



Technische Universität Graz
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Einfluss der Materialkennwerte auf die Spannungs- und Verformungsberechnung beschichteter Gewebemembranen

MASTERARBEIT

von

Elke Sachsenmaier

eingereicht am
Institut für Hochbau

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
der Studienrichtung Konstruktiver Ingenieurbau - Bauingenieurwissenschaften

Begutachter und Betreuer:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Enghardt

Graz, im November 2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit bisher weder im In- noch im Ausland einer Beurteilerin oder einem Beurteiler in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Ich versichere, dass diese Masterarbeit bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht wurde.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank gegenüber all jenen Personen zum Ausdruck bringen, die mich bei der Verfassung dieser Masterarbeit aber auch während meines Studiums unterstützt haben.

Meiner Familie und meinem Partner möchte ich besonders dafür danken, dass sie stets ein offenes Ohr für mich haben, mir in schwierigen Zeiten mit Rat und Tat zur Seite stehen und ich mich immer auf sie verlassen kann.

Darüber hinaus richtet sich mein besonderer Dank an meinen Betreuer Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Oliver Englhardt und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Zellinger als mitbetreuende Person vom Institut für Hochbau an der Technischen Universität Graz für deren ausgezeichnete Betreuung bei der Erstellung meiner Masterarbeit. Zudem möchte ich mich auch bei den übrigen Mitarbeitern des Institutes für Hochbau bedanken, die mir bei der einen oder anderen Fragestellung behilflich sein konnten.

Des Weiteren möchte ich mich für die freundliche Unterstützung meiner Arbeit durch das Bereitstellen von Kennwerten bzw. hilfreichen Kontaktdaten bei folgenden Unternehmen und Personen bedanken: Sattler AG (Dieter Kospach), Taiyo Europe GmbH (Hrvoje Petrovic, Zoltán Simon), str.ature GmbH (Dr.-Ing. Julian Lienhard), Verseidag-Indutex GmbH (Murat Devecioglu, Christiane Cronenberg), seele cover GmbH (Prof. Dr.-Ing. Karsten Moritz), Dekra Industrial International GmbH (Jochen Köhnlein), formTL (Jürgen Trenkle), Texlon HSP GmbH (Manuela Bracale), Temme Obermeier GmbH (Dirk Emmer), Dyneon GmbH (Helmut Frisch) und Messe Frankfurt Exhibition GmbH (Kai Hohlstein, Michael Jänecke).

Zudem möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mit mir gemeinsam die Herausforderungen des Studiums bewältigt aber auch den nötigen Ausgleich zum Studienalltag geschaffen haben.

All jenen die sich an dieser Stelle angesprochen fühlen, die ich aber vergessen habe zu erwähnen, möchte ich hiermit ein herzliches Dankeschön aussprechen.

KURZFASSUNG

Neben den Bauweisen in Stahl, Beton, Holz und Glas konnte sich besonders in den letzten zwei Jahrzehnten aufgrund stetig steigender Zustimmung die moderne Membranbauweise etablieren. Der Entwurf von Membrantragwerken ist jedoch nicht einheitlich geregelt und beruht großteils auf Erfahrungswerten und Know-How aus abgewickelter Projekte. Moderne Membranmaterialien sind Kompositwerkstoffe, das bedeutet das mechanische Verhalten der Einzelkomponenten ist ein ganz anderes als jenes des Verbundwerkstoffes.

Für mechanisch vorgespannte Membrantragwerke kommen fast ausschließlich beschichtete Gewebemembranen zum Einsatz. Deren Materialverhalten kann nicht mit jenem konventioneller Materialien verglichen werden. Im Vergleich zum linear-elastischen Verhalten von klassischen Baumaterialien ist das Materialverhalten von Gewebemembranen - das Kraft-Dehnungsverhalten des reinen Gewebes überlagert sich mit der Schubsteifigkeit der Beschichtung - nichtlinear, anisotrop und nichtelastisch.

Eine der größten Herausforderungen in der Tragwerksberechnung stellt die Beschreibung des komplexen Materialverhaltens mit Hilfe geeigneter Materialmodelle dar. Von den vielen verschiedenen Möglichkeiten der rechnerischen Materialmodellierung wird der vereinfachende, linear-elastische Ansatz am häufigsten verwendet. Die unbekannt Materialparameter (Dehn- und Schubsteifigkeiten) können aus versuchstechnisch bestimmten Kraft-Dehnungsbeziehungen ermittelt werden.

