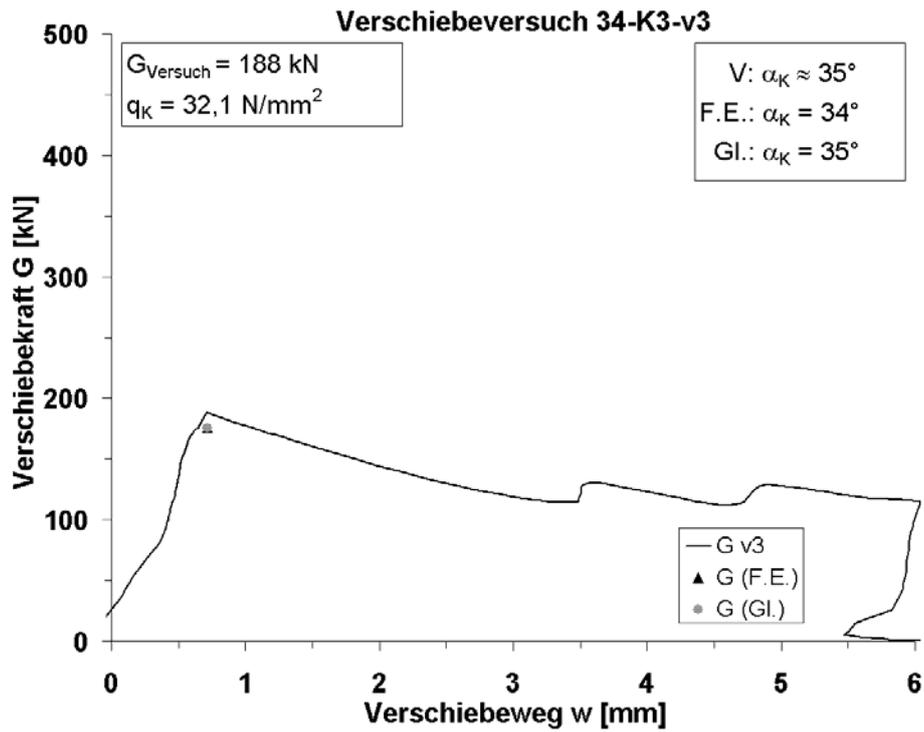


Bild 12-75: Verschiebeversuch 34-K3-v3

## 12.3.3 Seilpressung

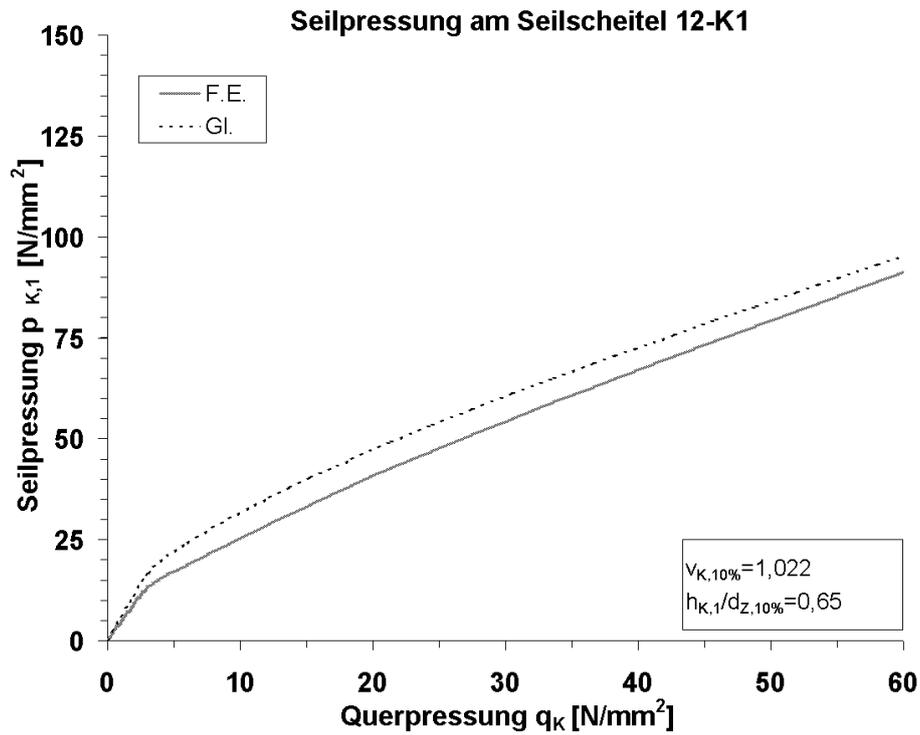


Bild 12-76: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 12-K1

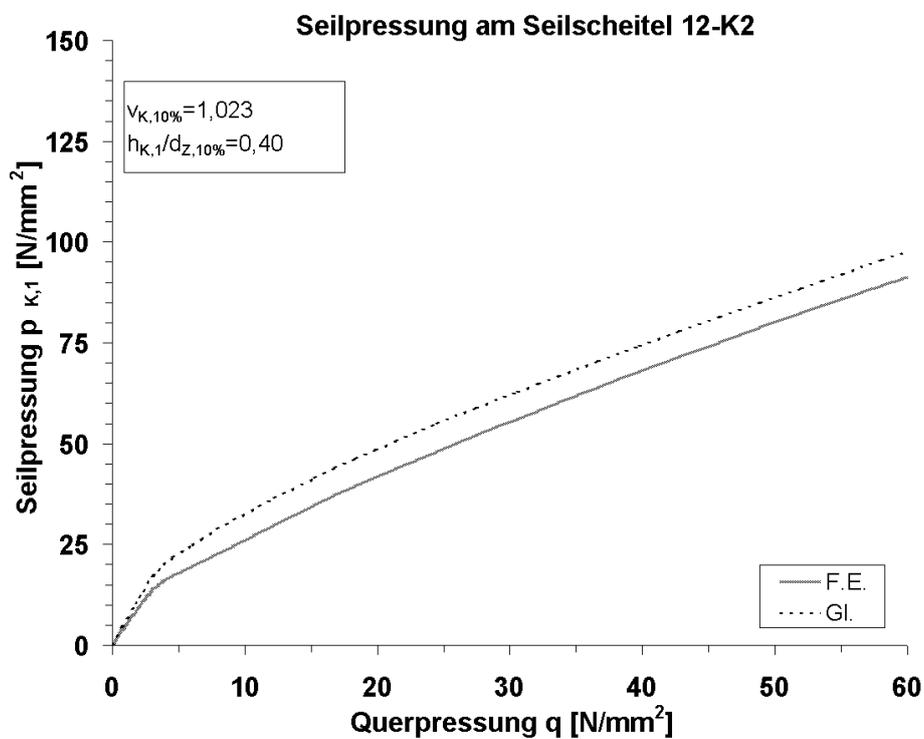


Bild 12-77: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 12-K2

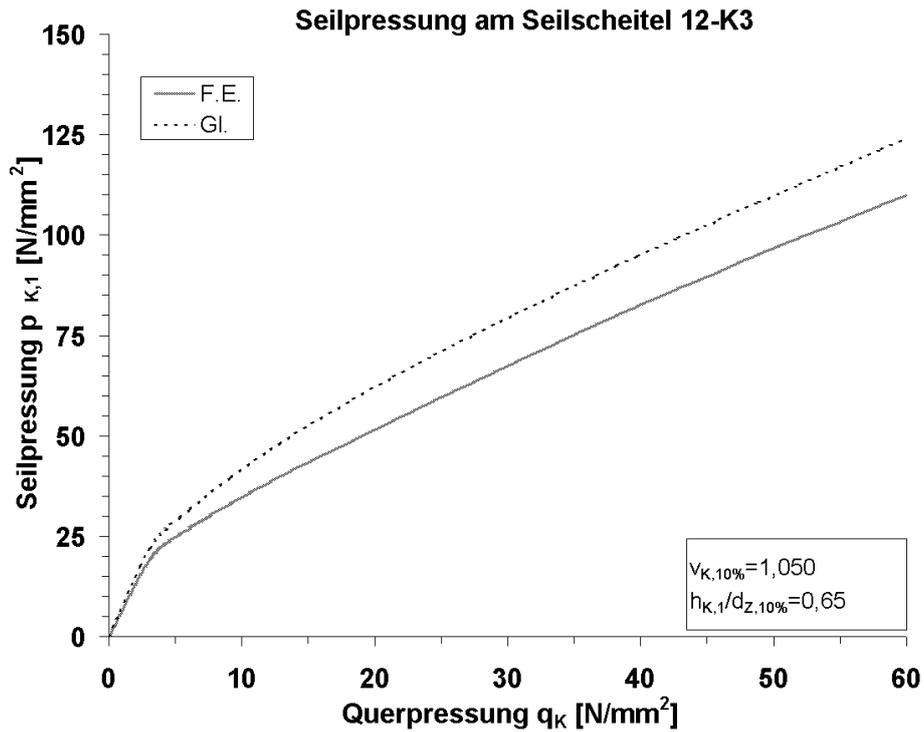


Bild 12-78: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 12-K3

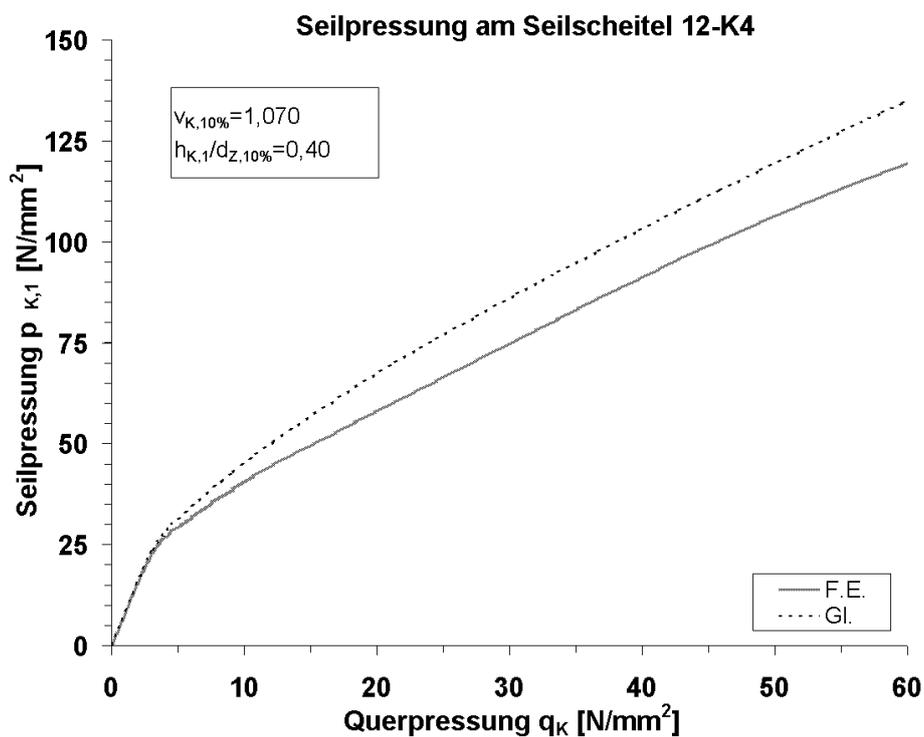


Bild 12-79: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 12-K4

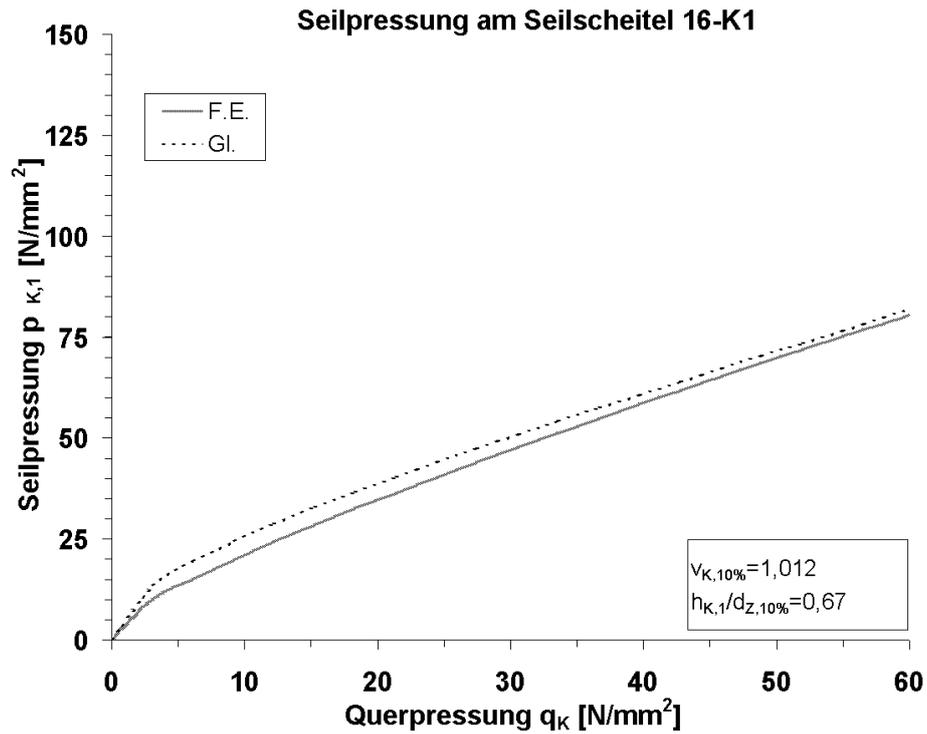


Bild 12-80: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 16-K1

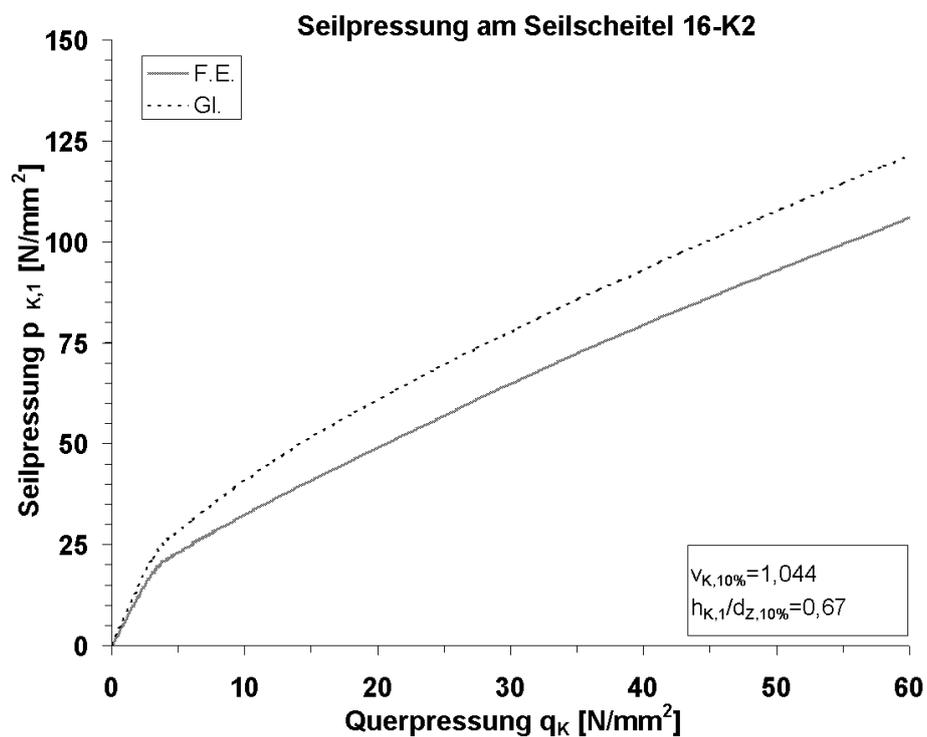


Bild 12-81: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 16-K2

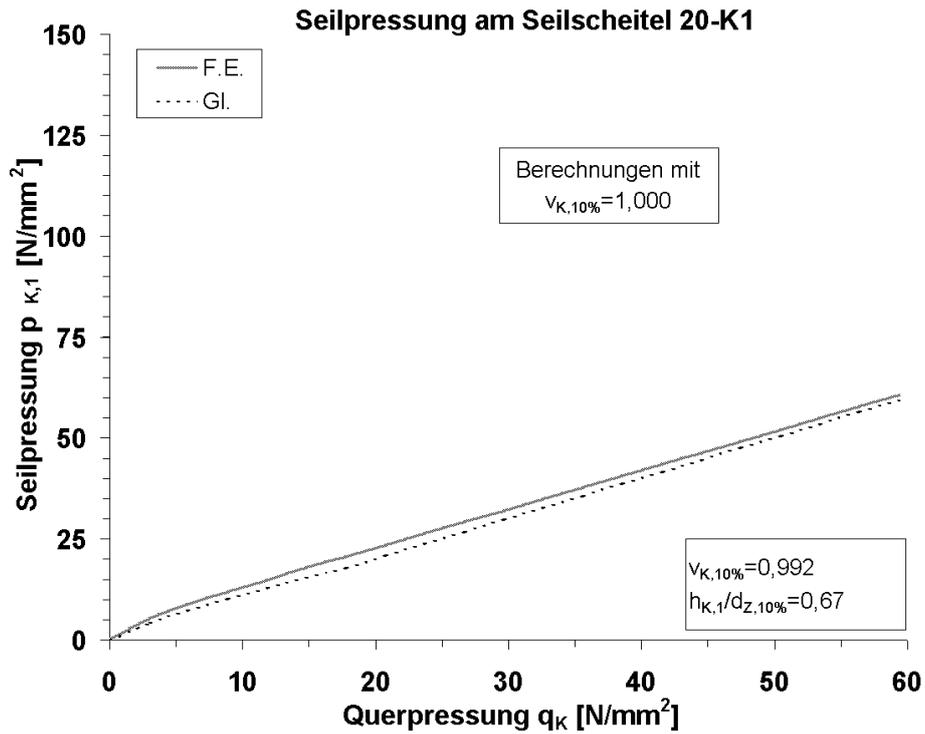


Bild 12-82: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 20-K1

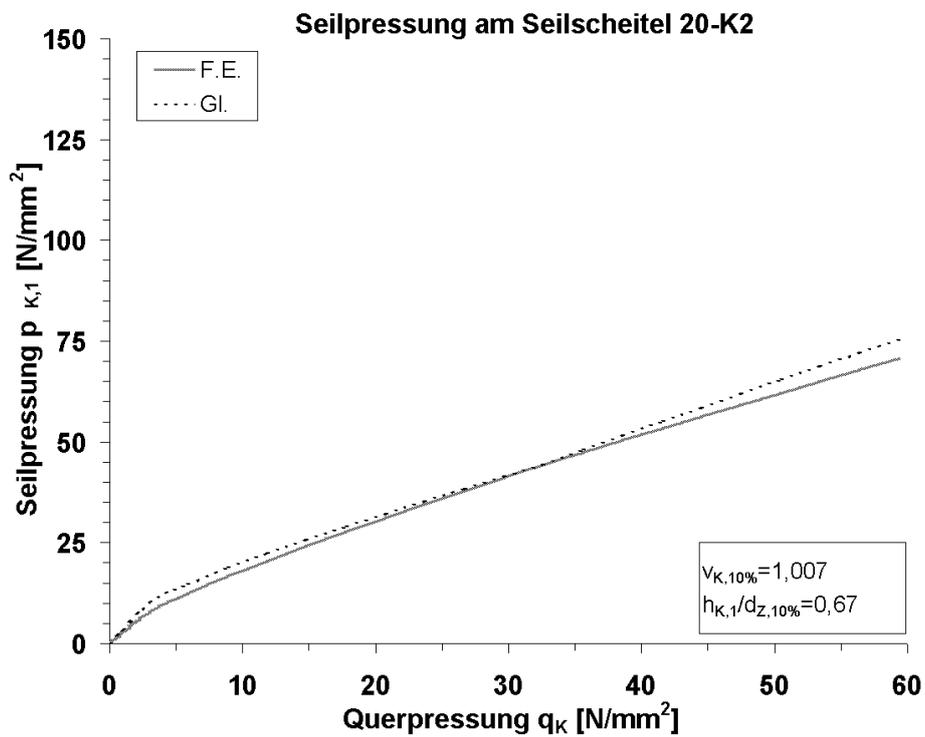


Bild 12-83: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 20-K2

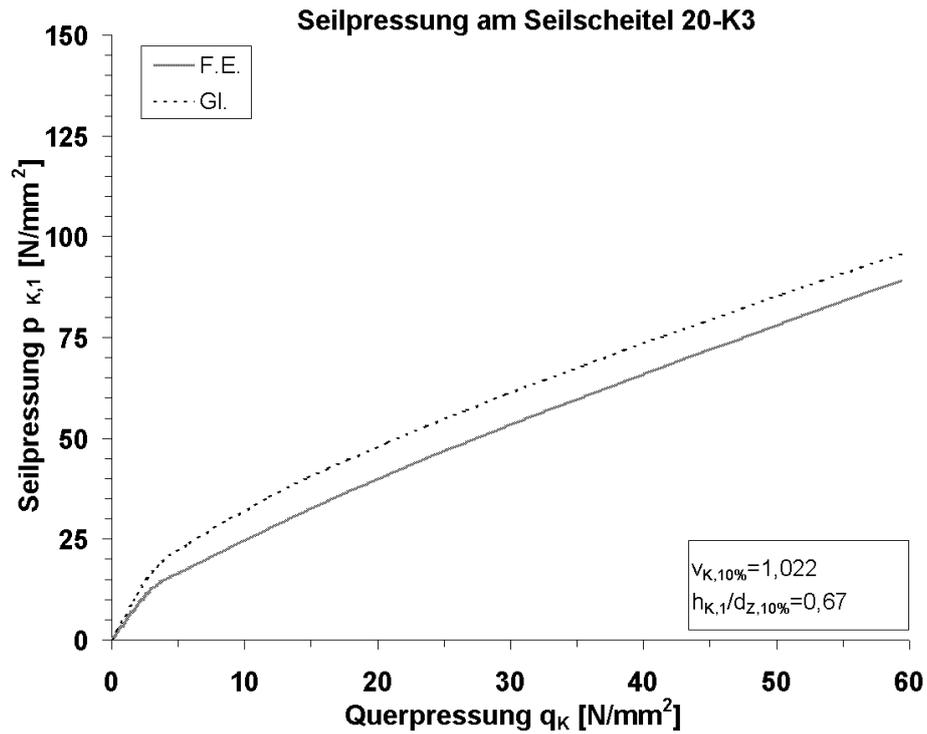


Bild 12-84: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 20-K3

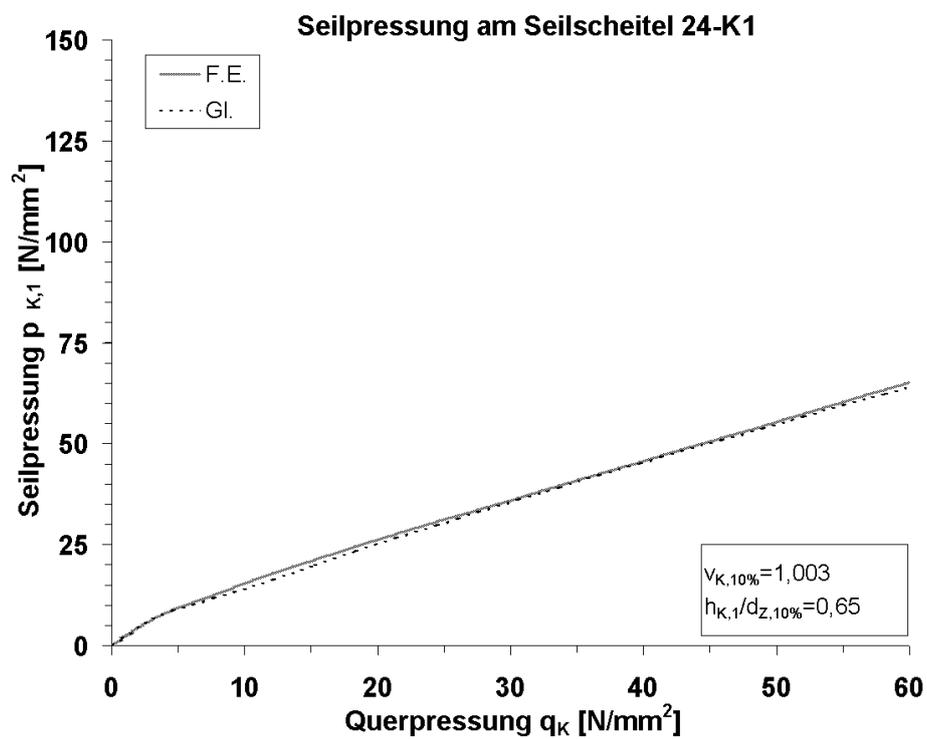


Bild 12-85: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 24-K1

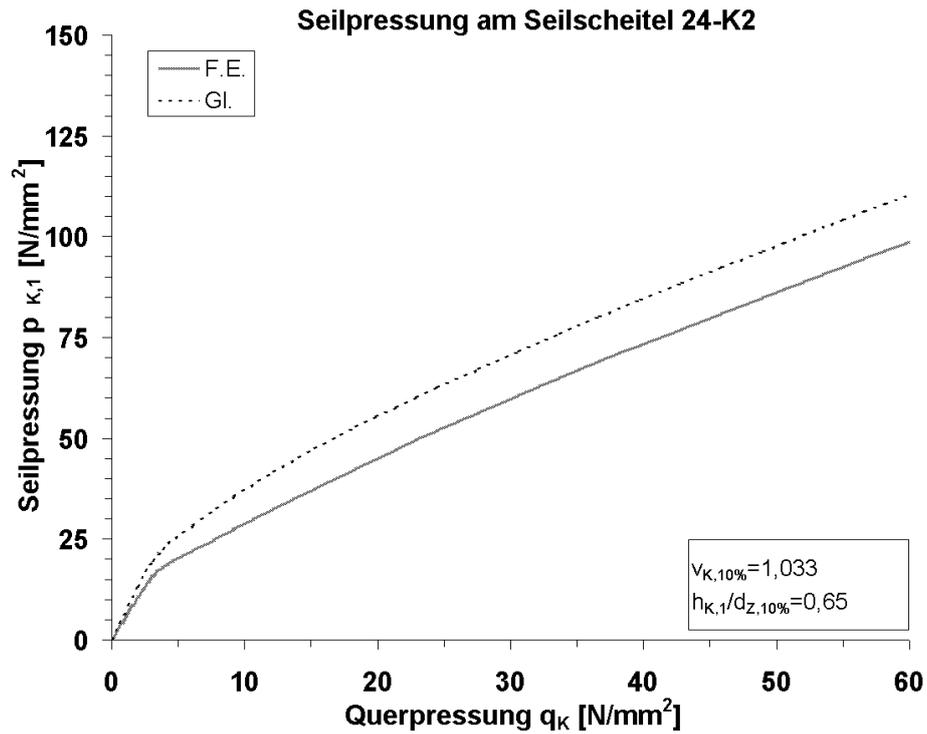


Bild 12-86: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 24-K2

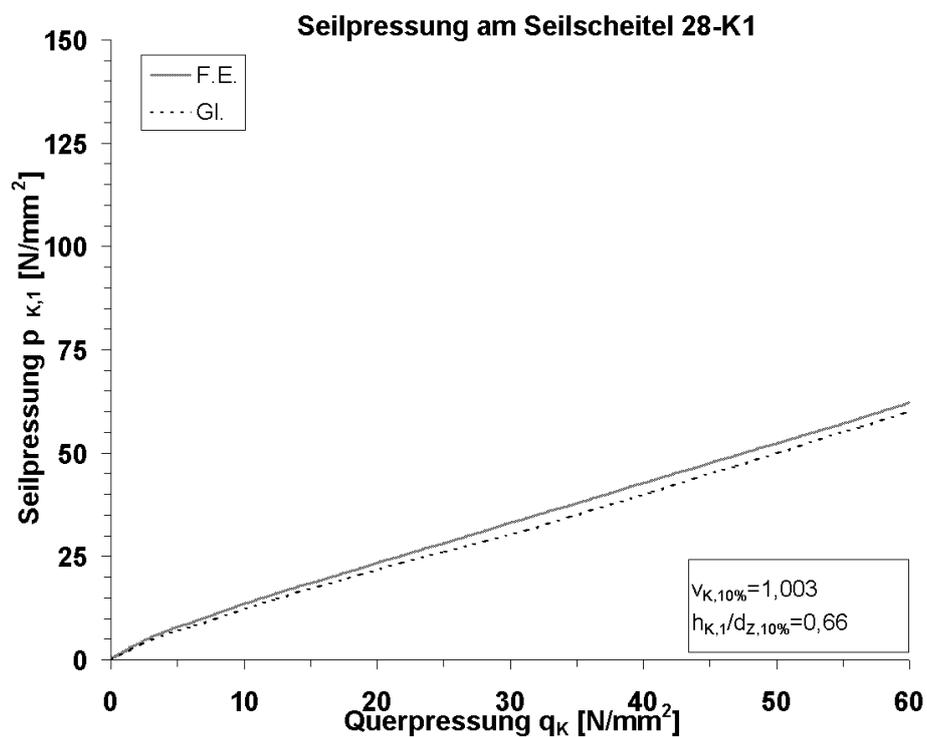


Bild 12-87: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 28-K1

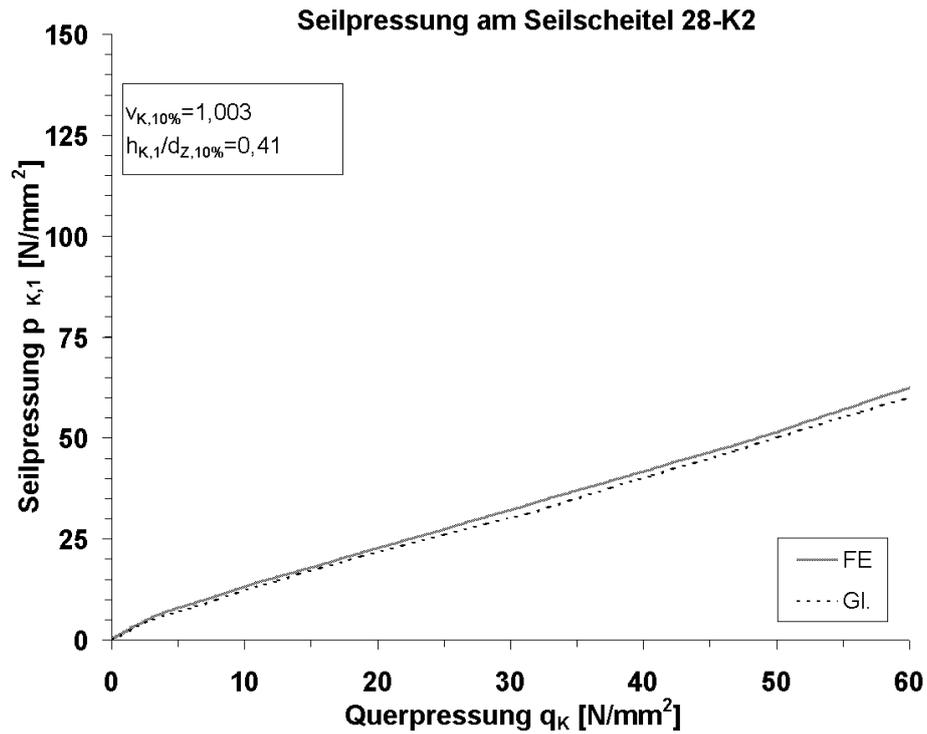


Bild 12-88: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 28-K21

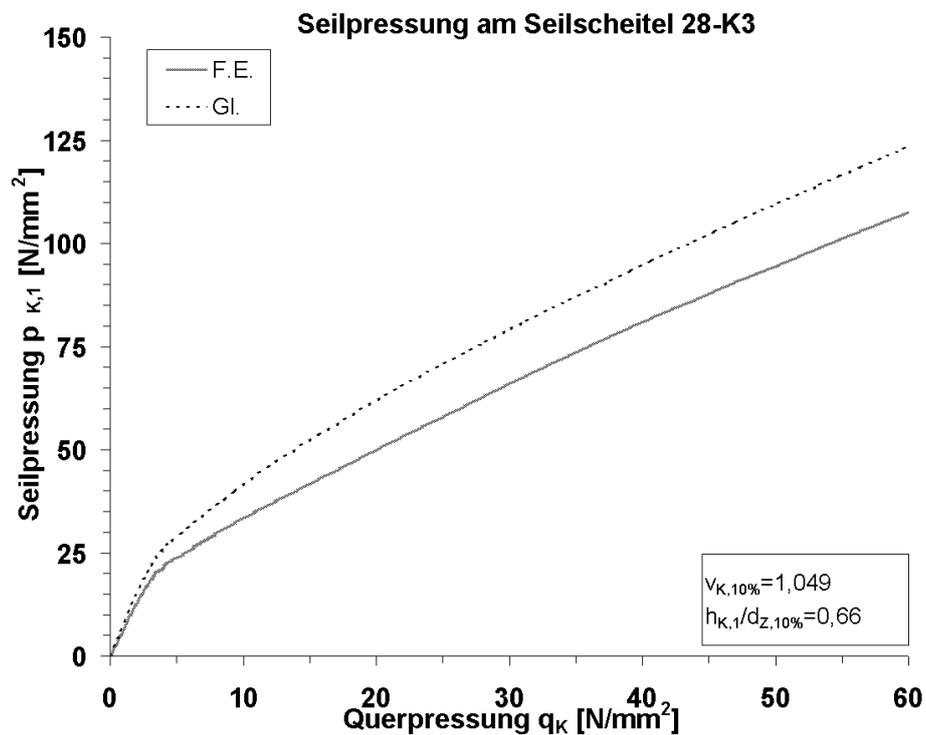


Bild 12-89: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 28-K3

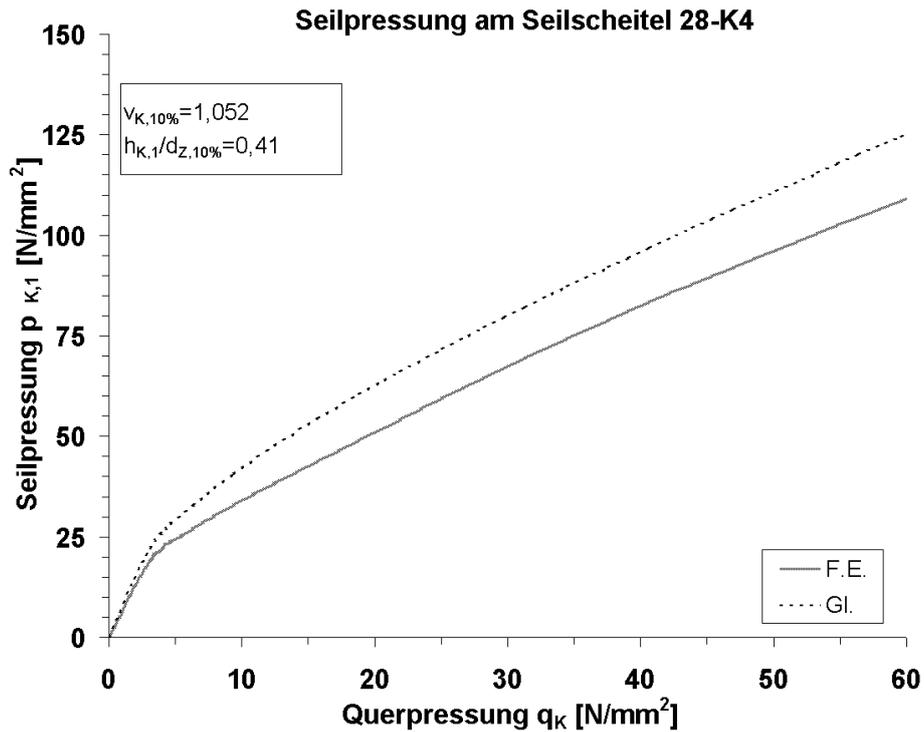


Bild 12-90: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 28-K4

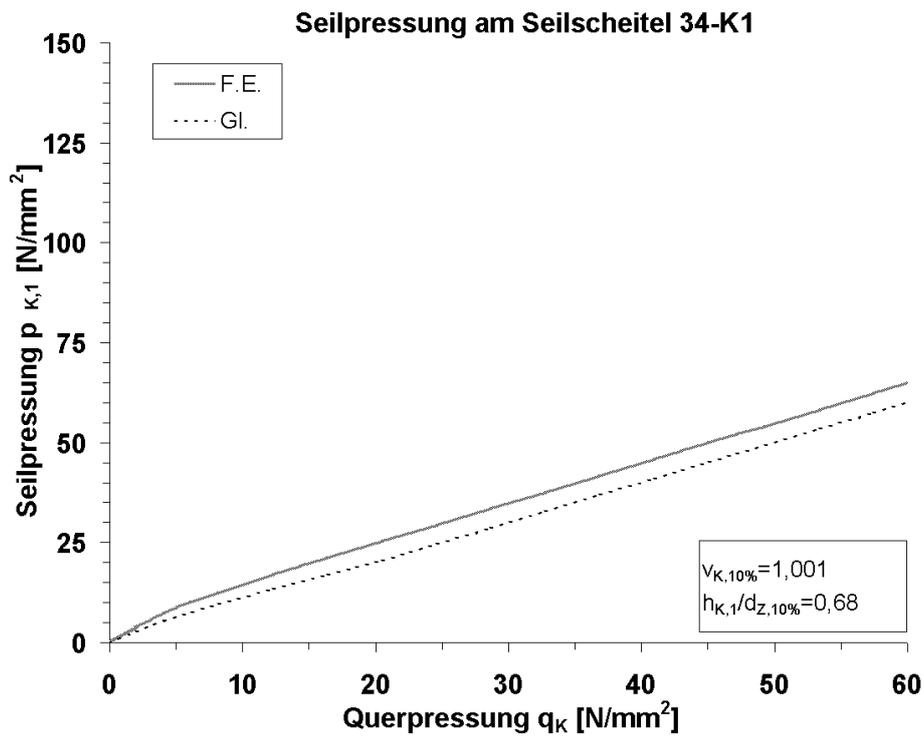


Bild 12-91: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 34-K1

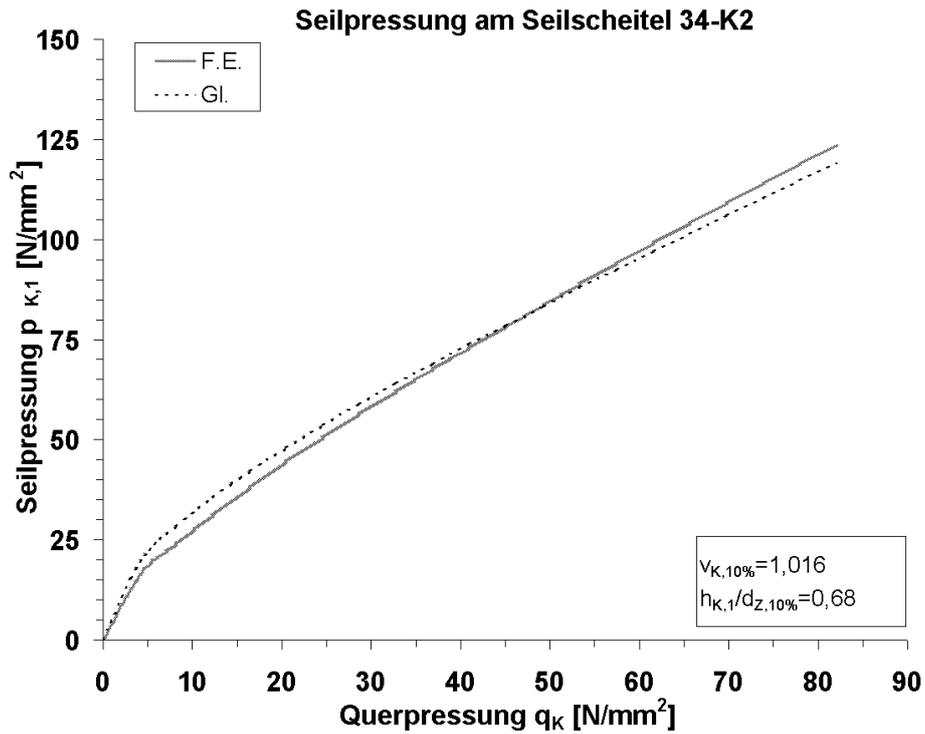


Bild 12-92: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 34-K2

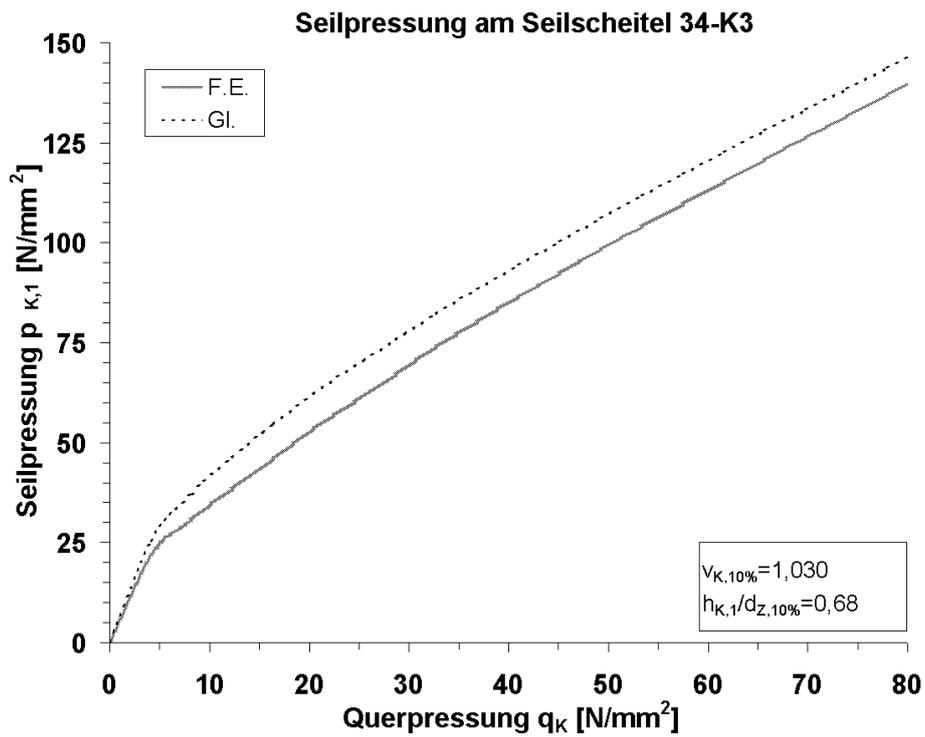


Bild 12-93: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 34-K3

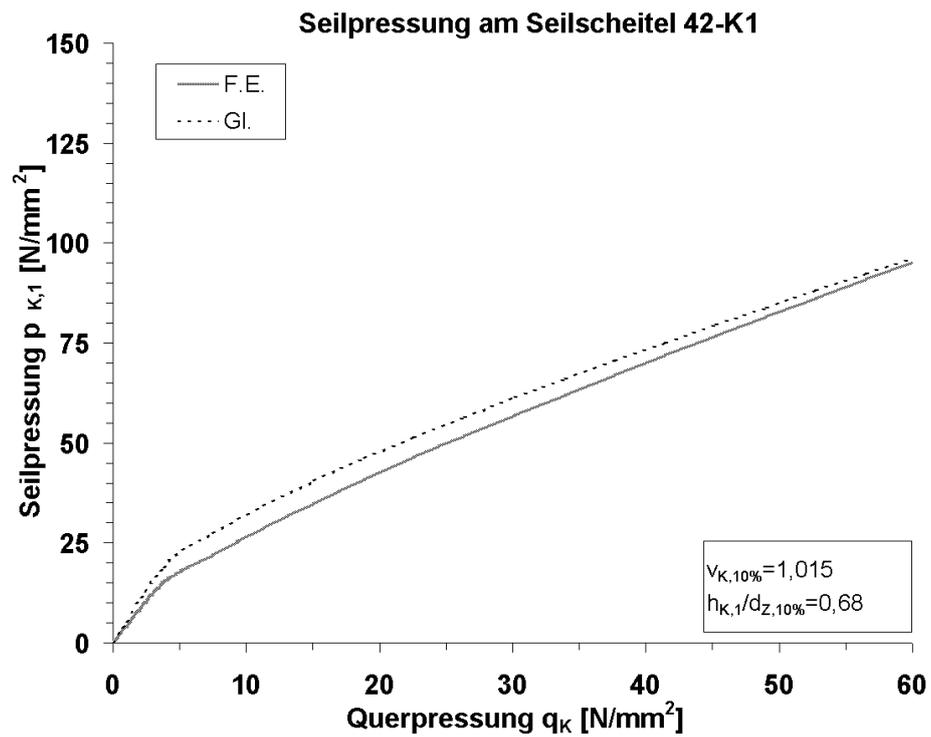


Bild 12-94: Seilpressung am Scheitel in der Seilklemmennut für 42-K1

## 12.4 Ergebnisse der Torsionsversuche

Seilkraft [kN]	Last [kg]	Höhe Wand [mm]	Höhe Raum [mm]	Mittel [mm]	Hebel- arm [mm]	$\phi_z$ [°]	$I_{z,1}$ [mm]	$I_{z,2}$ [mm]	M [Nm]	$G_{z,T}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