Aufgrund des Fehlens einheitlicher Regelwerke finden sich in der Literatur vielzählige Möglichkeiten zur Versuchsdurchführung und Auswertungsmethodik. Diese Methoden bzw. Versuchsdurchführungen können in einachsige bzw. zweiachsige, fadenparallele Zugversuche und Schubversuche unterteilt werden. Je nach Kombination aus Versuchsdurchführung und Auswertungsmethode ergeben sich für ein und dasselbe Membranprodukt unterschiedliche Steifigkeitskennwerte. Zur Bestimmung der Größenordnung der Streubreiten von Materialkennwerten beschichteter Gewebemembranen wurde eine Recherche in der einschlägigen Literatur durchgeführt und Erfahrungs- bzw. Messwerte von Planungsbüros, Materialherstellern und Prüfanstalten gesammelt.

Ziel der Arbeit ist die Beurteilung der Auswirkungen von Streuungen in den Materialkennwerten bedingt durch unterschiedliche Versuchs- und Auswertungsmethoden auf die Spannungs- und Verformungsberechnung. Dazu wird am Beispiel eines Vierpunktsegels eine Parameterstudie durchgeführt, die die Variation materieller, geometrischer und lastspezifischer Parameter beinhaltet. Die Resultate der Arbeit sollen die Bedeutsamkeit der Materialeigenschaften für die statische Berechnung und die Notwendigkeit einheitlicher Regelungen und harmonisierter Normungen im Membranbau aufzeigen.

ABSTRACT

In addition to the common building materials like steel, concrete, timber and glass modern tensile fabrics are more and more used in recent architecture. But the design of tensile membrane structures is not codified and bases on experiences and know-how out of processed projects. Modern tensile fabrics are composites, for that the mechanical behaviour of the composite is not equal to the sum of its components.

Coated woven fabric is commonly used for anticlastic tensioned membrane structures. Their material behaviour cannot be compared with conventional building materials. The material behaviour of conventional materials generally can be accepted as linear, but coated woven fabrics have a non-linear, anisotropic and non-elastic material behaviour.

One of the biggest challenges in structural analysis of tensile membrane structures is the description of the complex material behaviour of coated woven fabrics with an eligible material model. There are a lot of methods for material modelling in structural analysis, but commonly used is the simplifying linear-elastic material model. The unknown elastic constants (tensile stiffness and shear stiffness) can be experimentally determined.

The absence of design codes for tensile membrane structures leads to a huge amount of testing method for elastic constants of membrane materials. The testing methods are classified into uniaxial and biaxial tensile tests where the fibres are aligned with the loading direction and shear tests where the load is applied at 45° with respect to the fibre direction. Depending on the combination of testing method an examination method there can be different results for the elastic constants of one and the same membrane product. To get a dimension for the spectrum of elastic constants of coated woven fabrics a literature research was done and stiffness data were gathered from architecture and engineering offices, material producer and testing laboratories.

The objective of the Master Thesis is to estimate the impact of material stiffness spectrum according to the different testing method an examination method on the statically analysis of tensile membrane structures. Therefore a parametric study was executed using the example of a hypar with varying material, geometrical and loading parameters. The results of the Master Thesis should point up the need for harmonized engineering standards on tensile membrane structures.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	2
1.3	Aufbau und Inhalt der Masterarbeit	2
2	Gewebemembranen	5
2.1	Fasern und Fäden	5
2.1.1	Naturfasern	5
2.1.2	Synthesefasern	5
2.2	Fadenherstellung	10
2.2.1	Spinnfasern	10
2.2.2	Multifilamentfäden	10
2.3	Gewebe	10
2.3.1	Unbeschichtete Gewebe	12
2.3.2	Beschichtete Gewebe	13
2.3.2.1	Klassifikation beschichteter Gewebemembranen	18
3	Materialverhalten und -modellierung von beschichteten Geweben	19
3.1	Mechanisches Verhalten	19
3.2	Möglichkeiten der rechnerischen Materialmodellierung	24
4	Materialkennwerte	29
4.1	Methoden zur versuchstechnischen Bestimmung von Materialkennwerten	30
4.1.1	Einachsiger, fadenparalleler Zugversuch	30
4.1.2	Zweiachsige, fadenparallele Zugversuche	31
4.1.3	Schubversuche	35
4.2	Streuung von Materialkennwerten	40
4.2.1	Steifigkeitskennwertspektren für verschiedene, beschichtete Gewebemembranen	40
5	Parameterstudie	45
5.1	Methodik	45
5.1.1	Übersicht der durchgeführten Untersuchungen	50
5.1.1.1	Segelform 1	50
5.1.1.2	Segelform 2	51
5.1.1.3	Segelform 3	56
5.1.1.4	Segelform 4	56
5.2	Numerische Berechnung	57
5.3	Ergebnisse	60
5.3.1	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten und konstanter Schubsteifigkeit	61
5.3.1.1	Segelform 1	61
5.3.1.2	Segelform 2	61