50	0,0	1.063	1.054	1.059	401	0,7	2.155	2.155	0,0	
	1,0	1.136	978	1.057	406	11,3	2.155	2.155	4,0	15.193
	4,1	1.304	780	1.042	348	40,9	2.155	2.155	14,0	13.680
	1,0	1.160	952	1.056	405	15,0	2.155	2.155	4,0	15.669
	0,0	1.085	1.036	1.061	404	3,6	2.155	2.155	0,0	14.001
	1,0	1.151	962	1.057	405	13,6	2.155	2.155	4,0	16.001
	4,1	1.308	779	1.044	326	41,4	2.155	2.155	13,1	13.293
	1,0	1.164	950	1.057	404	15,6	2.155	2.155	4,0	14.316
	0,0	1.088	1.031	1.060	404	4,1	2.155	2.155	0,0	13.935
	0,0	1.048	1.070	1.059	401	1,6	2.155	2.155	0,0	
	1,0	964	1.150	1.057	405	13,47	2.155	2.155	4,0	13.534
	1,8	906	1.204	1.055	397	21,85	2.155	2.155	7,0	14.655
	3,1	828	1.273	1.051	371	33,8	2.155	2.155	11,3	14.456
	1,8	895	1.213	1.054	395	23,42	2.155	2.155	7,0	16.780
	1,0	949	1.161	1.055	404	15,3	2.155	2.155	4,0	14.997
	0,0	1.031	1.090	1.061	404	4,17	2.155	2.155	0,0	14.398
	1,0	953	1.159	1.056	404	15,05	2.155	2.155	4,0	14.729
	1,8	897	1.211	1.054	395	23,05	2.155	2.155	7,0	15.222
	3,1	820	1.274	1.047	369	34,55	2.155	2.155	11,2	14.932
	1,8	895	1.213	1.054	395	23,42	2.155	2.155	7,0	15.428
1,0	947	1.164	1.056	404	15,68	2.155	2.155	4,0	15.733	
0,0	1.028	1.089	1.059	404	4,42	2.155	2.155	0,0	14.232	
<b>Min 13.293</b>										
<b>Mittel 14.759</b>										
<b>Max 16.780</b>										

Tabelle 12-13: Ergebnisse aus dem Torsionsversuch am Seil OSS 12 1x37 zn

Seilkraft	Last	Höhe Wand	Höhe Raum	Mittel	Hebelarm	$\phi_z$	$l_{z,1}$	$l_{z,2}$	M	$G_{z,T}$
[kN]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[mm]	[mm]	[Nm]	[N/mm <sup>2</sup> ]
215	0,0	1.035	1.042	1.039	500	-0,37	1.478	1.478	0,0	
	12,8	1.070	1.006	1.038	499	3,6	1.478	1.478	62,5	14.571
	25,4	1.110	962	1.036	500	8,5	1.478	1.478	124,6	11.936
	12,8	1.080	996	1.038	500	4,9	1.478	1.478	62,6	16.011
	0,0	1.046	1.032	1.039	500	0,8	1.478	1.478	0,0	14.189
	12,8	1.009	1.070	1.040	499	-3,6	1.478	1.478	62,5	13.372
	25,4	962	1.111	1.037	500	-8,6	1.478	1.478	124,5	11.606
	12,8	996	1.079	1.038	500	-4,8	1.478	1.478	62,5	15.374
	0,0	1.033	1.044	1.039	500	-0,6	1.478	1.478	0,0	13.767
	12,8	1.070	1.005	1.038	499	3,7	1.478	1.478	62,5	13.654
	25,4	1.109	962	1.036	500	8,6	1.478	1.478	124,5	11.916
	12,8	1.078	998	1.038	499	4,5	1.478	1.478	62,5	14.246
	0,0	1.044	1.035	1.040	496	0,5	1.478	1.478	0,0	14.621
	12,8	1.004	1.072	1.038	499	-3,9	1.478	1.478	62,5	13.345
	25,4	964	1.110	1.037	500	-8,4	1.478	1.478	124,6	12.772
	12,8	997	1.078	1.038	500	-4,7	1.478	1.478	62,5	15.483
	0,0	1.034	1.043	1.039	496	0,0	1.478	1.478	0,0	12.474
									<b>Min</b>	<b>11.606</b>
									<b>Mittel</b>	<b>13.709</b>
									<b>Max</b>	<b>16.011</b>

Tabelle 12-14: Ergebnisse aus dem Torsionsversuch am Seil OSS 28 1x37 zn

Seilkraft	Last	Höhe Wand	Höhe Raum	Mittel	Hebel- arm	$\phi_z$	$I_{z,1}$	$I_{z,2}$	M	$G_{z,T}$
[kN]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[mm]	[mm]	[Nm]	[N/mm <sup>2</sup> ]
200	0,0	668	718	693	500	-2,4	1.285	16.815	0,0	
	5,0	679	707	693	500	-1,3	1.285	16.815	24,5	12.927
	15,0	700	684	692	500	0,8	1.285	16.815	73,6	12.914
	25,0	722	661	692	500	2,9	1.285	16.815	122,6	12.640
	30,0	735	647	691	500	4,2	1.285	16.815	147,2	10.562
	0,0	670	715	693	500	-2,1	1.285	16.815	0,0	12.833
250	0,0	674	715	695	500	-2,0	1.285	16.815	0,0	
	5,0	684	704	694	500	-1,0	1.285	16.815	24,5	13.537
	15,0	705	682	694	500	1,1	1.285	16.815	73,6	13.214
	25,0	727	658	693	500	3,3	1.285	16.815	122,6	12.371
	30,0	738	647	693	500	4,3	1.285	16.815	147,2	12.970
	0,0	674	714	694	500	-1,9	1.285	16.815	0,0	13.030
300	0,0	676	715	696	500	-1,9	1.285	16.815	0,0	
	5,0	687	705	696	500	-0,9	1.285	16.815	24,5	13.536
	15,0	708	683	696	500	1,2	1.285	16.815	73,6	13.215
	25,0	728	661	695	500	3,2	1.285	16.815	122,6	13.549
	30,0	741	649	695	500	4,4	1.285	16.815	147,2	11.413
	0,0	678	714	696	500	-1,7	1.285	16.815	0,0	13.336
350	0,0	653	749	701	500	-4,6	1.285	16.815	0,0	
	5,0	661	739	700	500	-3,7	1.285	16.815	24,5	15.865
	15,0	682	715	699	500	-1,6	1.285	16.815	73,6	12.654
	25,0	708	690	699	500	0,9	1.285	16.815	122,6	11.143
200	0,0	613	769	691	500	-7,4	5.285	12.815	0,0	
	5,0	645	735	690	500	-4,3	5.285	12.815	24,5	13.637
	15,0	713	664	689	500	2,3	5.285	12.815	73,6	12.830
	25,0	788	587	688	500	9,5	5.285	12.815	122,6	11.858
	30,0	826	546	686	500	13,1	5.285	12.815	147,2	11.728
	25,0	793	582	688	500	10,0	5.285	12.815	122,6	13.448
	15,0	726	652	689	500	3,5	5.285	12.815	73,6	13.196
	5,0	657	723	690	500	-3,1	5.285	12.815	24,5	12.735
	0,0	622	760	691	500	-6,6	5.285	12.815	0,0	12.460
250	0,0	620	770	695	500	-7,1	5.285	12.815	0,0	
	5,0	650	736	693	500	-4,1	5.285	12.815	24,5	14.051
	30,0	824	556	690	500	12,6	5.285	12.815	147,2	12.738
	25,0	793	590	692	500	9,6	5.285	12.815	122,6	14.230
	15,0	726	659	693	500	3,2	5.285	12.815	73,6	13.274
	5,0	659	728	694	500	-3,3	5.285	12.815	24,5	13.109
	0,0	625	763	694	500	-6,6	5.285	12.815	0,0	13.004

Seilkraft	Last	Höhe Wand	Höhe Raum	Mittel	Hebelarm	$\phi_z$	$I_{z,1}$	$I_{z,2}$	M	$G_{z,T}$
[kN]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[mm]	[mm]	[Nm]	[N/mm <sup>2</sup> ]
300	0,0	624	755	690	500	-6,2	5.285	12.815	0,0	
	5,0	656	721	689	500	-3,1	5.285	12.815	24,5	13.585
	15,0	585	788	687	500	-9,6	5.285	12.815	73,6	13.079
	20,0	547	825	686	500	-13,0	5.285	12.815	98,1	12.353
	25,0	579	794	687	500	-10,2	5.285	12.815	122,6	14.733
350	0,0	623	771	697	500	-7,0	5.285	12.815	0,0	
	5,0	655	738	697	500	-4,0	5.285	12.815	24,5	13.829
	15,0	720	672	696	500	2,3	5.285	12.815	73,6	13.611
	25,0	789	600	695	500	9,0	5.285	12.815	122,6	12.767
	30,0	826	562	694	500	12,4	5.285	12.815	147,2	12.299
	0,0	630	766	698	500	-6,5	5.285	12.815	0,0	13.516
200	0,0	694	657	676	500	1,8	9.285	8.815	0,0	
	5,0	648	699	674	500	-2,4	9.285	8.815	24,5	12.234
	15,0	562	779	671	500	-10,3	9.285	8.815	73,6	13.146
	25,0	478	854	666	500	-17,4	9.285	8.815	122,6	14.377
250	0,0	694	661	678	500	1,6	9.285	8.815	0,0	
	5,0	653	700	677	500	-2,2	9.285	8.815	24,5	13.456
	15,0	572	777	675	500	-9,7	9.285	8.815	73,6	13.790
	25,0	492	853	673	500	-16,7	9.285	8.815	122,6	14.579
	30,0	454	894	674	500	-20,1	9.285	8.815	147,2	15.141
	0,0	689	669	679	500	1,0	9.285	8.815	0,0	14.616
300	0,0	696	665	681	500	1,5	9.285	8.815	0,0	
	5,0	653	705	679	500	-2,5	9.285	8.815	24,5	12.971
	15,0	571	784	678	500	-10,1	9.285	8.815	73,6	13.550
	25,0	495	853	674	500	-16,6	9.285	8.815	122,6	15.697
	30,0	454	890	672	500	-20,0	9.285	8.815	147,2	15.309
	0,0	687	674	681	500	0,6	9.285	8.815	0,0	14.973
350	0,0	697	667	682	500	1,4	9.285	8.815	0,0	
	5,0	652	706	679	500	-2,6	9.285	8.815	24,5	12.817
	15,0	574	784	679	500	-9,9	9.285	8.815	73,6	13.981
	25,0	496	854	675	500	-16,6	9.285	8.815	122,6	15.371
	30,0	457	892	675	500	-19,9	9.285	8.815	147,2	15.504
	0,0	689	675	682	500	0,7	9.285	8.815	0,0	14.969

**Min 10.562**  
**Mittel 13.394**  
**Max 15.865**

Tabelle 12-15: Ergebnisse aus dem Torsionsversuch am Seil OSS 36 1x61 zn

Seilkraft	Last	Höhe Wand	Höhe Raum	Mittel	Hebelarm	$\phi_z$	$I_{z,1}$	$I_{z,2}$	M	$G_{z,T}$
[kN]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[mm]	[mm]	[Nm]	[N/mm <sup>2</sup> ]
25	0,0	1.055	1.030	1.043	497	1,42	1.334	1.334	0,0	
	0,8	1.128	955	1.042	500	10,1	1.334	1.334	4,0	11.565
	1,6	1.196	883	1.040	492	18,4	1.334	1.334	7,9	11.561
	0,8	1.132	952	1.042	500	10,4	1.334	1.334	4,0	12.099
	0,0	1.060	1.027	1.044	498	1,9	1.334	1.334	0,0	11.752
	0,0	1.049	1.038	1.044	496	0,7	1.334	1.334	0,0	
	0,8	974	1.111	1.043	500	7,9	1.334	1.334	4,0	13.772
	1,6	901	1.181	1.041	495	16,4	1.334	1.334	7,9	11.510
	0,8	971	1.114	1.043	500	8,3	1.334	1.334	4,0	12.049
	0,0	1.045	1.041	1.043	496	0,1	1.334	1.334	0,0	12.178
									<b>Min</b>	<b>11.510</b>
									<b>Mittel</b>	<b>12.061</b>
									<b>Max</b>	<b>13.772</b>