5.3.1.3 Segelform 3	66
5.3.1.4 Segelform 4	66
5.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit und konstanten Dehnsteifigkeiten	67
5.3.2.1 Segelform 2	67
5.4 Ergebnisauswertung	69
5.4.1 Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten und konstanter Schubsteifigkeit	69
5.4.2 Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit und konstanten Dehnsteifigkeiten	78
6 Zusammenfassung und Ausblick	85
6.1 Zusammenfassung	85
6.2 Ausblick	87
ANHANG	97
Grafische Ergebnisdarstellung der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten	98
A) Segelform Nr. 1	98
B) Segelform Nr. 2	101
C) Segelform Nr. 3	118
D) Segelform Nr. 4	121
Grafische Ergebnisdarstellung der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit	124
A) Segelform Nr. 2	124
Eingabetasks für die numerische Berechnung	131
A) Segel mit starren Rändern	131
B) Segel mit biegeweichen Rändern	134

1

Einleitung

Motivation Aufgabenstellung und Zielsetzung Aufbau und Inhalt der Masterarbeit

1.1 Motivation

Die moderne Membranbauweise stellt im Vergleich zur Stahl- oder Betonbauweise eine relativ junge Disziplin dar. Besonders in den letzten zwei Jahrzehnten entwickelten sich stetig neue Anwendungsbereiche für Membranwerkstoffe, sodass sie sich neben Beton, Stahl, Holz und Glas als der „fünfte Baustoff“ etablieren konnten.

Moderne Membranwerkstoffe für mechanisch vorgespannte Membranbauten bestehen in der Regel aus einer Vielzahl an Komponenten, die alle die mechanischen Eigenschaften des Komposits prägen und zu einer multifaktoriellen Abhängigkeit des Kraft-Dehnungsverhalten führen. Eine Beschreibung des komplexen Materialverhalten mit Hilfe geeigneter Materialmodelle stellt eine der größten Herausforderungen in der Tragwerksberechnung (Spannungs- und Verformungsberechnung) dar. Es gibt verschiedene Möglichkeiten der rechnerischen Materialmodellierung. Die dafür erforderlichen Materialkennwerte werden auf Basis versuchs-technisch aufgezeichneter Kraft-Dehnungsbeziehungen bestimmt werden. Da spezifische Normen oder fundierte Regelwerke zur Bestimmung von Materialkennwerten derzeit noch fehlen, ergibt sich je nach Wahl der Versuchs- und der Auswertungsmethode ein breites Spektrum an Materialkennwerten, welches einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Spannungs- und Verformungsberechnung haben kann. Zur Zeit wird an der Entwicklung eines ‚Eurocodes‘ für zugbeanspruchte Membrantragwerke aus technischen Textilien und Folien gearbeitet, dessen Fertigstellung aber noch in ferner Zukunft liegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, welche Auswirkungen sich durch Streuungen in den Materialkennwerten bedingt durch unterschiedliche Versuchs- und Auswertungsmethoden in der Spannungs- und Verformungsberechnung ergeben. Mit den Resultaten der Arbeit soll die Notwendigkeit einheitlicher Regelungen und harmonisierter Normungen im Membranbau aufgezeigt werden.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens von beschichteten Gewebemembranen, die Erfassung der vorhandenen Versuchs- und Auswertungsmethoden zur Bestimmung von Materialsteifigkeiten, die Durchführung einer Literaturrecherche und Befragung von Planungsbüros, Materialherstellern und Prüfanstalten zur Bestimmung der Steifigkeitskennwertspektren von beschichteten Gewebemembranen zufolge unterschiedlicher Versuchs- und Auswertungsmethoden und deren Auswirkungen auf die Spannungs- und Verformungsberechnung von Membrantragwerken mit Hilfe einer für ein Vierpunktsegel durchgeführten Parameterstudie.