Tabelle 12-16: Ergebnisse aus dem Torsionsversuch am Seil OSS 12 1x19 niro

## 12.5 Ergebnisse der Setzungsversuche

### 12.5.1 Zeitliche Setzungen am gespannten Seil

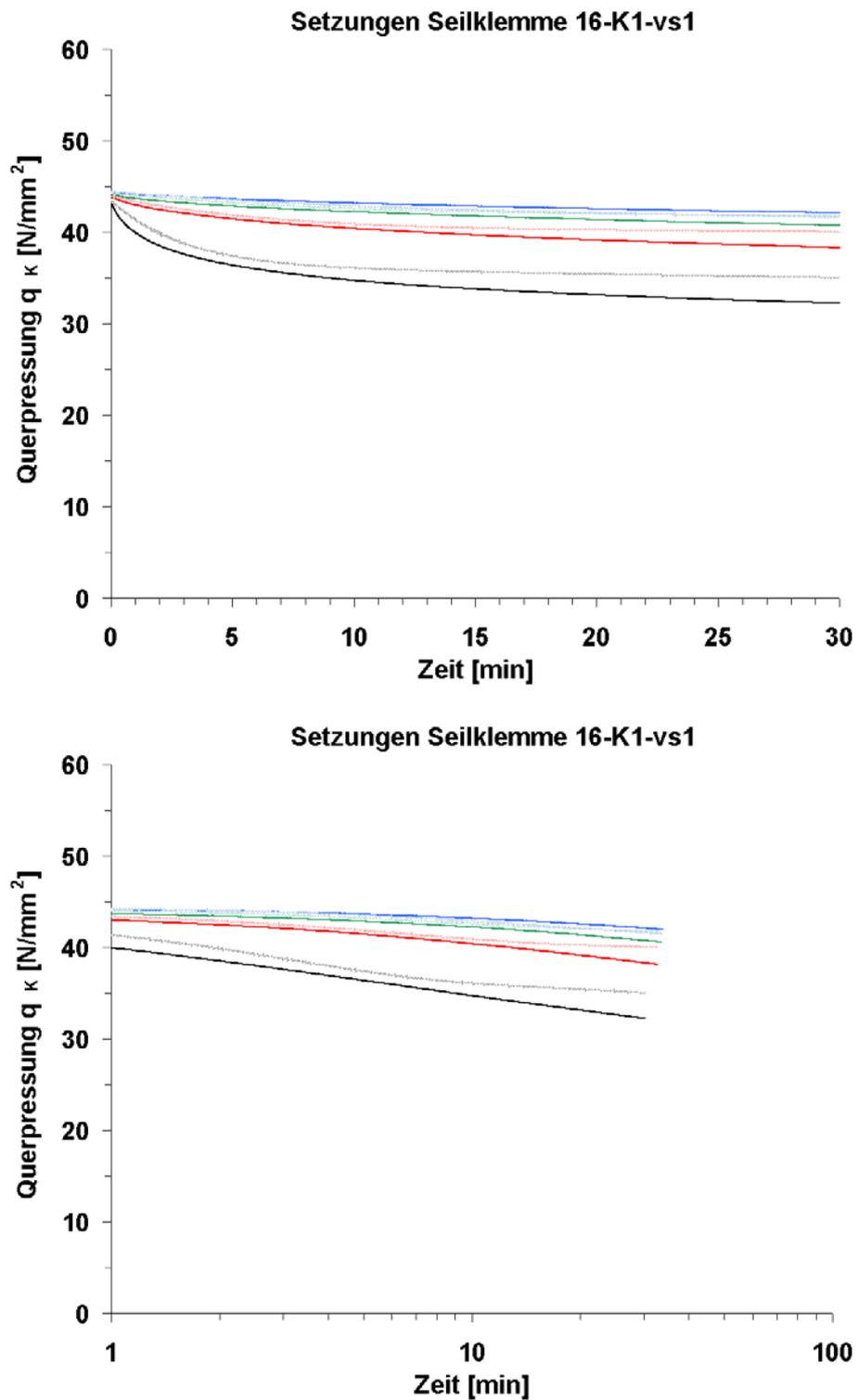


Bild 12-95: Zeitliche Setzungen 16-K1-vs1

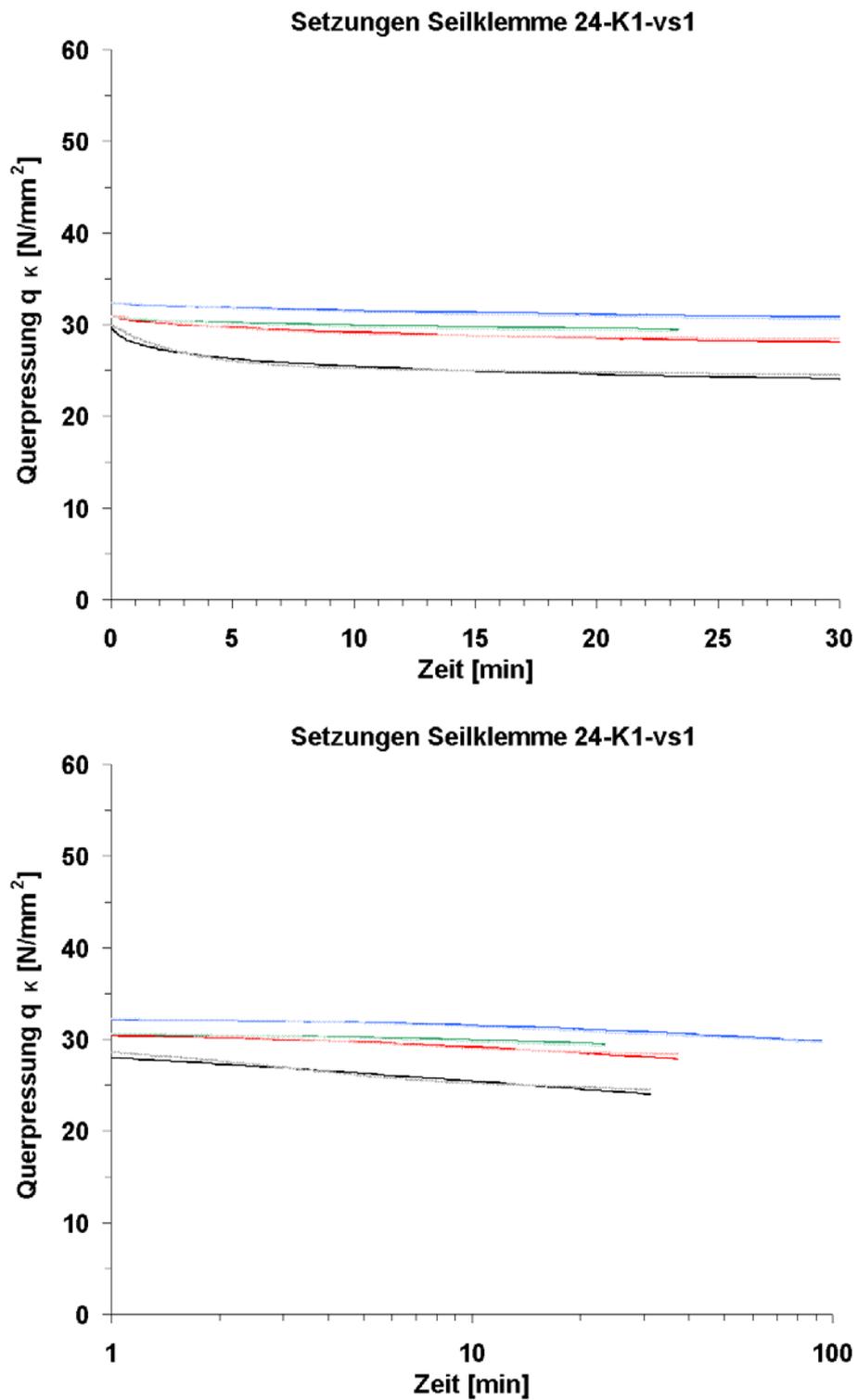


Bild 12-96: Zeitliche Setzungen 24-K1-vs1

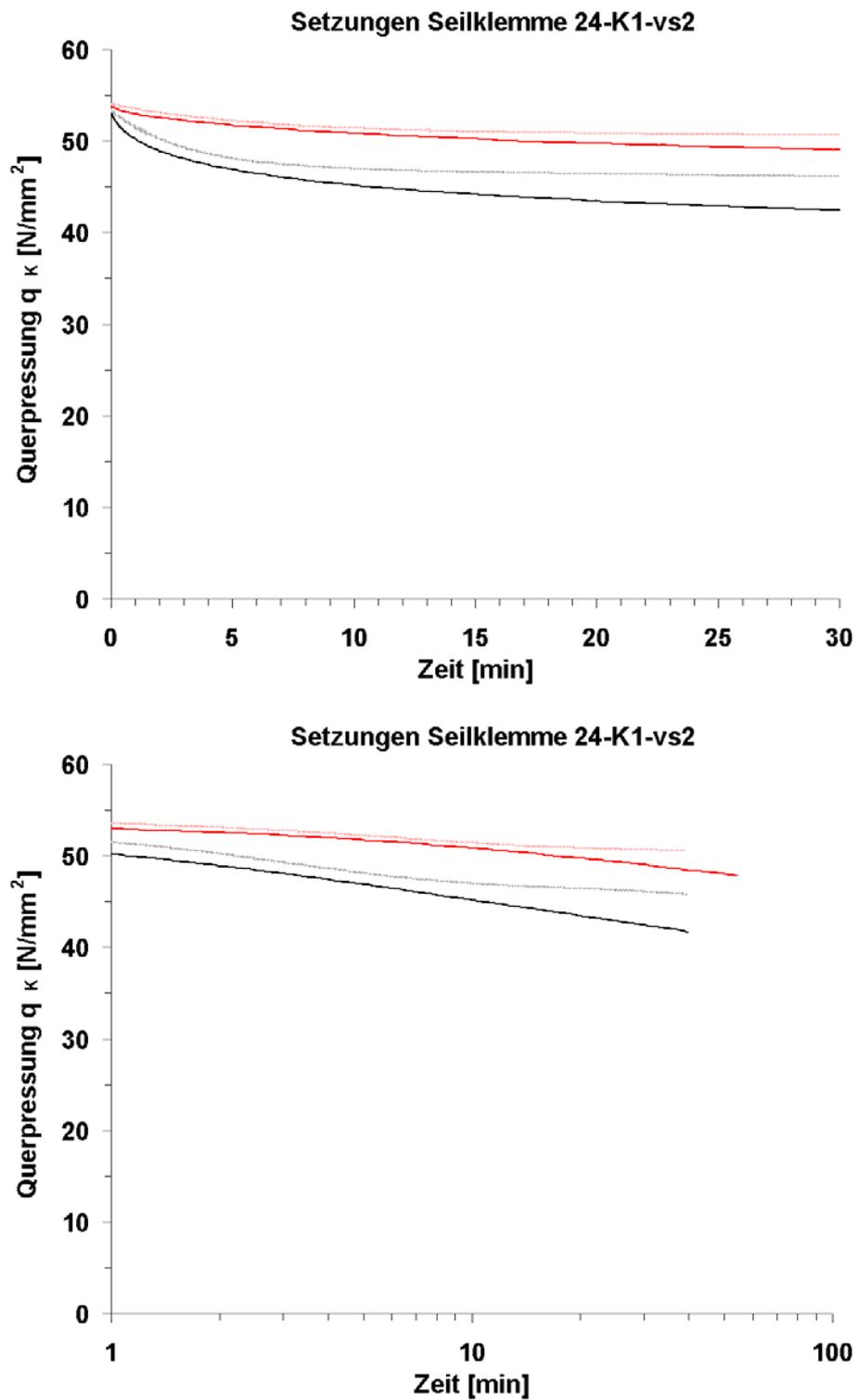


Bild 12-97: Zeitliche Setzungen 24-K1-vs2

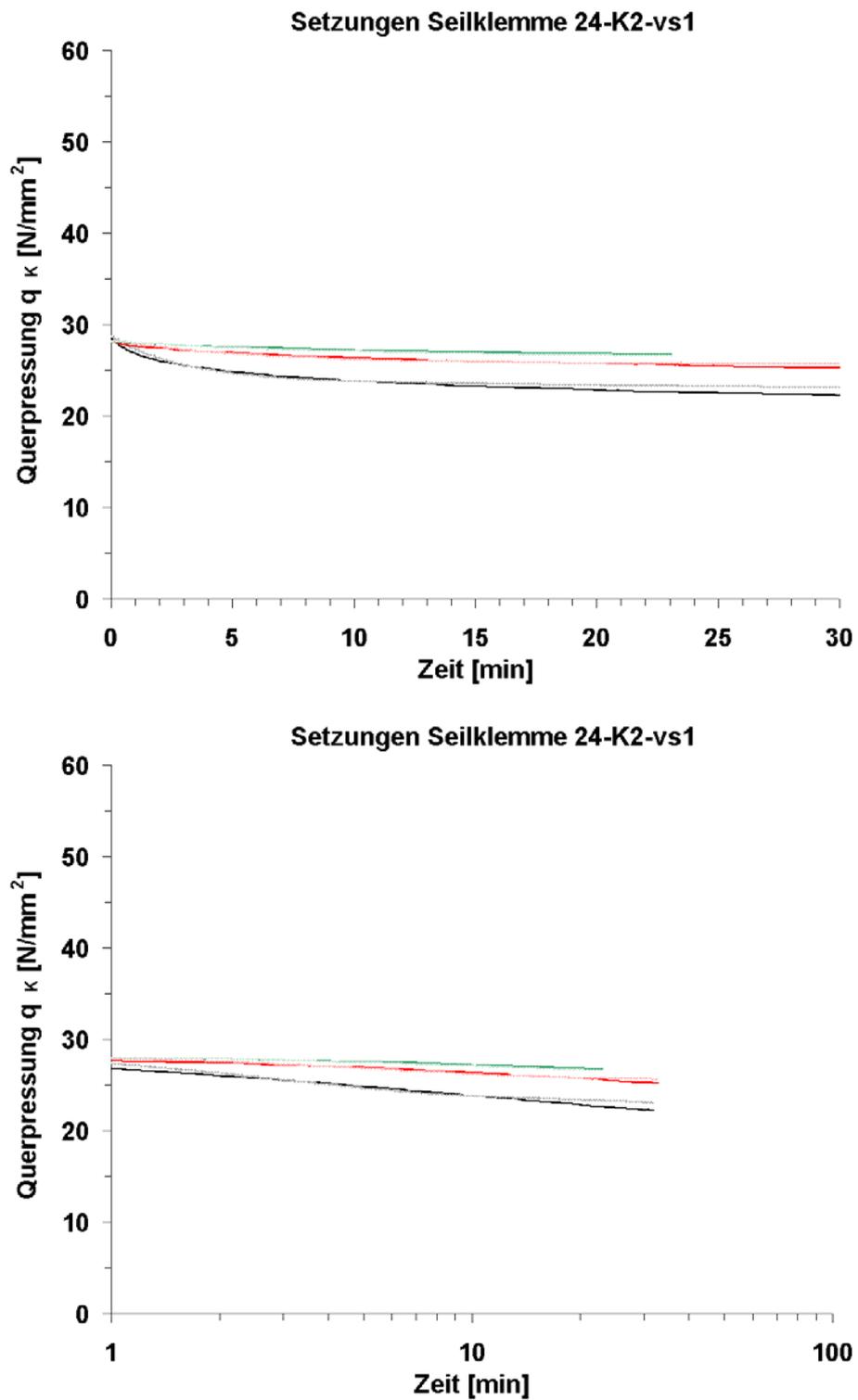


Bild 12-98: Zeitliche Setzungen 24-K2-vs1

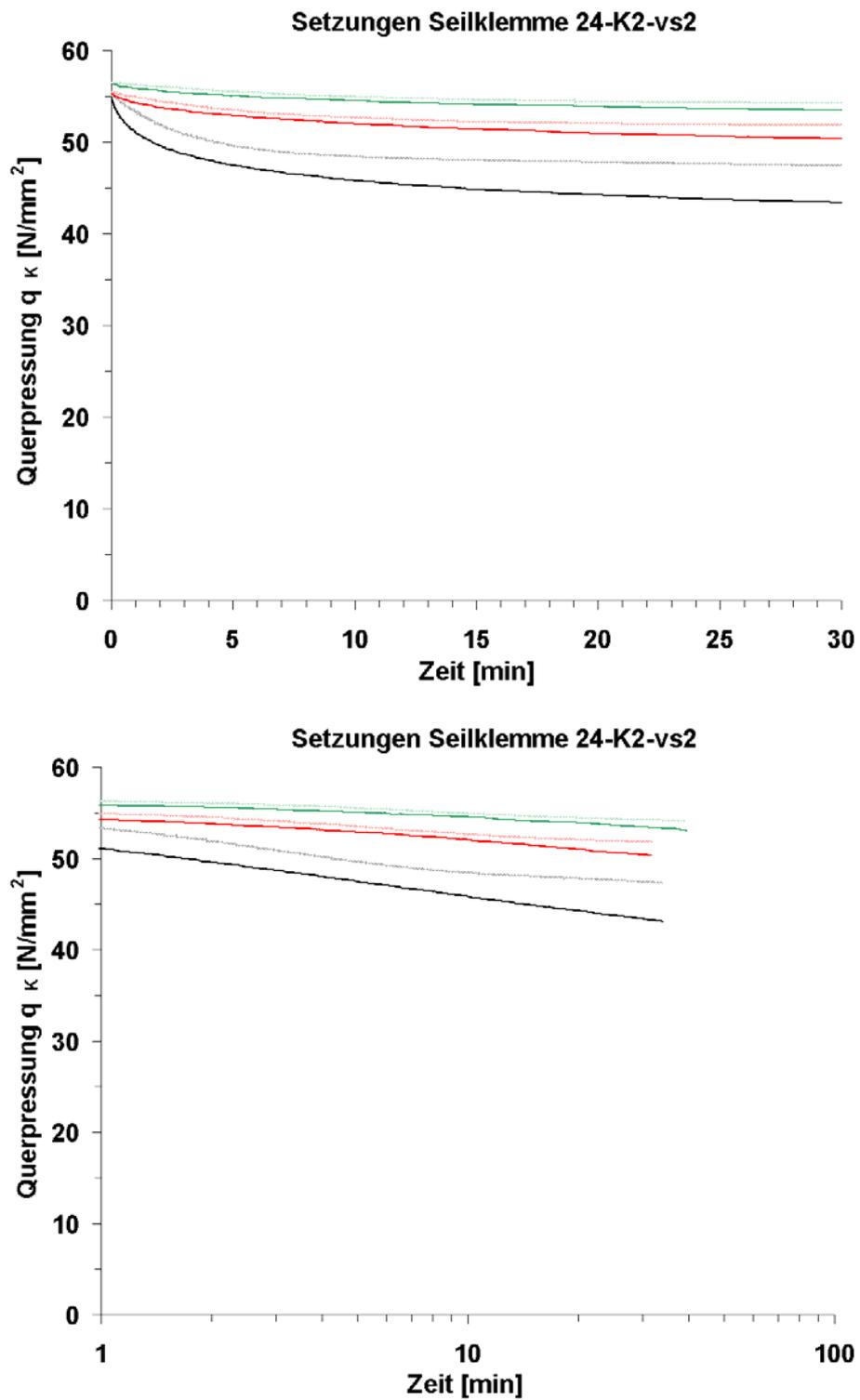


Bild 12-99: Zeitliche Setzungen 24-K2-vs2

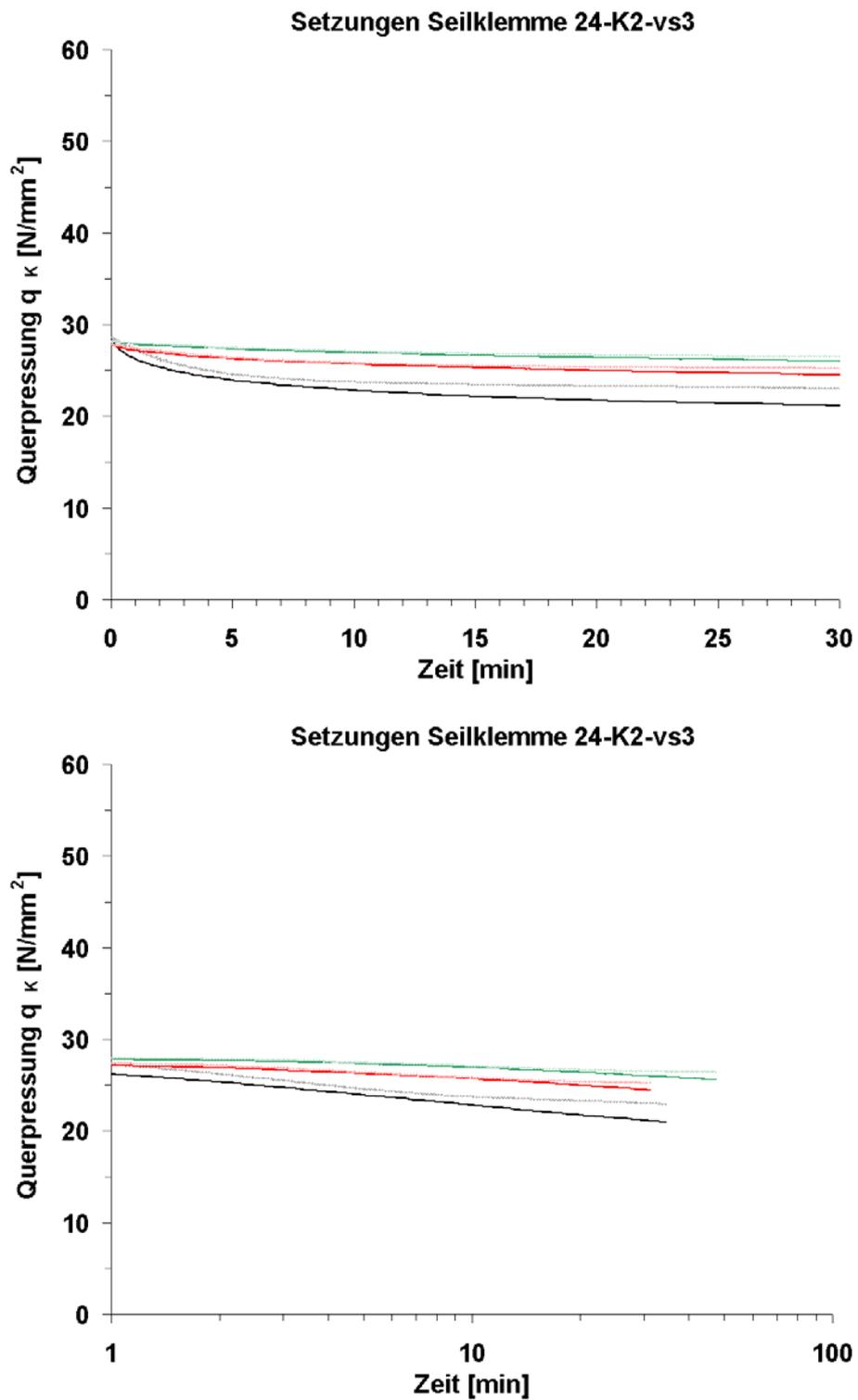


Bild 12-100: Zeitliche Setzungen 24-K2-vs3

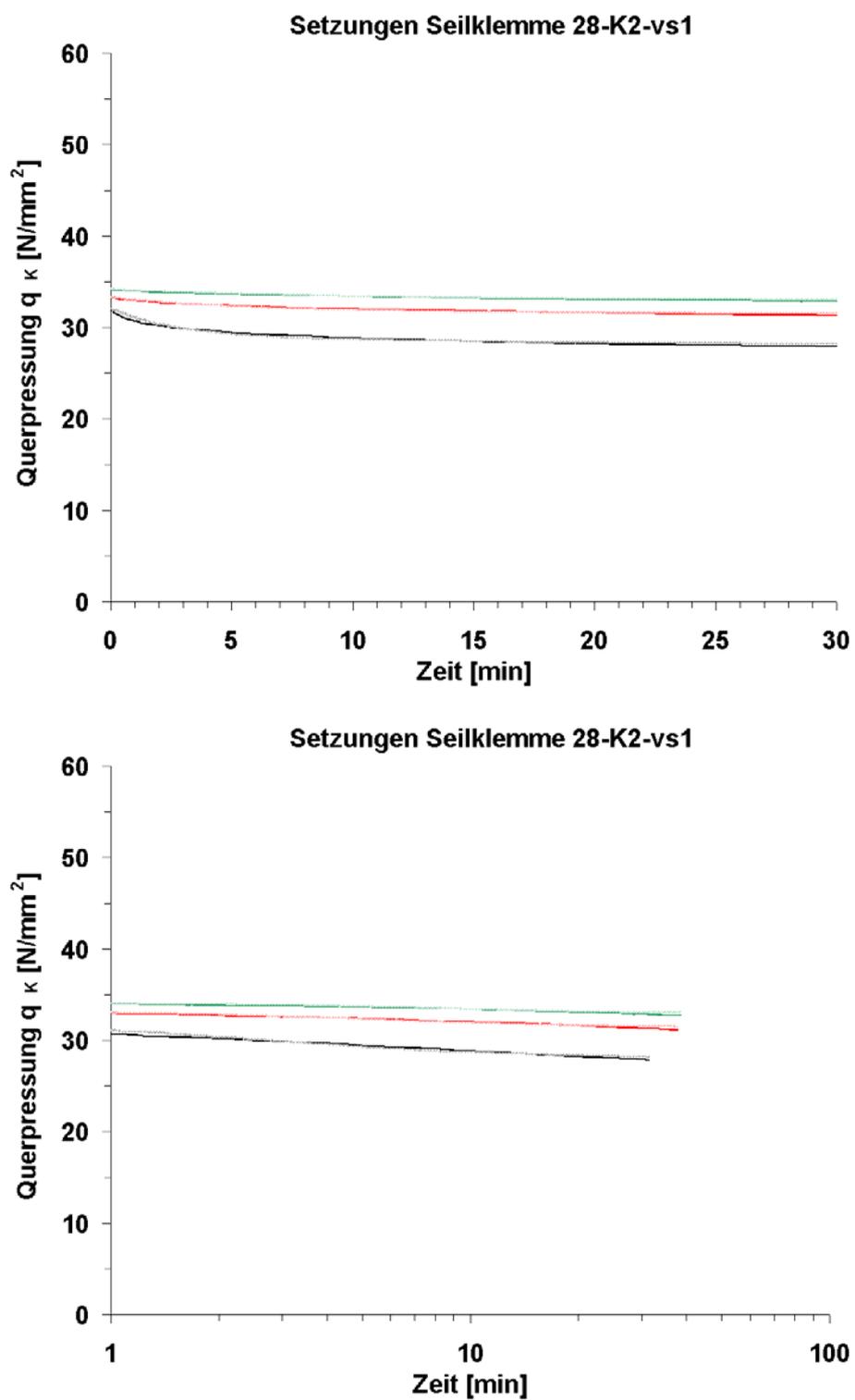


Bild 12-101: Zeitliche Setzungen 28-K2-vs1

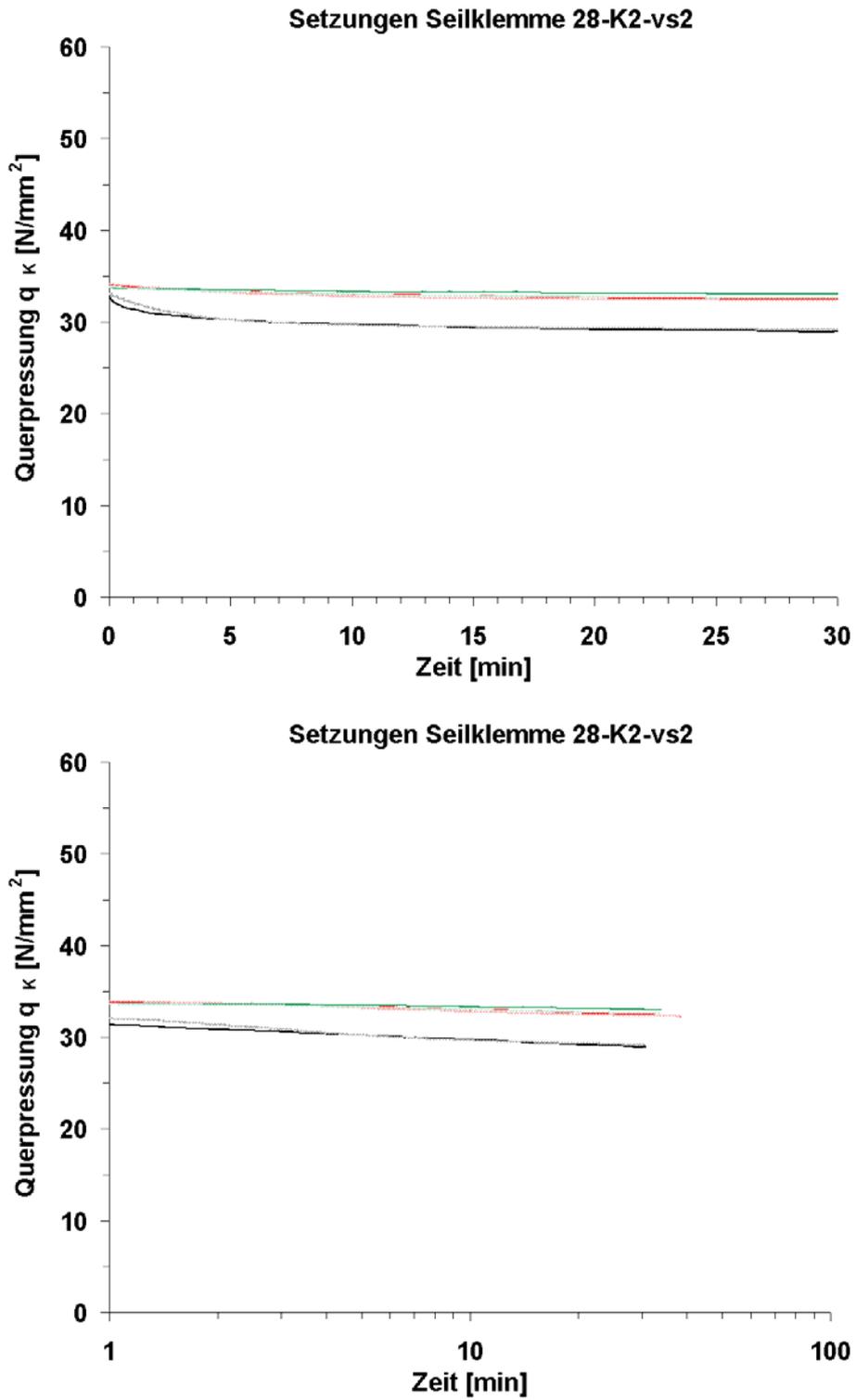


Bild 12-102: Zeitliche Setzungen 28-K2-vs2