Die Ziele dieser Arbeit sind:

- das bereits vorhandene Wissen über das Materialverhalten beschichteter Gewebe zusammenzufassen,
- einen Überblick über die vorhandenen Versuchs- und Auswertungsmethoden zur Bestimmung der Dehn- und Schubsteifigkeiten beschichteter Gewebemembranen zu geben,
- die möglichen Streubreiten der versuchstechnisch bestimmten Materialkennwerte mittels recherchierten Literaturwerten und gesammelten Erfahrungs- bzw. Messwerten von Planungsbüros, Materialhersteller und Prüfanstalten darzustellen,
- und die Größenordnung der Auswirkungen von materialspezifischen Steifigkeitskennwertspektren auf die Ergebnisse der Spannungs- und Verformungsberechnung mittels durchgeführter Parameterstudie am Vierpunktsegel aufzuzeigen.

1.3 Aufbau und Inhalt der Masterarbeit

Kapitel 2 gibt einen Überblick über Fasermaterialien, die Herstellung von Garnen und deren Weiterverarbeitung zu beschichteten und unbeschichteten Geweben. Darüber hinaus werden die Eigenschaften der gängigsten Gewebemembranen und deren Klassifizierung beschrieben.

In **Kapitel 3** wird das mechanische Verhalten beschichteter Gewebemembranen, welches von vielzähligen Faktoren abhängig ist, beschrieben und die Möglichkeiten der rechnerischen Materialmodellierung aufgezeigt.

Kapitel 4 beschreibt die Vielzahl an vorhandenen Methoden zur versuchstechnischen Bestimmung von Materialkennwerten. Dabei wird eine Unterteilung nach Versuche zur Bestimmung der Dehnsteifigkeiten und der Schubsteifigkeiten vorgenommen. Zusätzlich wird erläutert welche Faktoren für die Streuung von Steifigkeitskennwerten verantwortlich sind und welche Steifigkeitskennwertspektren sich bedingt durch die verschiedenen Versuchsdurchführungen und Auswertungsmethoden für beschichtete Gewebemembranen ergeben.

Kapitel 5 befasst sich mit der Methodik der durchgeführten Parameterstudie am Vierpunktsegel, den Berechnungsgrundlagen der verwendeten Berechnungssoftware und der Darstellung und Auswertung der Ergebnisse.

Abschließend wird in **Kapitel 6** eine Zusammenfassung gegeben.

Im **Anhang** werden die Ergebnisse der Parameterstudie zusätzlich grafisch dargestellt und die Eingabeparameter der numerischen Berechnung beschrieben.

2 Gewebemembranen

Fasern und Fäden
Fadenherstellung
Gewebe

Gewebemembranen stellen flächige, biegeeweiche Werkstoffe dar, die durch das Verweben von Fäden entstehen. Je nach Einsatzgebiet des Gewebes können die Materialeigenschaften durch das Aufbringen einer zusätzlichen Beschichtung verändert und verbessert werden [22]. Dieses Kapitel befasst sich mit den Eigenschaften und der Herstellung von natürlichen Fasern und Synthefasern, der Herstellung von Fäden und deren Weiterverarbeitung zu unbeschichteten und beschichteten Geweben.

2.1 Fasern und Fäden

Die zur Herstellung des Gewebes benötigten Fäden werden aus miteinander verdrehten Einzelfasern gebildet. Diese Fasern bilden damit die Grundlage der Gewebeherstellung und können natürlichen (Naturfasern) oder künstlichen Ursprungs (Synthefasern) sein (siehe Abb. 2.1) [17].

2.1.1 Naturfasern

Naturfasern sind im Vergleich zu künstlich hergestellten Fasern in ihrer Länge und ihrem Durchmesser naturgegeben und können nicht beeinflusst werden. Üblicherweise besitzen Naturfasern einen kreisförmigen Querschnitt mit einem Durchmesser von zirka 0,1 mm [17]. Zu den Naturfasern zählen tierische Fasern wie Ziegenhaar, Seide und Schafwolle, aber auch pflanzliche Fasern wie Hanf und Baumwolle [14].

2.1.2 Synthefasern

Für die Gewebeherstellung moderner Membranbaumaterialien kommen hauptsächlich künstlich erzeugte Fasern auf anorganischer oder Polymerbasis zum Einsatz. Die Gliederung der Synthefasern erfolgt in Fasern aus natürlichen Polymeren, in Fasern aus synthetischen Polymeren und in Fasern aus anorganischen Rohstoffen, wie in Abb. 2.1 dargestellt. Polymere entstehen durch die Polymerisation von Monomeren und stellen Verbindungen aus

Makromolekülen dar. Bei der Polymerisation kommt es zur Auflösung der Mehrfachverbindungen der Einzelmoleküle und zur Bildung neuer Riesenmoleküle [14].