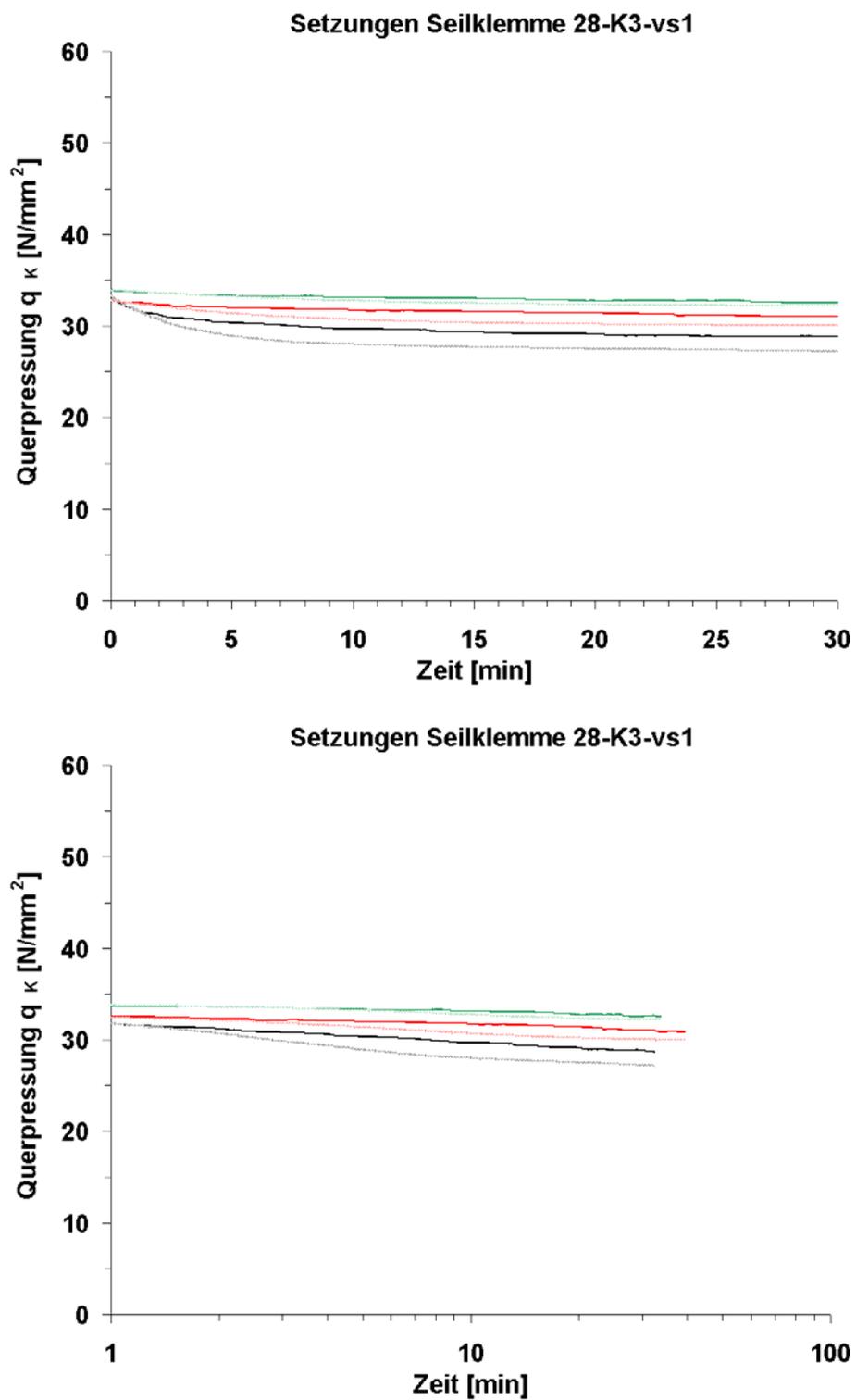


Bild 12-103: Zeitliche Setzungen 28-K3-vs1

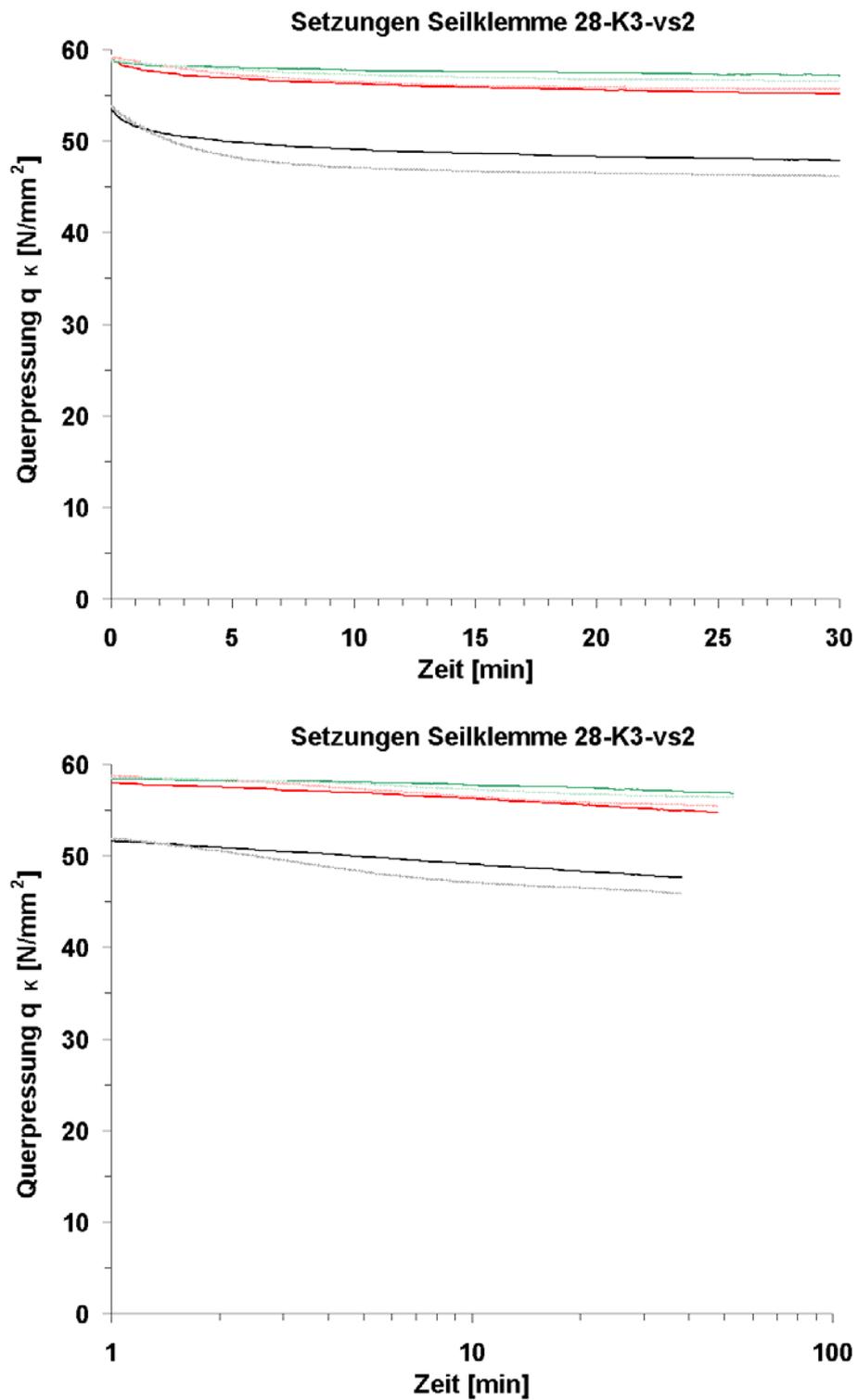


Bild 12-104: Zeitliche Setzungen 28-K3-vs2

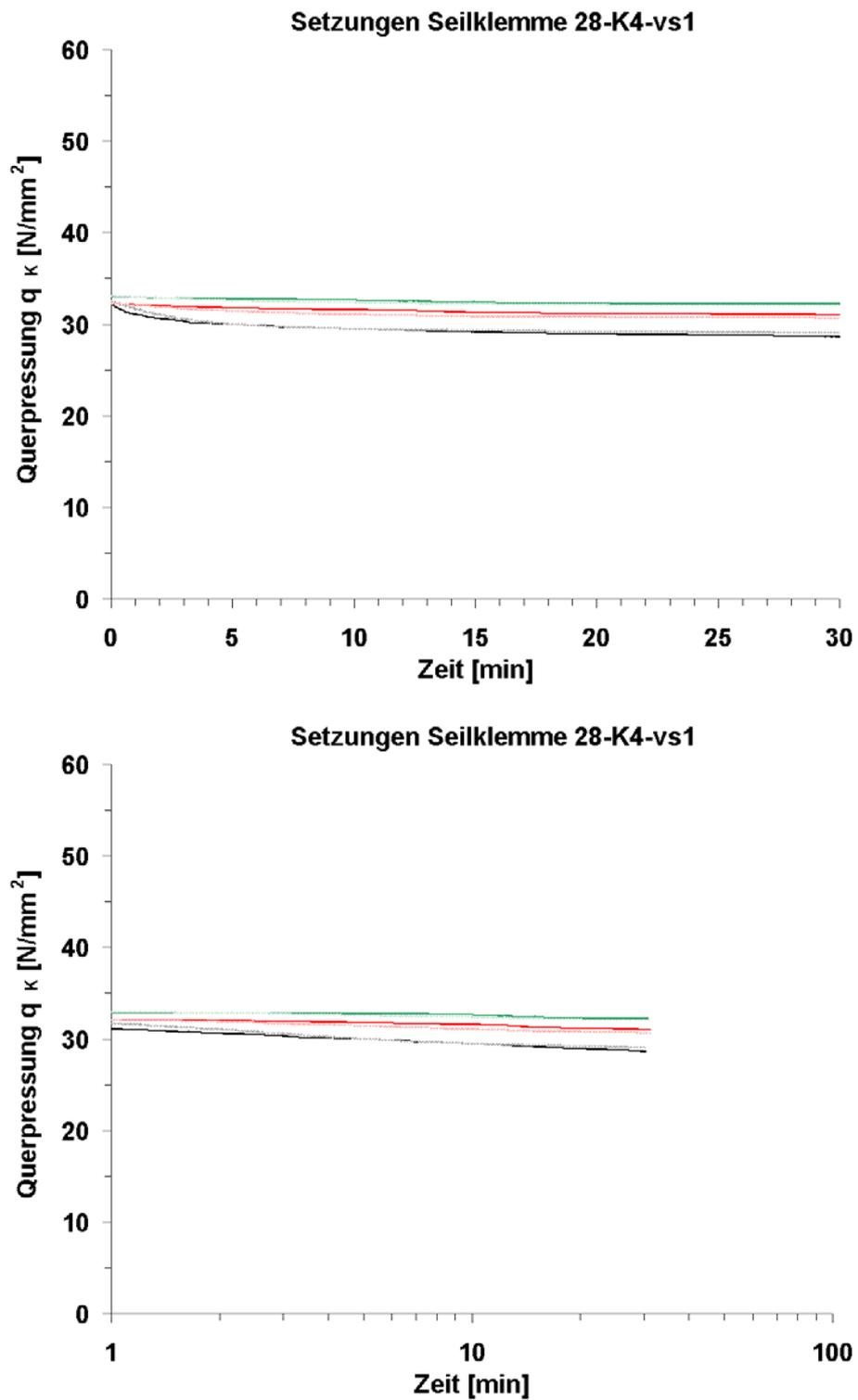


Bild 12-105: Zeitliche Setzungen 28-K4-vs1

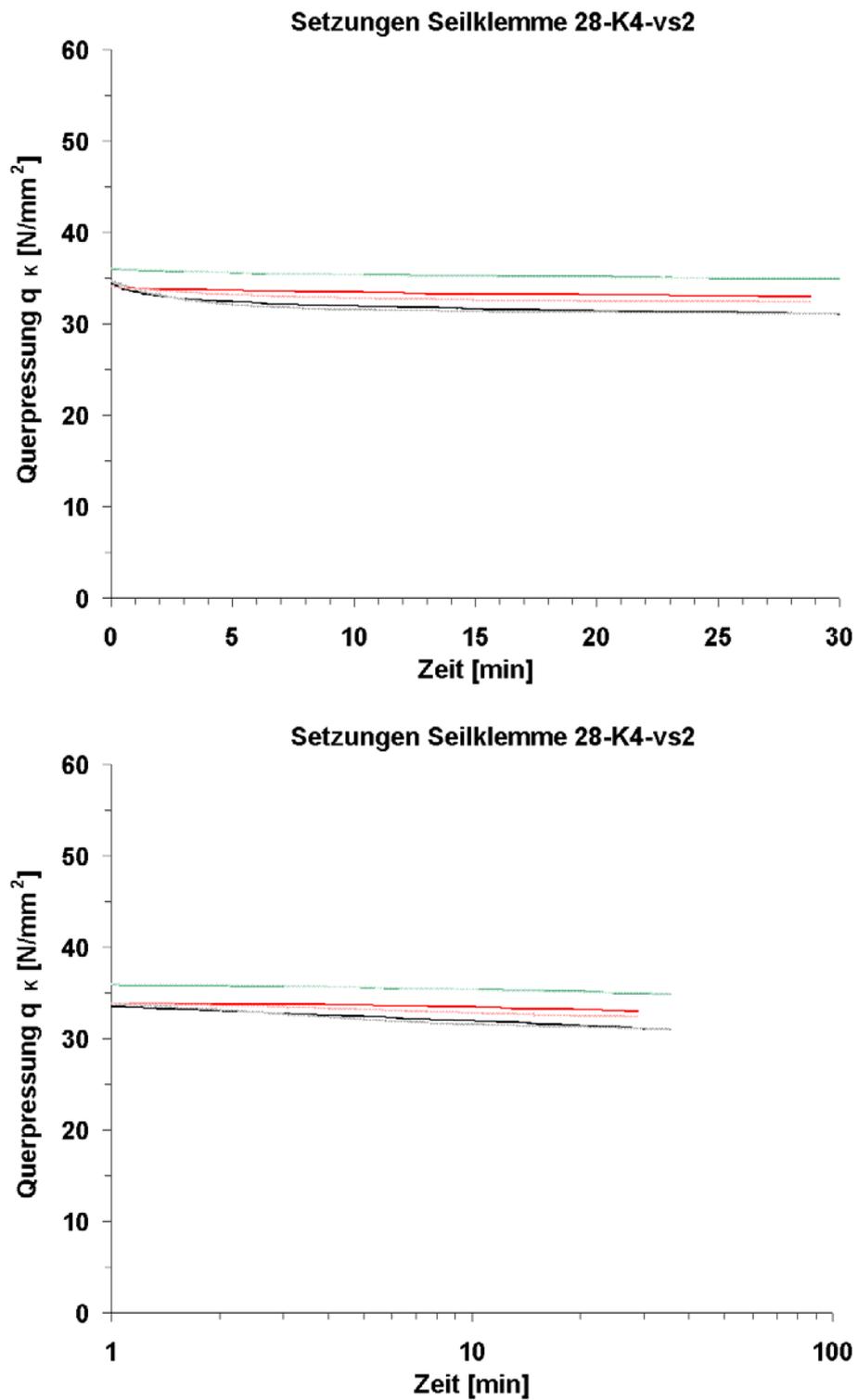


Bild 12-106: Zeitliche Setzungen 28-K4-vs2

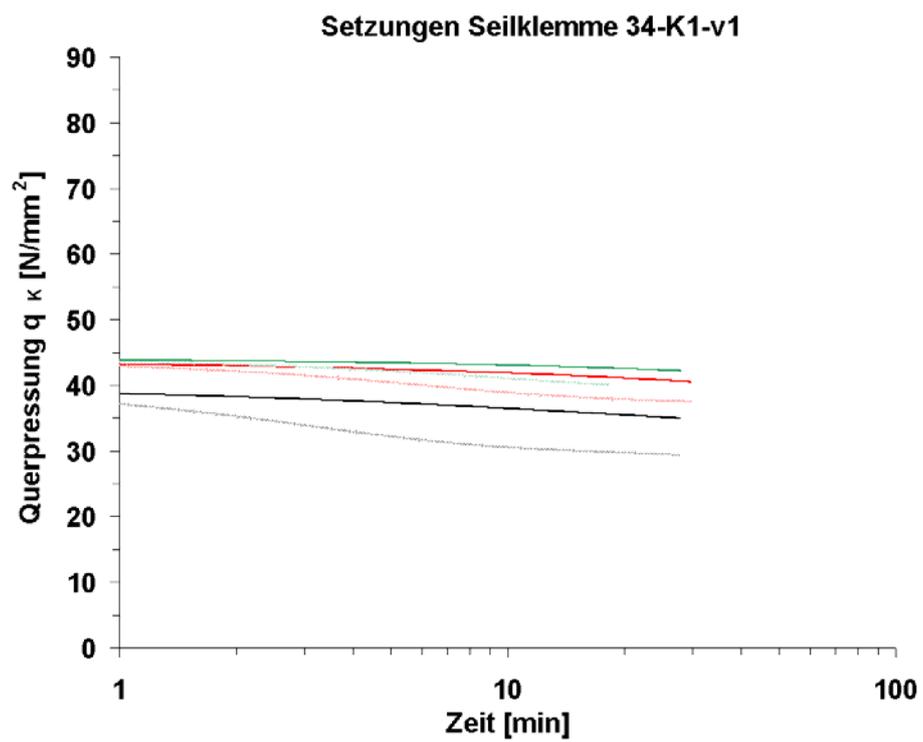
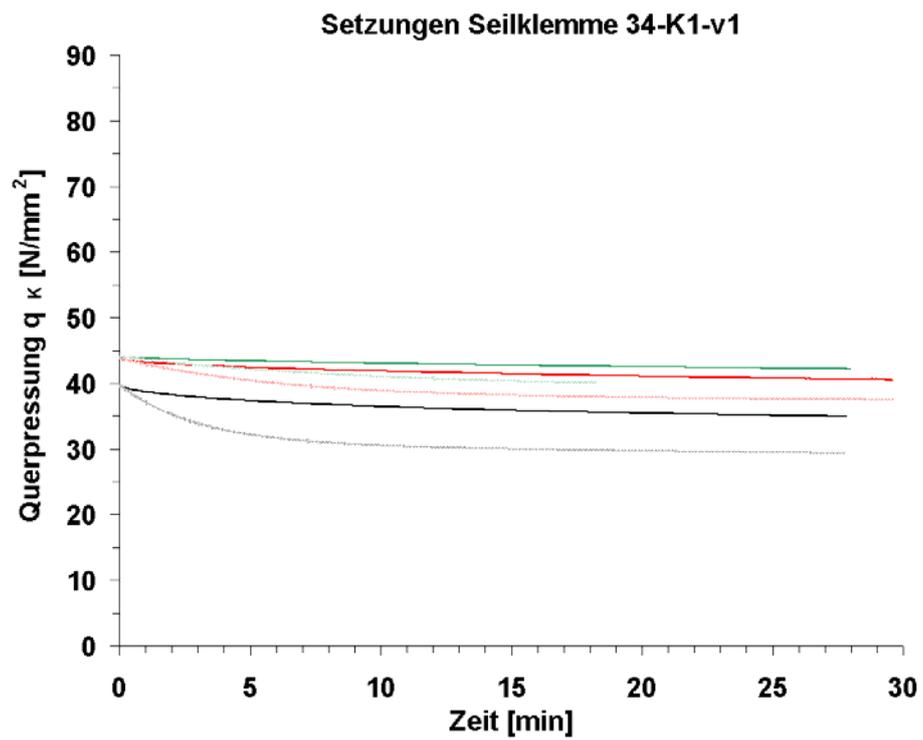


Bild 12-107: Zeitliche Setzungen 34-K1-v1

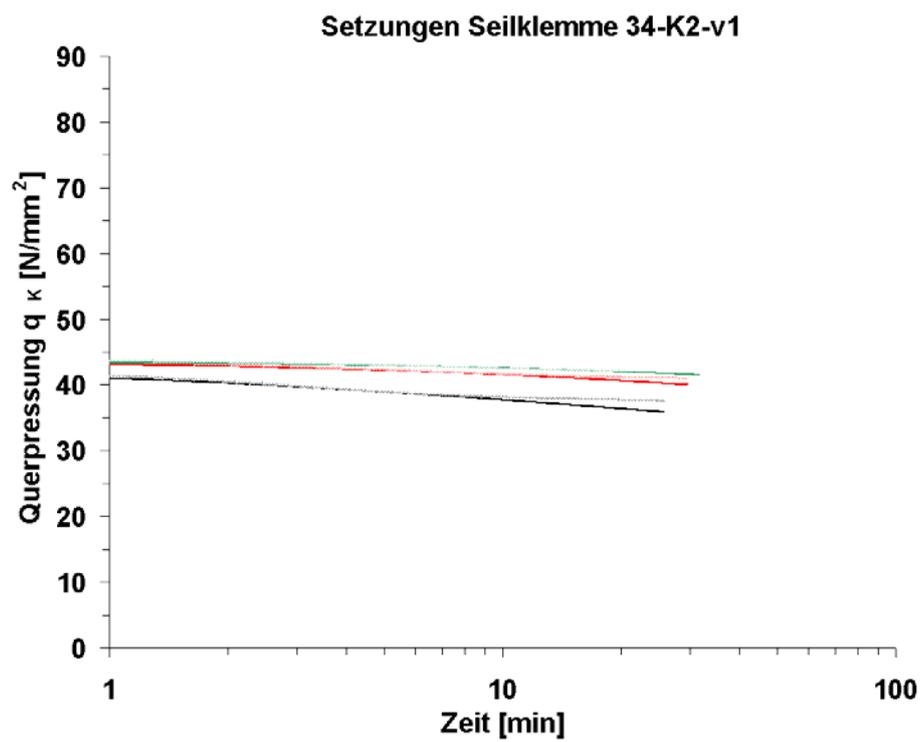
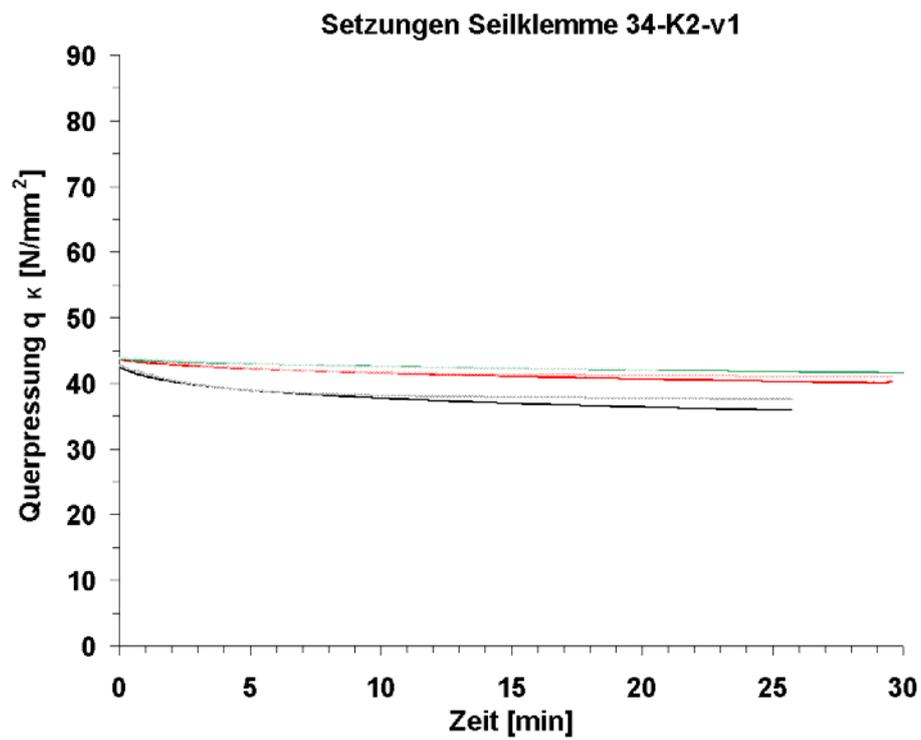


Bild 12-108: Zeitliche Setzungen 34-K2-v1

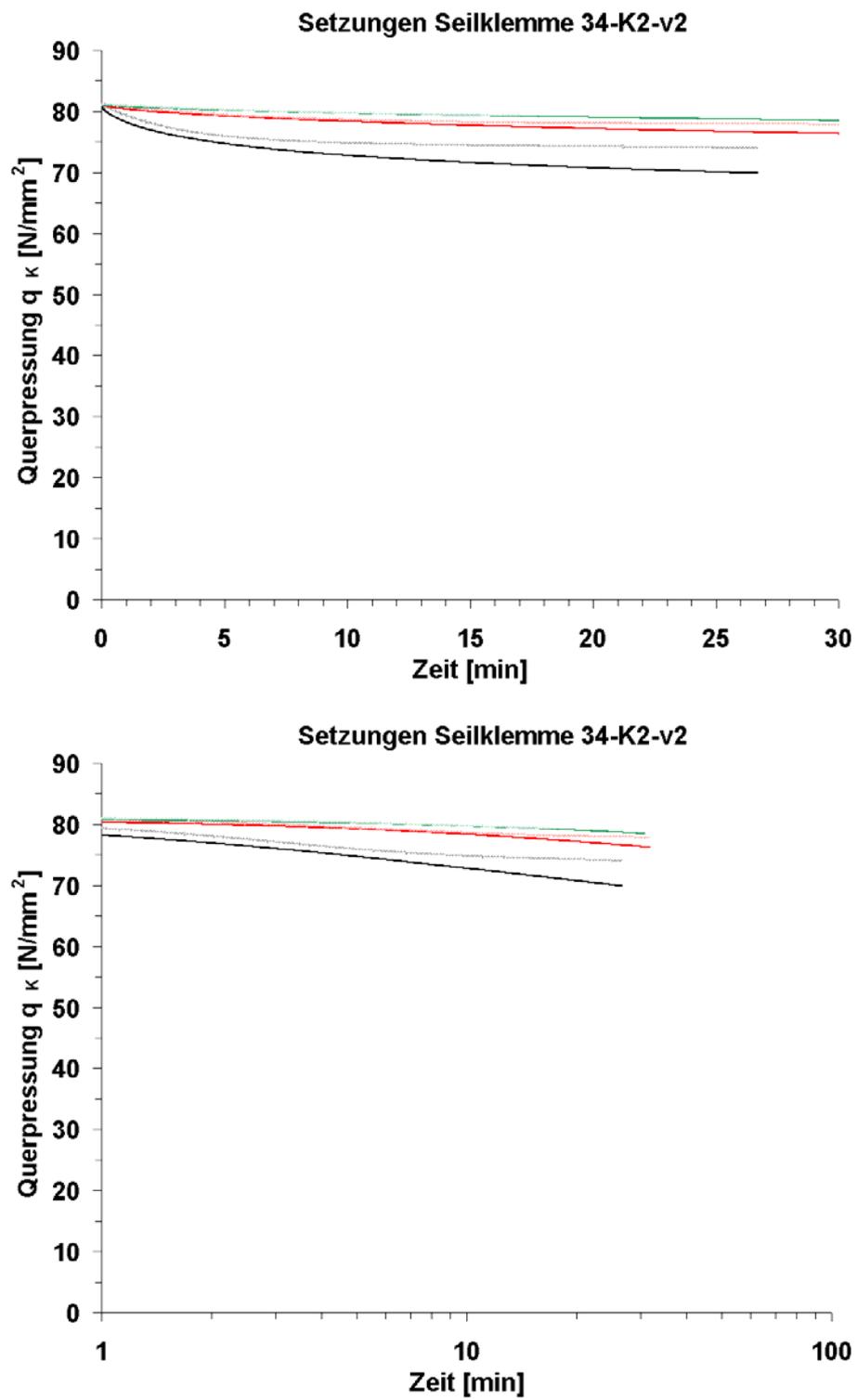


Bild 12-109: Zeitliche Setzungen 34-K2-v2

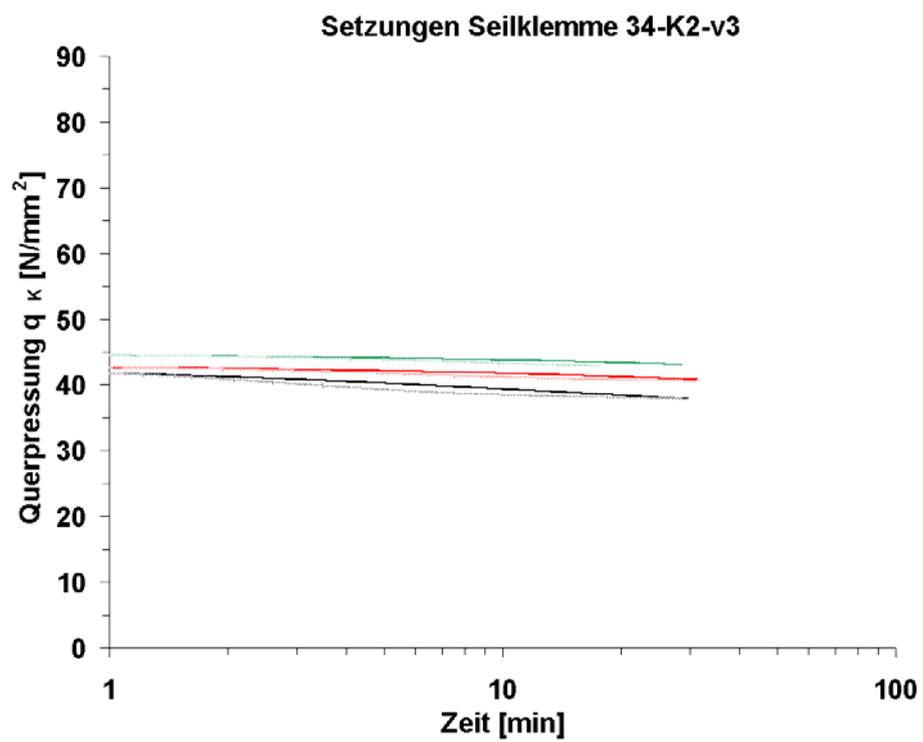
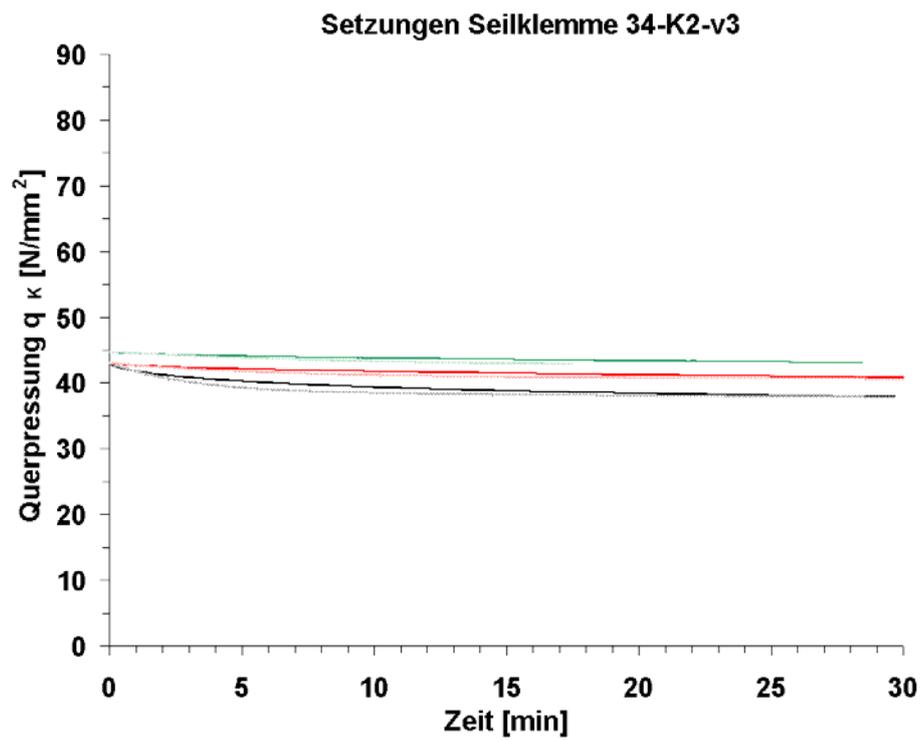


Bild 12-110: Zeitliche Setzungen 34-K2-v3

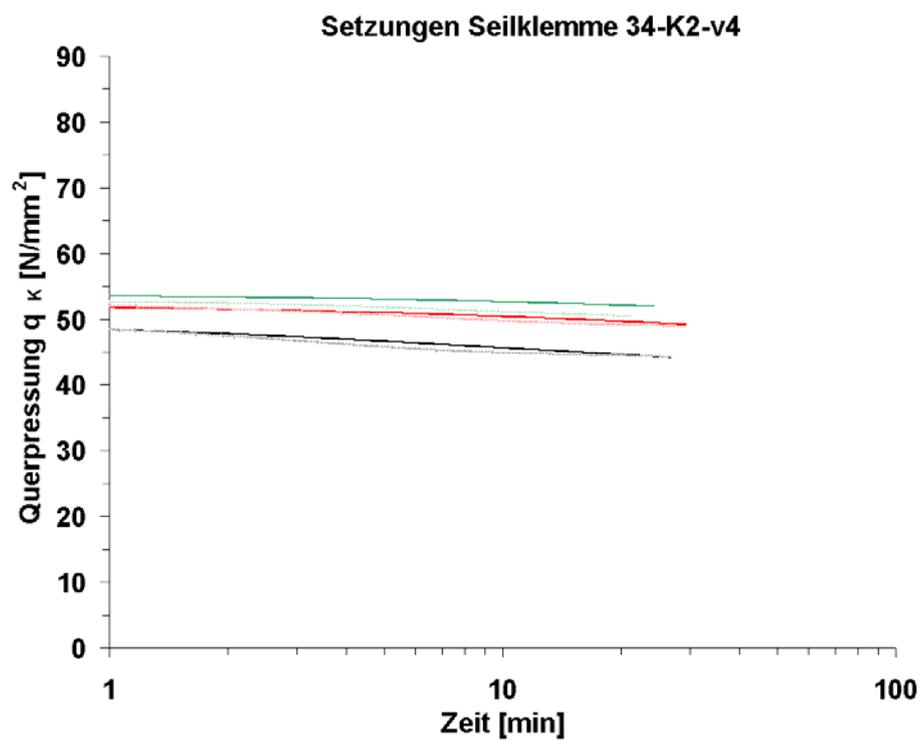
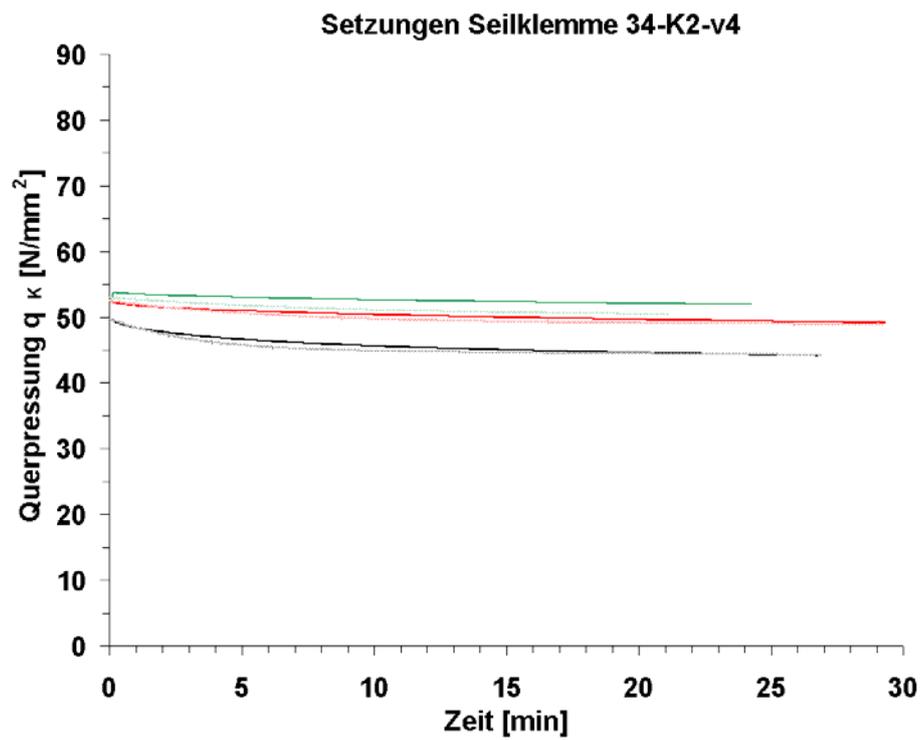


Bild 12-111: Zeitliche Setzungen 34-K2-v4

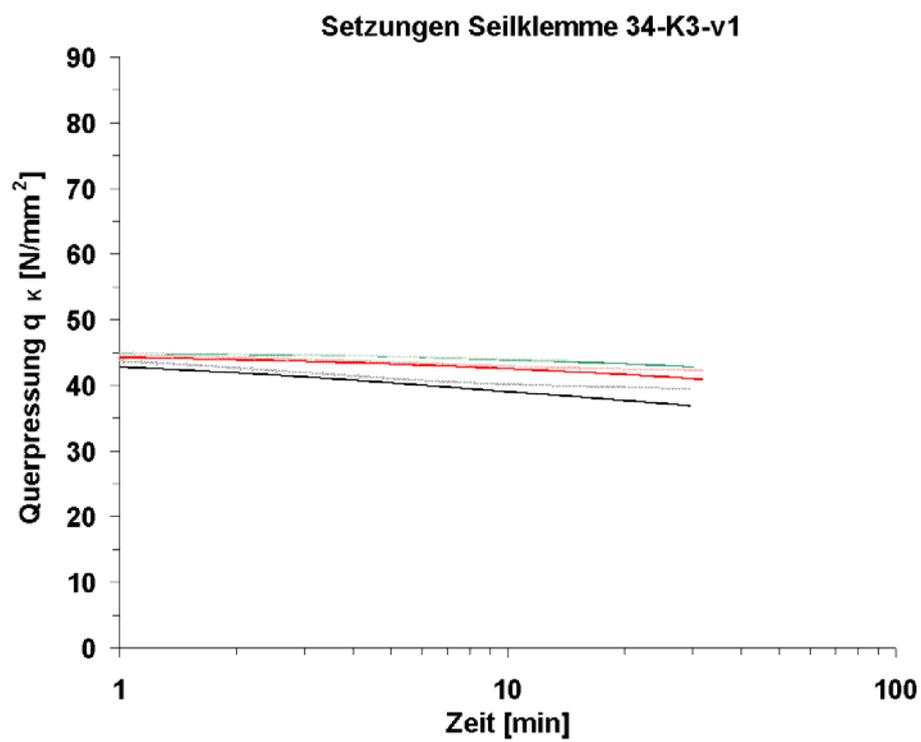
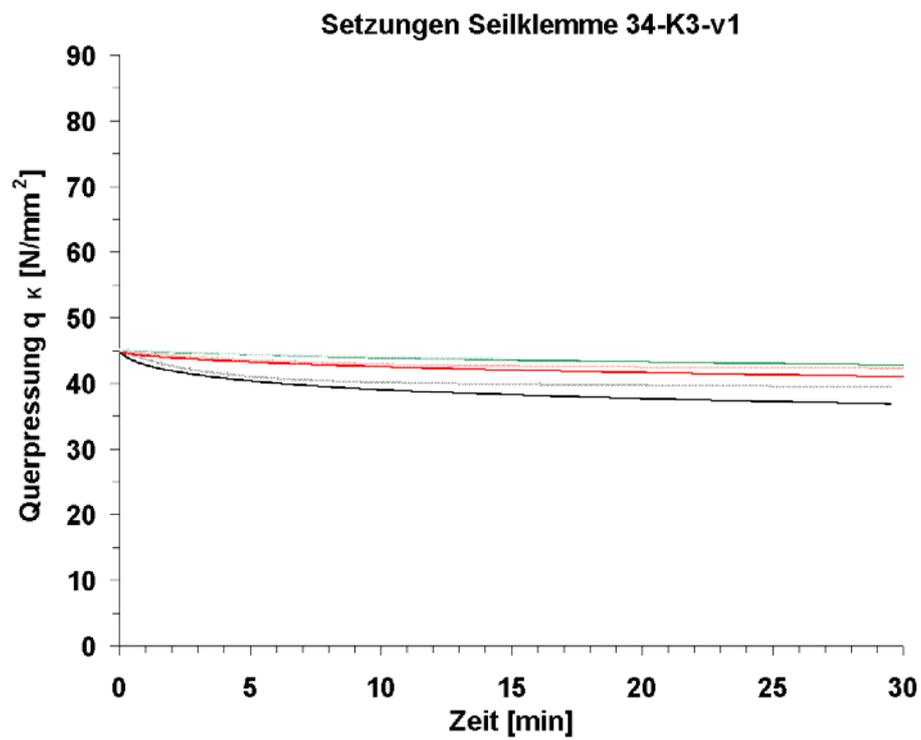


Bild 12-112: Zeitliche Setzungen 34-K3-v1

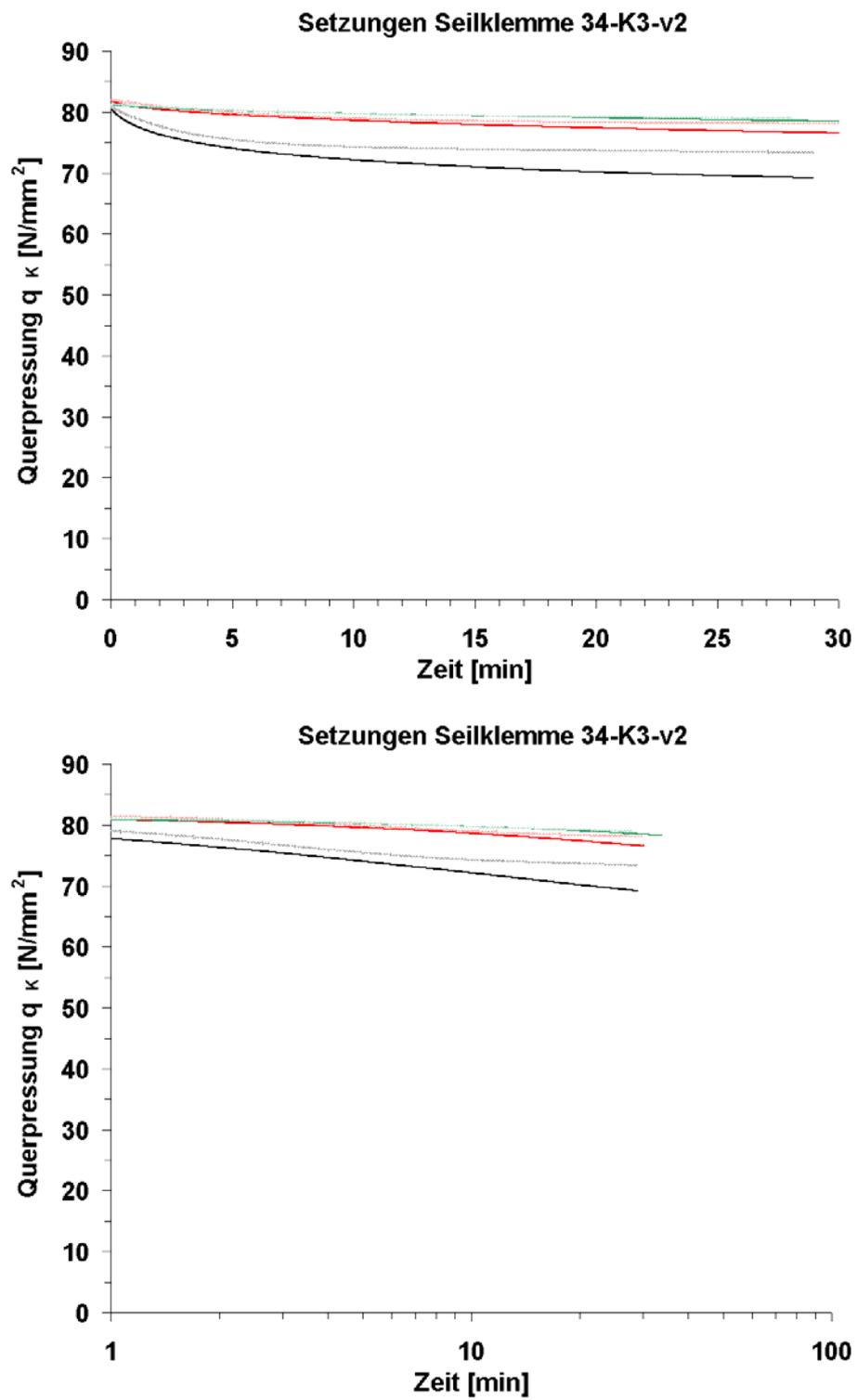


Bild 12-113: Zeitliche Setzungen 34-K3-v2

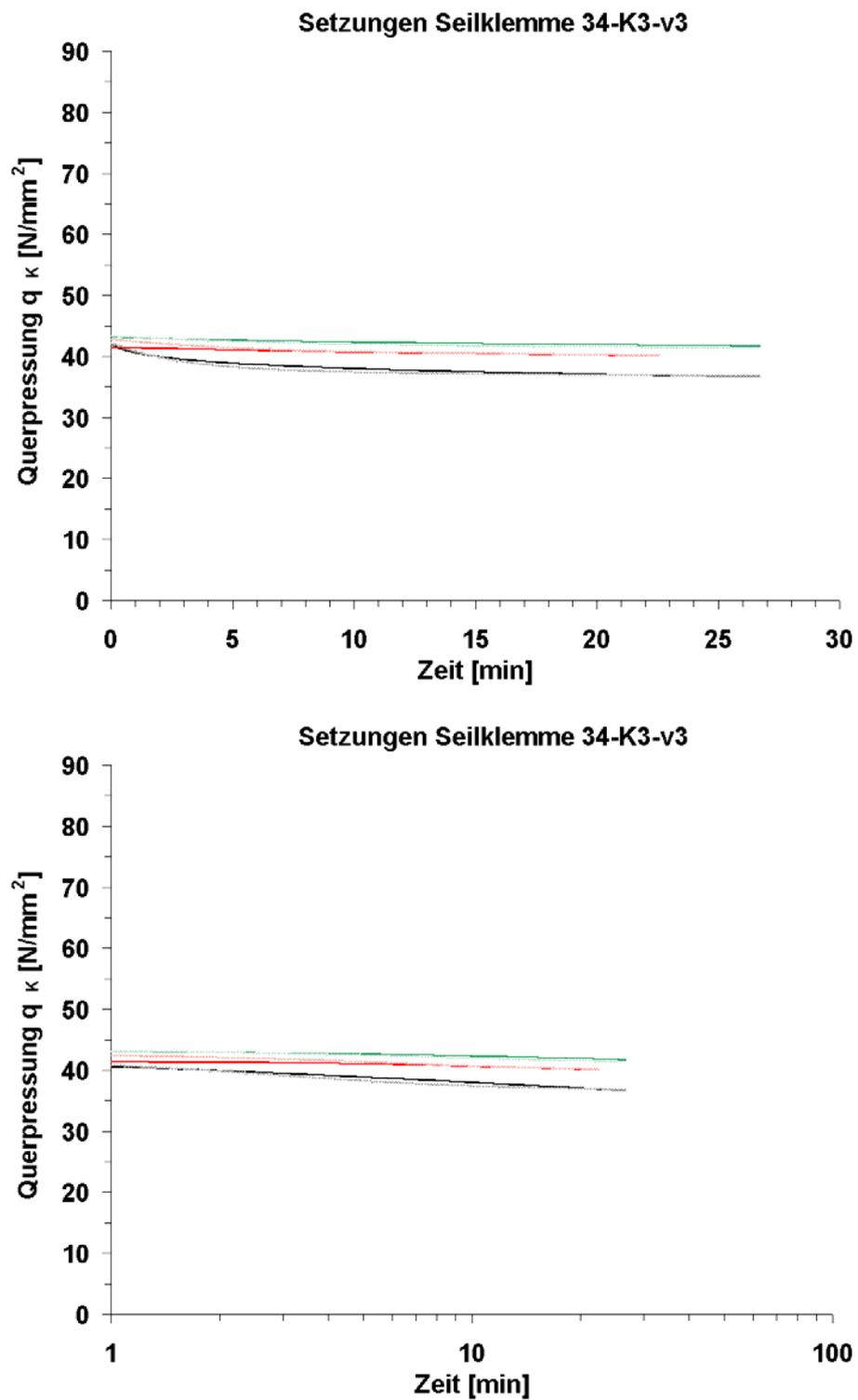


Bild 12-114: Zeitliche Setzungen 34-K3-v3

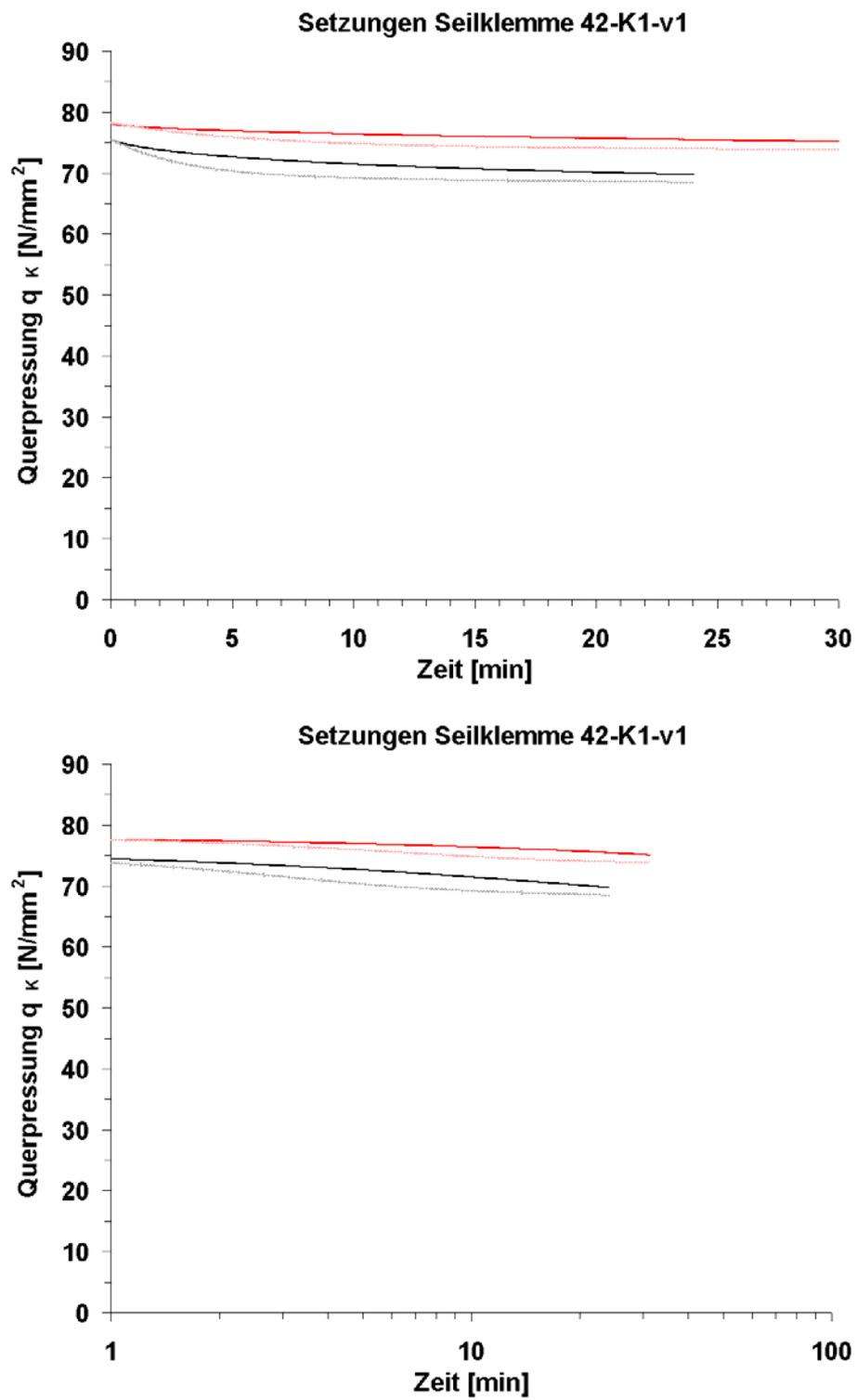


Bild 12-115: Zeitliche Setzungen 42-K1-v1

## 12.5.2 Zeitliche Setzungen über lange Zeiträume

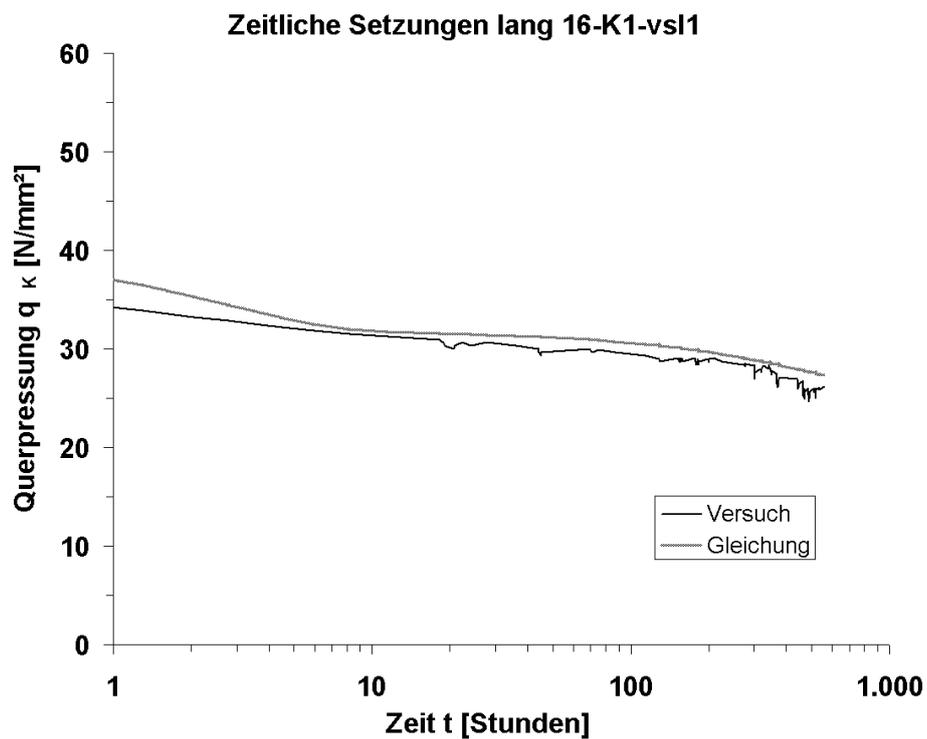
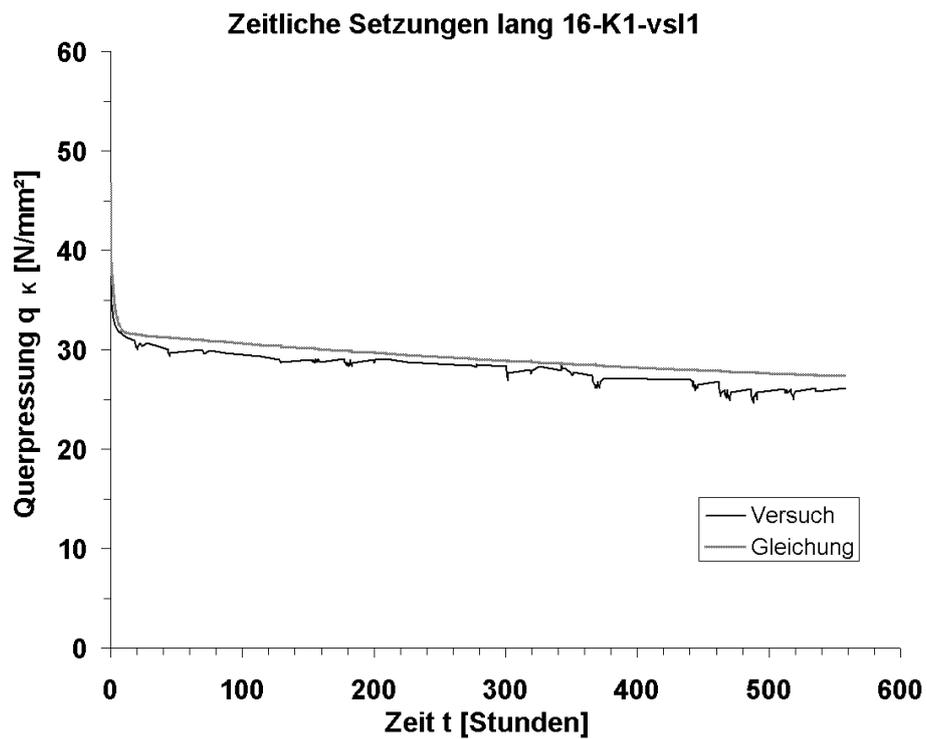


Bild 12-116: Zeitliche Setzungen lang 16-K1-vs11

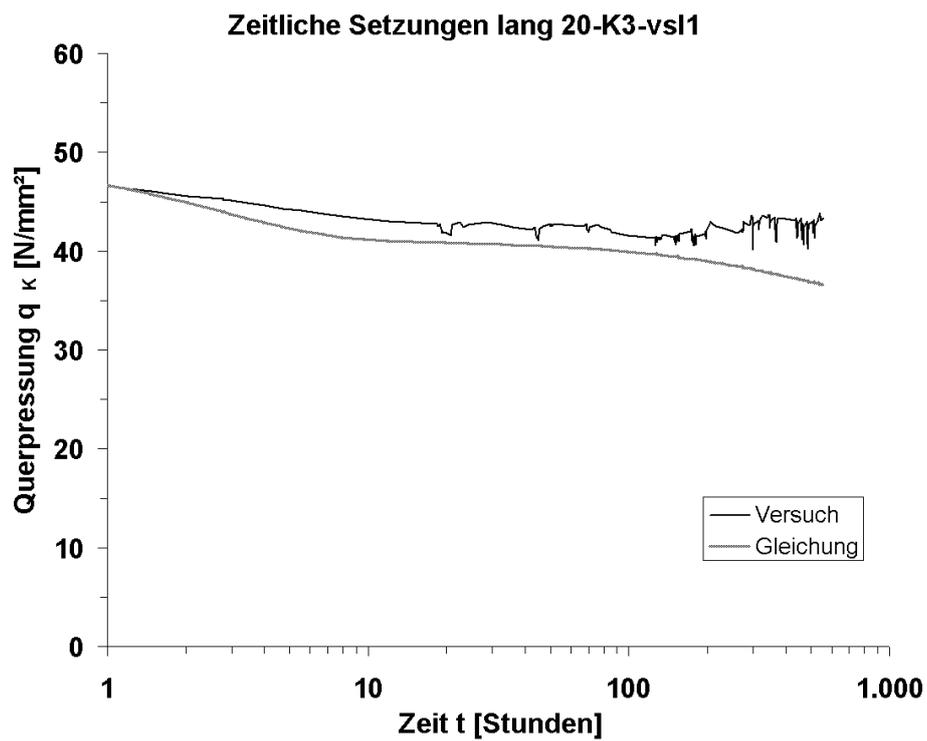
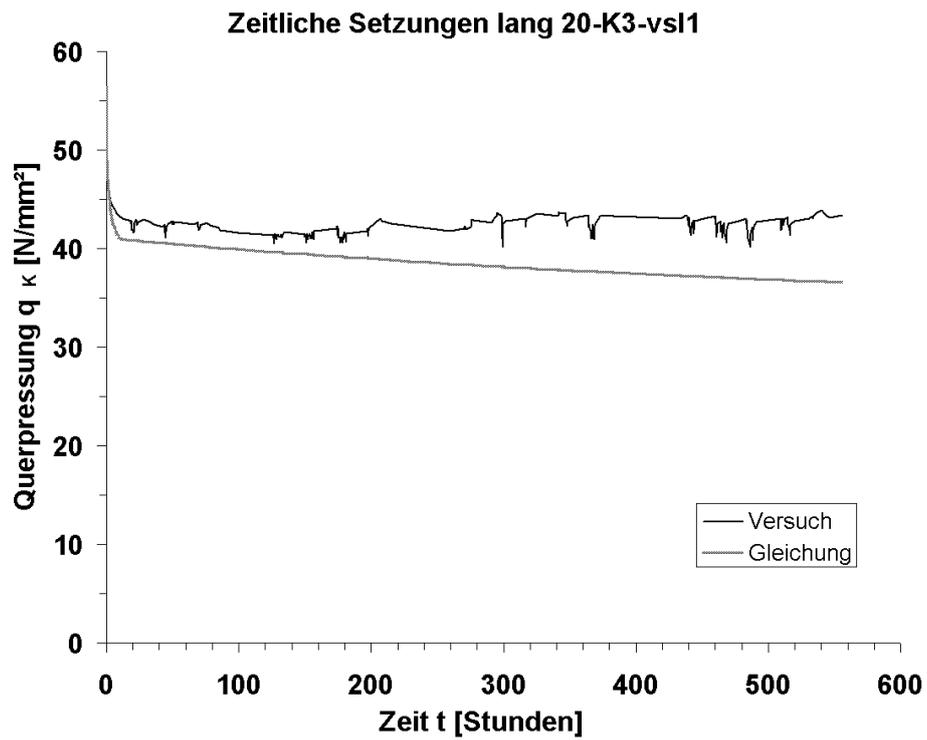


Bild 12-117: Zeitliche Setzungen lang 20-K3-vs11

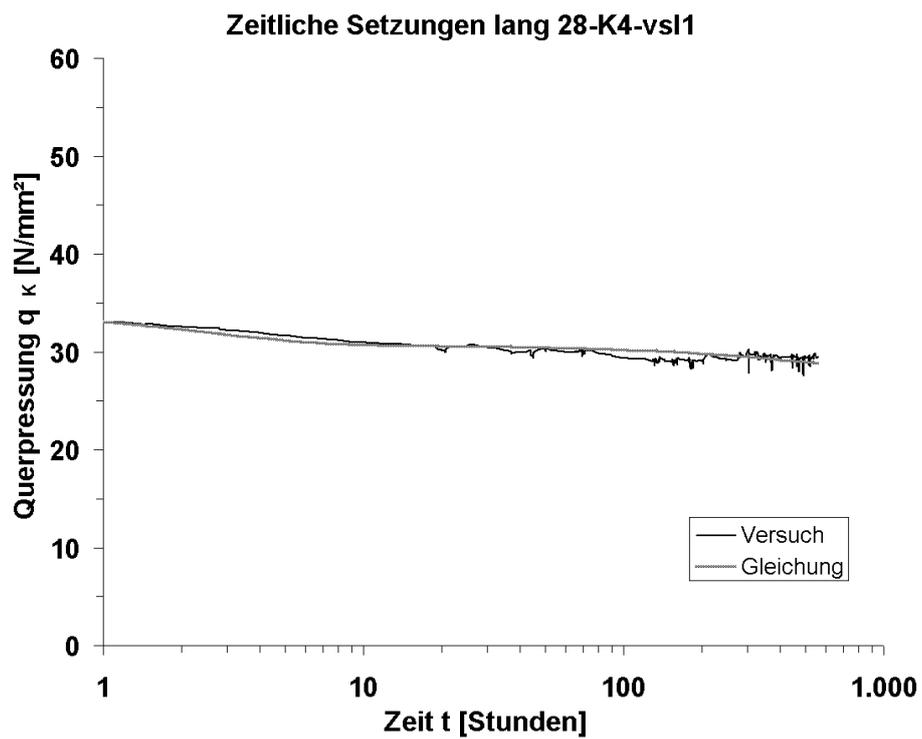
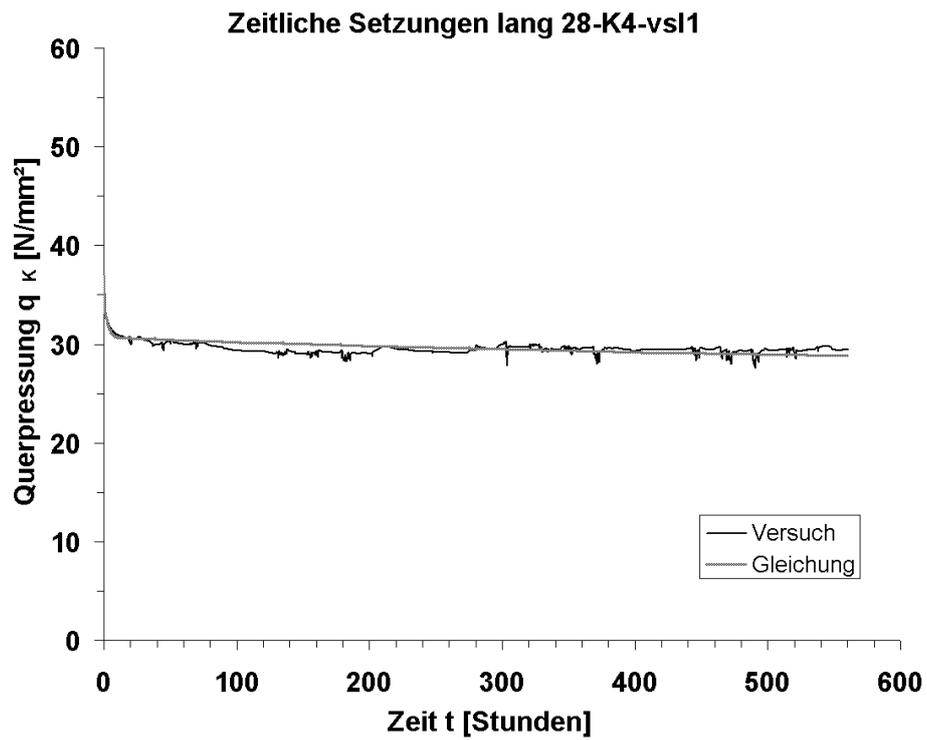


Bild 12-118: Zeitliche Setzungen 28-K4-vsl1

## 12.5.3 Setzungen aus einer Seilkraftherhöhung

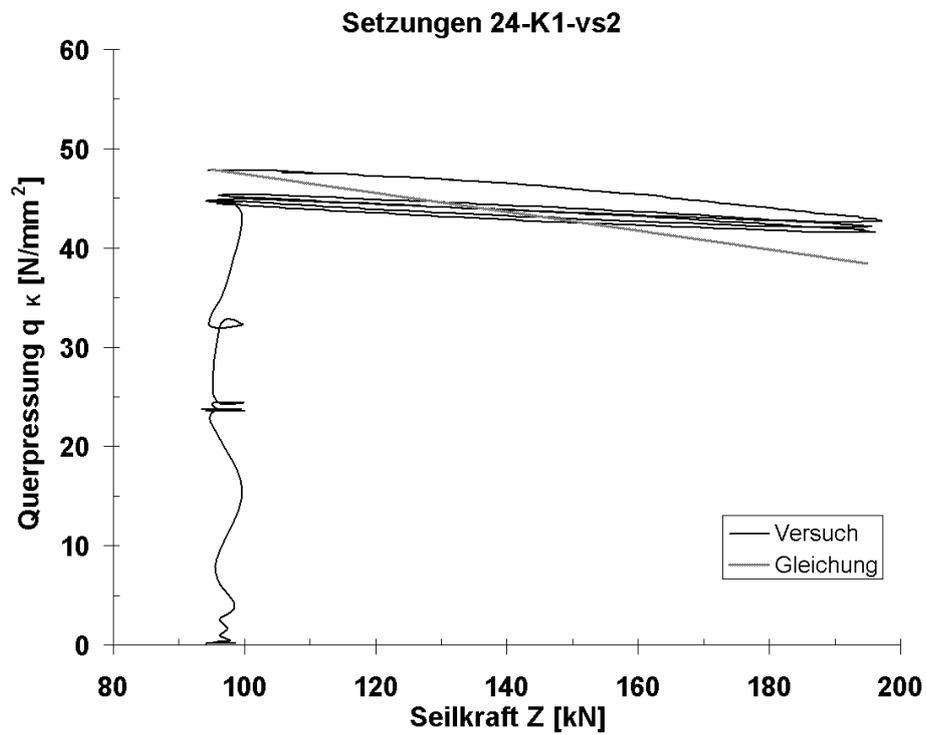


Bild 12-119: Setzungen aus Seilkraftherhöhung 24-K1-vs2

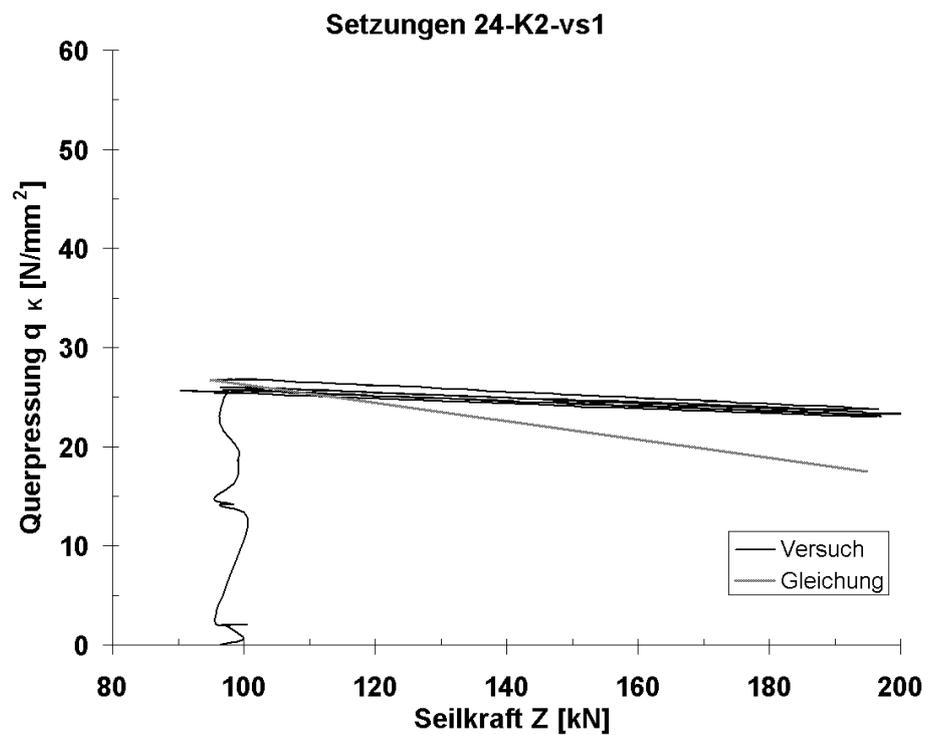


Bild 12-120: Setzungen aus Seilkraftherhöhung 24-K2-vs1

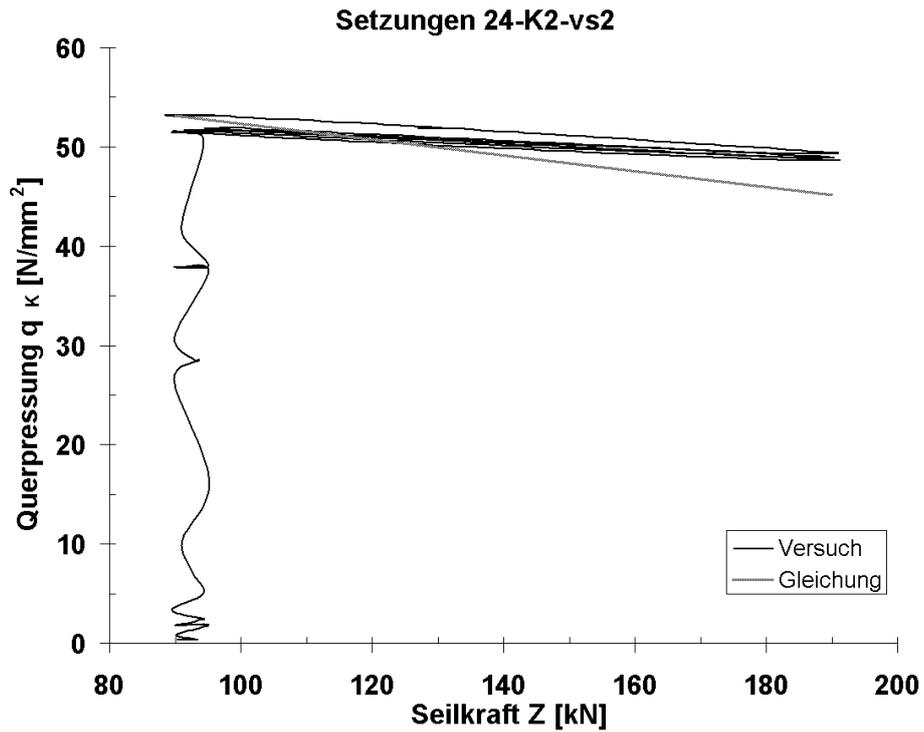


Bild 12-121: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 24-K2-vs2

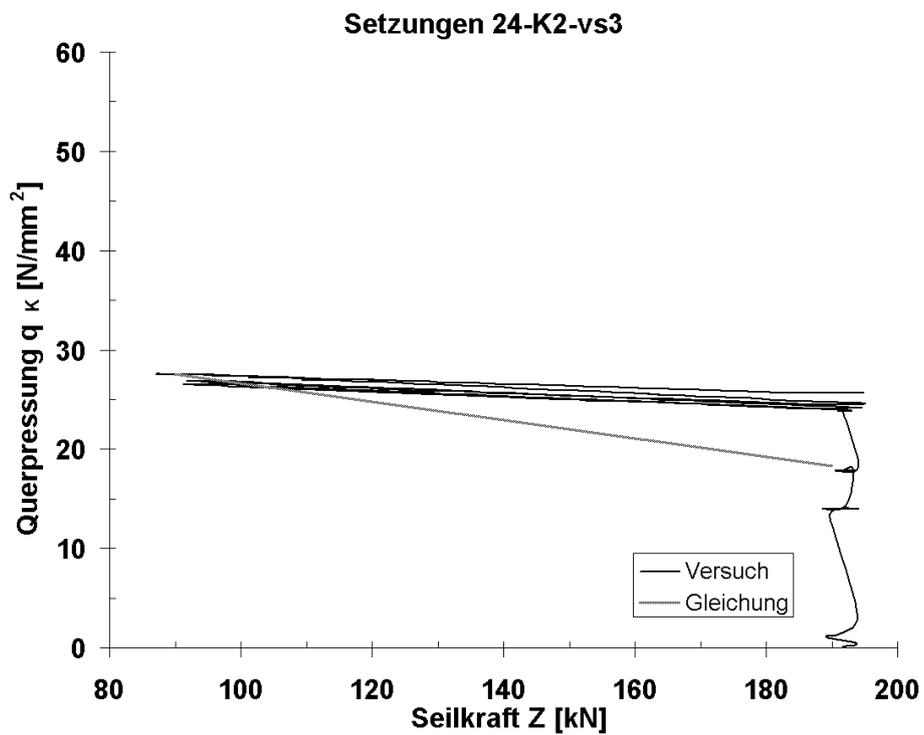


Bild 12-122: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 24-K2-vs3

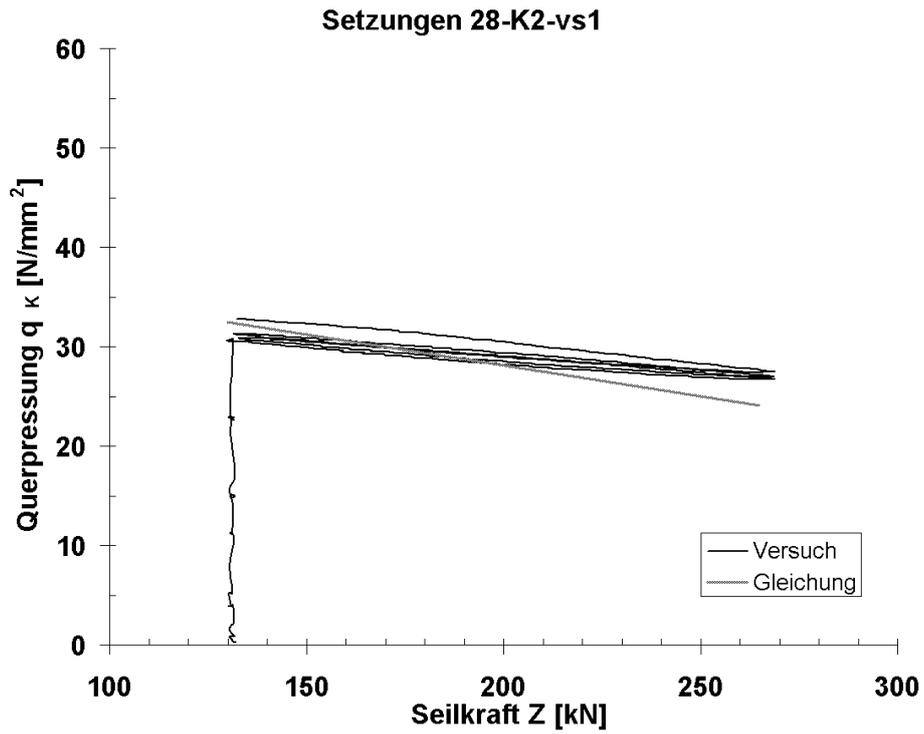


Bild 12-123: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 28-K2-vs1

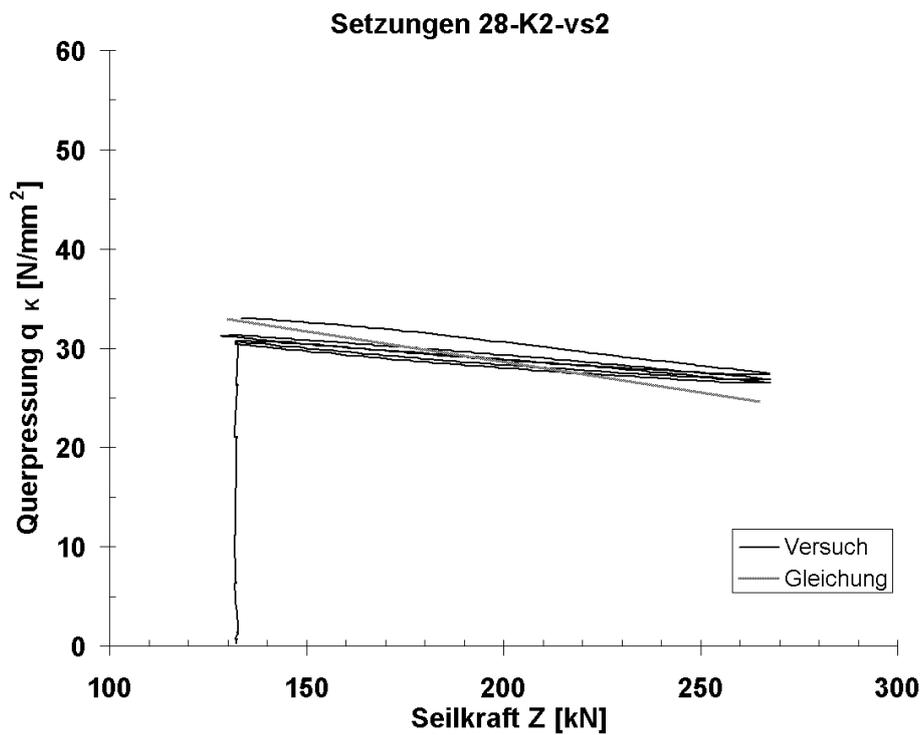


Bild 12-124: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 28-K2-vs2

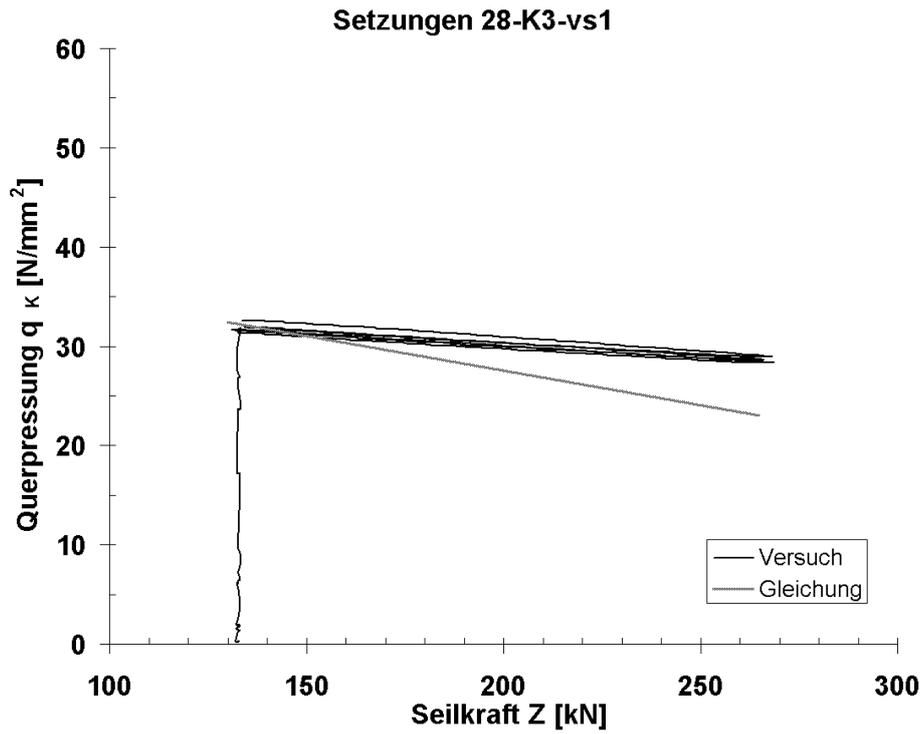


Bild 12-125: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 28-K3-vs1

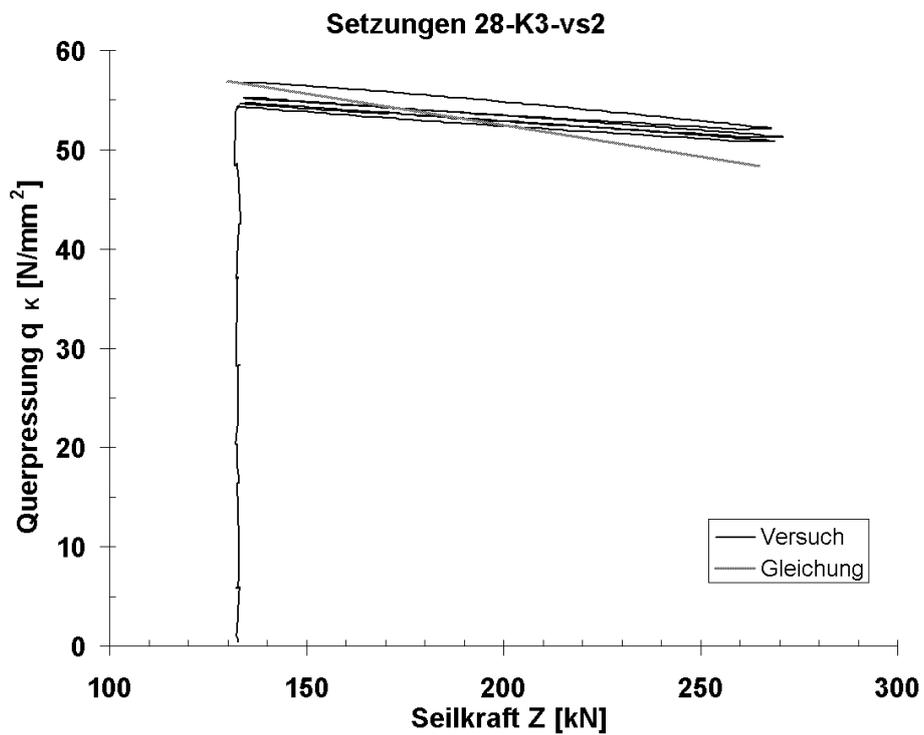


Bild 12-126: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 28-K3-vs2

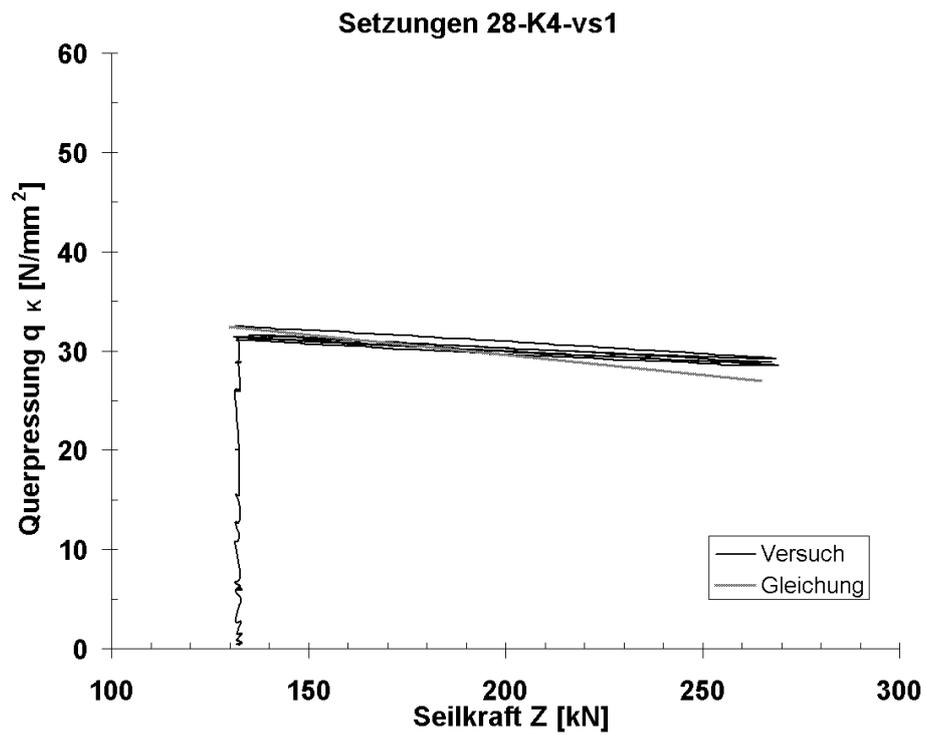


Bild 12-127: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 28-K4-vs1

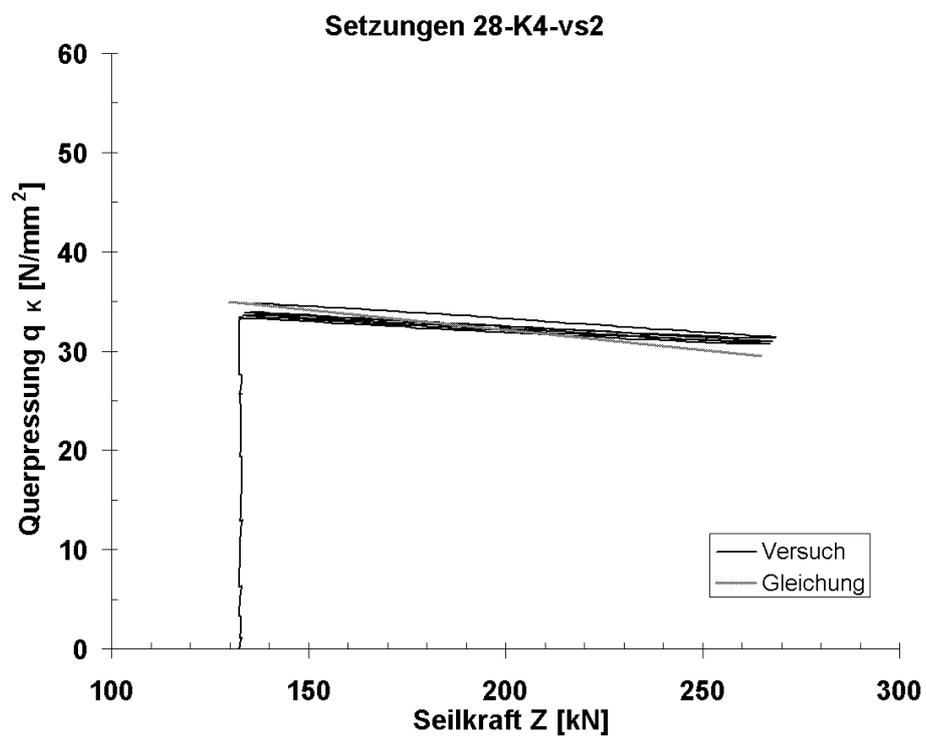


Bild 12-128: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 28-K4-vs2

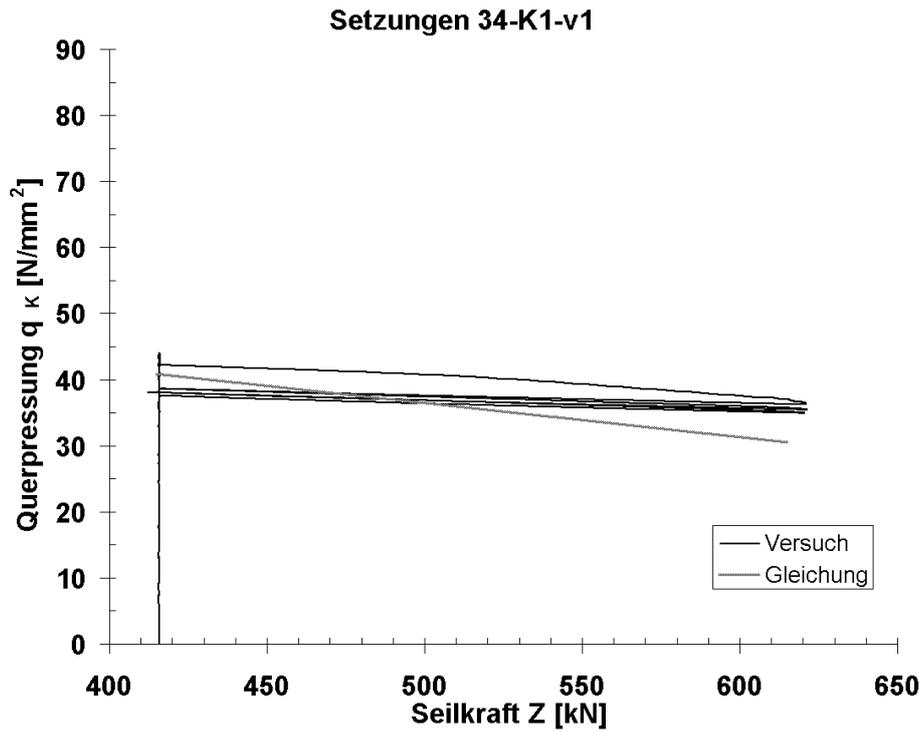


Bild 12-129: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 34-K1-v1

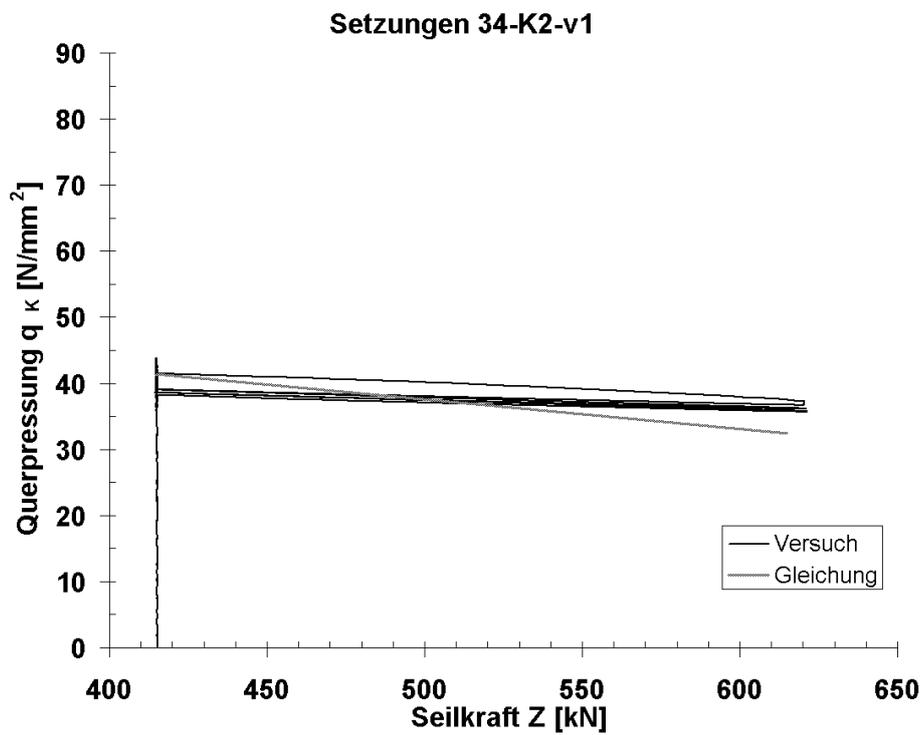


Bild 12-130: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 34-K2-v1

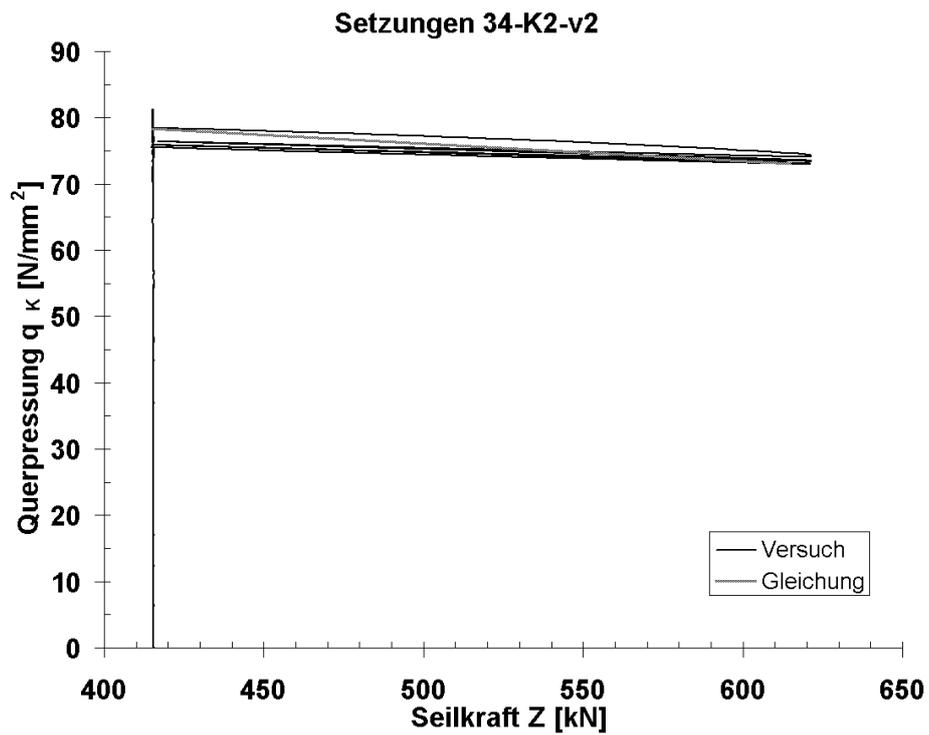


Bild 12-131: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 34-K2-v2

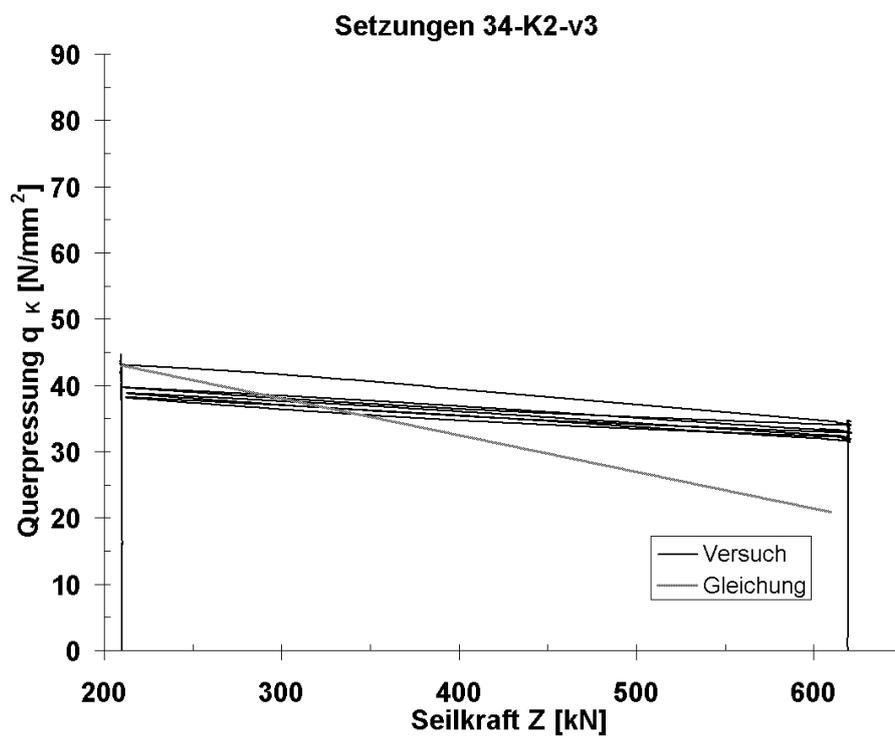


Bild 12-132: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 34-K2-v3

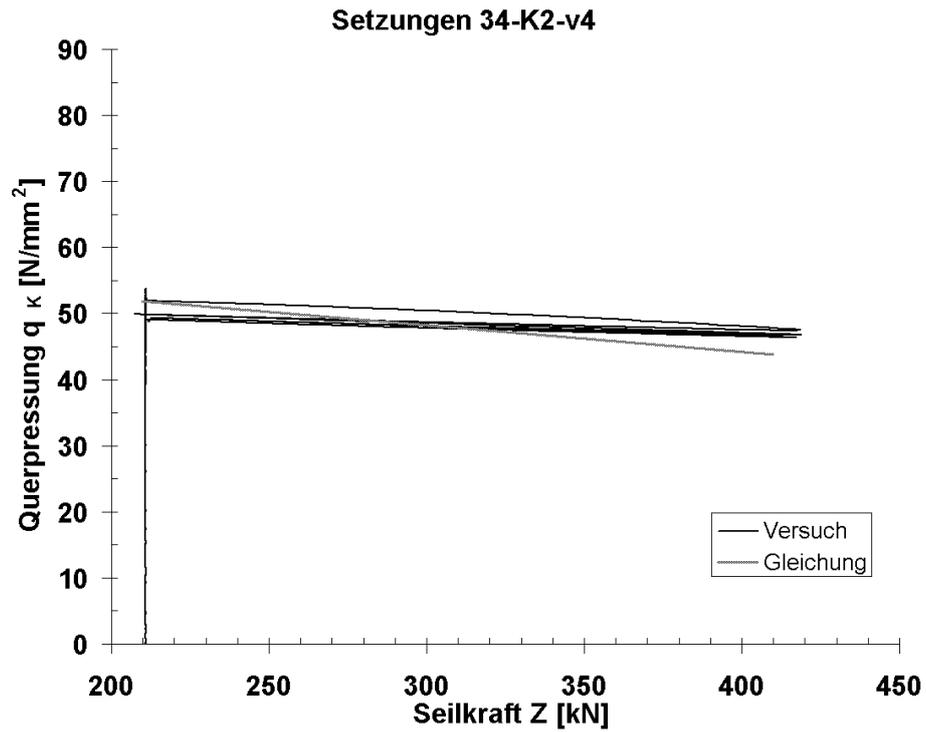


Bild 12-133: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 34-K2-v4

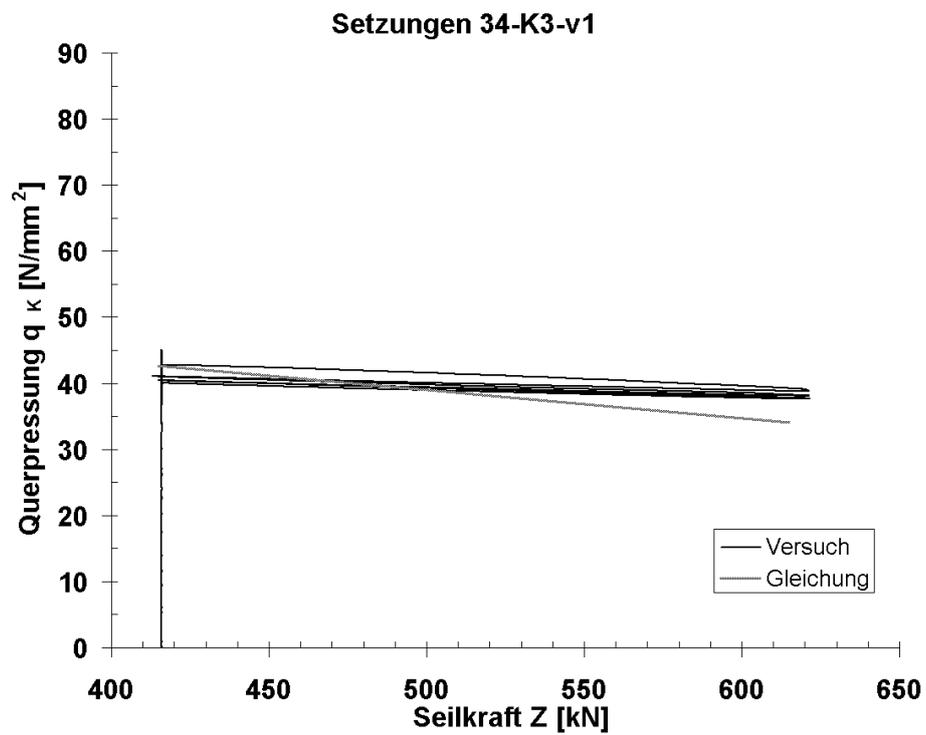


Bild 12-134: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 34-K3-v1

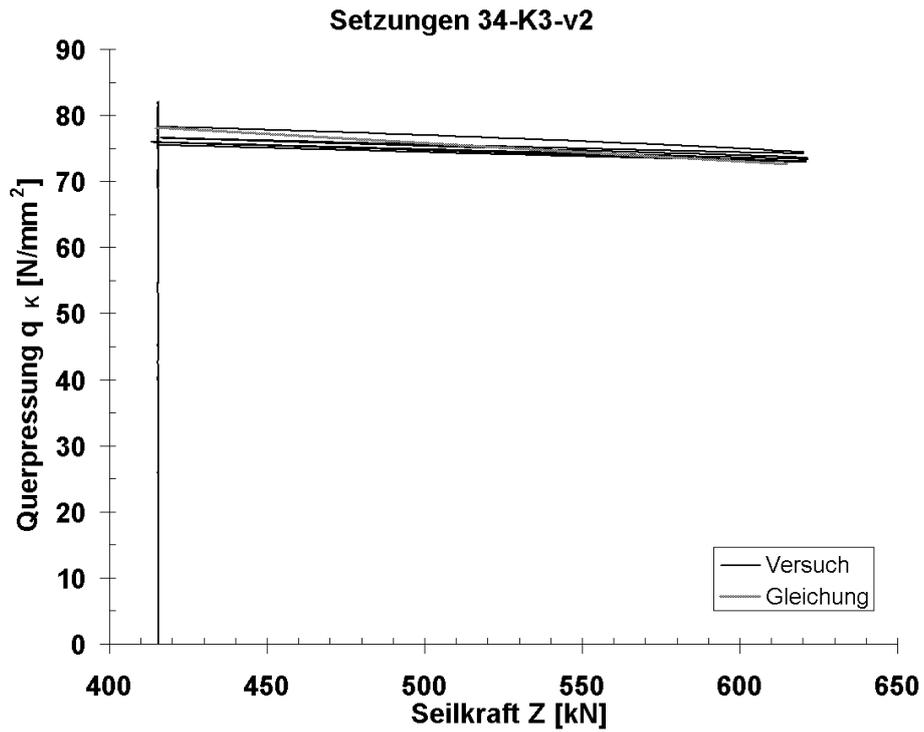


Bild 12-135: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 34-K3-v2

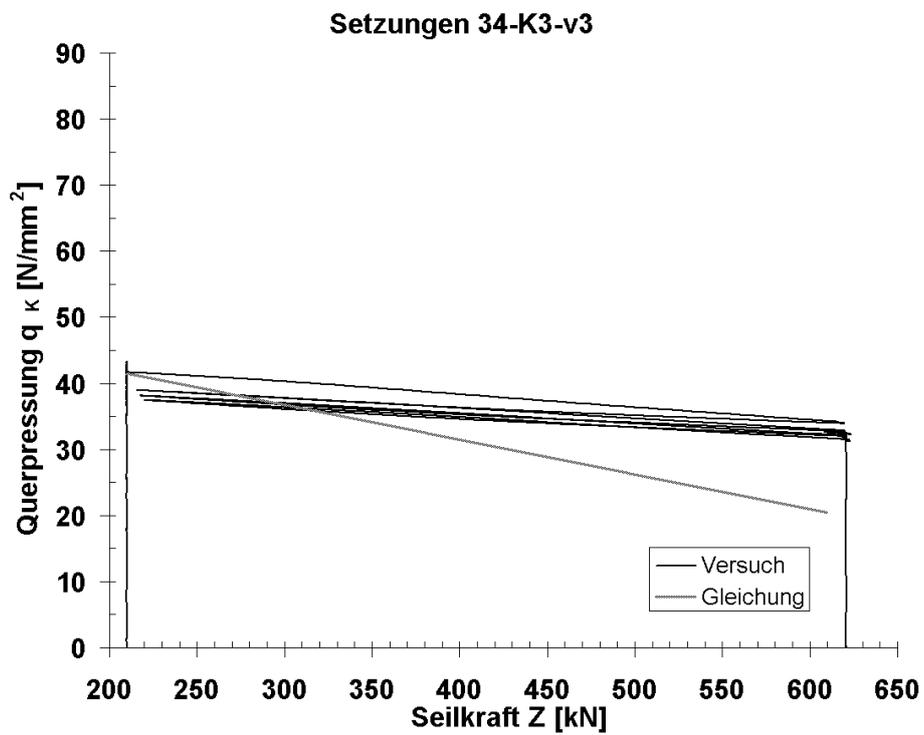


Bild 12-136: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 34-K3-v3

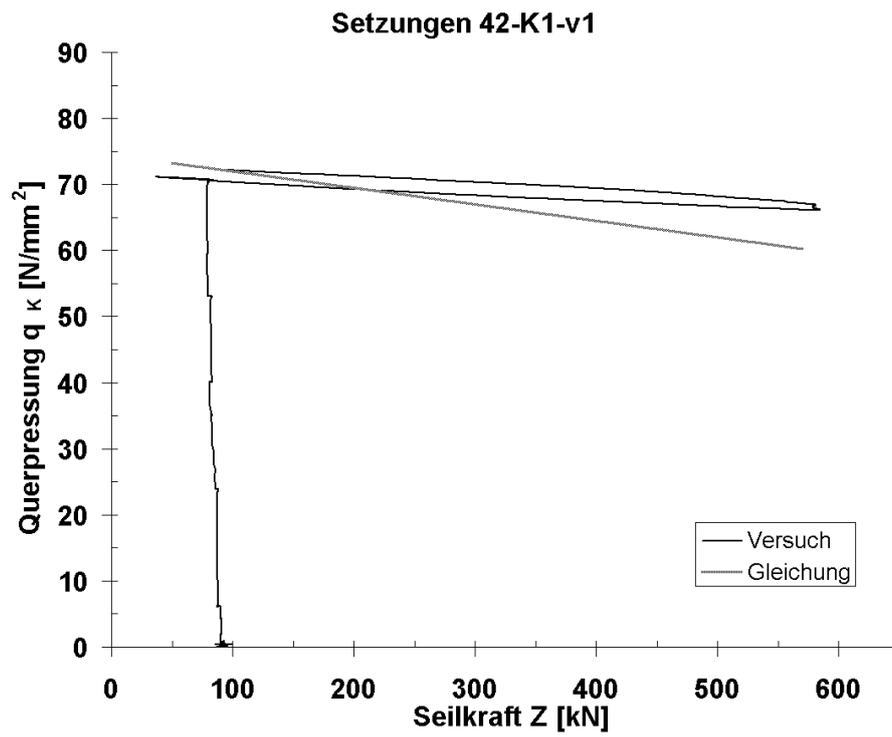


Bild 12-137: Setzungen aus Seilkrafterhöhung 42-K1-v1