Naturfasern				
organisch - tierisch		organisch - pflanzlich		anorganisch
Ziegenhaar		Hanf		Asbest
Schafwolle		Baumwolle		
Seide				

Synthesefasern				
natürliche Polymere	synthet. Polymere		anorganisch	
Viskose	Polyester	PES	Glasfaser	GF
	Polyamid	PA	Carbonfaser	CF
	Aramid	AR	Metallfaser	MTF
	Polyethylen	PE		
	Polyethylen hochfest	PE		
	Fluorpolymere	PTFE		

Abb. 2.1 Fasermaterialien [14]

Natürliche Polymere

Zur Gruppe der natürlichen Polymere gehört Viskose, deren Ausgangsprodukt natürliche Zellulose ist. Die Zellulose wird in Lauge gelöst und flockt in einem Säurebad aus (Viskoseverfahren). Einerseits ist die chemische Beständigkeit der Viskosefaser nur gering, andererseits erfährt die Festigkeit durch UV-Strahlung und ab einer Temperatureinwirkung von 150 °C eine Beeinträchtigung [14].

Synthetische Polymere

Die Gruppe der synthetischen Polymere bilden Polyester (PES), Polyamid (PA), Aramid (AR), Polyethylen (PE) und Fluorpolymere. Polyester besitzt einige Vorteile, weswegen es zu den am häufigsten verwendeten Gewebematerialien für Membrankonstruktionen zählt: es ist preiswert, besitzt hohe Steifigkeit, ist wasser- und witterungsbeständig, verrottungsfest und chemisch beständig. Jedoch besitzt Polyester auch erwähnenswerte Nachteile. Im Vergleich zu Polyamid ist die Abriebfestigkeit von Polyester geringer. Weiters schmilzt es bei zirka 260 °C und muss wegen seiner Entflammbarkeit mit einer flammhemmenden Beschichtung versehen werden. Das Polyestergranulat wird im Schmelzspinnverfahren zu Endlosfäden (Filamente) weiterverarbeitet. Ein spezielles Nachstreckverfahren bedingt die hohe Festigkeit des Fadens von zirka 1 kN/mm² [14].

Polyamid besitzt eine Zick-Zack-Struktur, die die Faser außerordentlich dehnbar macht. Darüber hinaus sind die Fasern sehr abriebfest, haben eine gute Reißfestigkeit und Steifigkeit und

schmelzen bei zirka 220 °C. Allerdings werden die mechanischen Eigenschaften durch den Einfluss von Sonnenlicht, Feuchtigkeit und Sauerstoff beeinträchtigt [14].

Aramid findet nur im Hochtechnologiebereich Anwendung, da es wesentlich teurer als Polyamid ist. Die Faser zeichnet sich durch einen hohen Schmelzpunkt von zirka 500 °C und einer gegenüber Polyester dreimal so hohen Zugfestigkeit aus. Die hohe Steifigkeit erhält die Faser durch Doppelbindungen. Die Eigenschaften von Aramidfasern werden durch UV-Strahlung stark beeinträchtigt, weswegen es sich für den Einsatz als lichtdurchlässiges Gewebe weniger eignet [14].

Polyethylen besitzt als monofile synthetische Fasern eine derartige Beschaffenheit, dass die Fäden sperrig, hart und steif erscheinen. Polyethylen-Fasern zeigen Beständigkeit gegenüber Säuren und Laugen, sind jedoch nicht resistent gegenüber dem Angriff durch Öle und Fette. Überdies nehmen sie kein Wasser auf und sind dank ihres geringen spezifischen Gewichts schwimmfähig. Im Vergleich zur untergeordneten Anordnung der langen Molekülketten bei normalfestem Polyethylen sind diese bei hochfestem Polyethylen linear angeordnet, damit stellen nun die festen Atombindungen die schwächsten Glieder der Kette dar (siehe Abb. 2.2) [14].

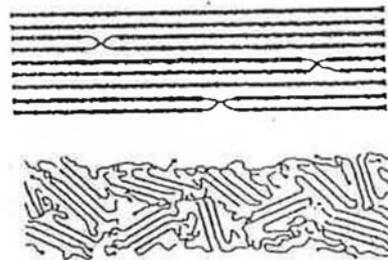


Abb. 2.2 Molekülanordnung von Polyethylen, oben: normalfest, unten: hochfest [14]

Fluorpolymere wie die Kohlenstoff-Fluor-Verbindung PTFE (Polytetrafluorethylen) zählen in der organischen Chemie zu einer der stärksten Bindungen [2]. Aus diesem Grund sind sie extrem widerstandsfähig und besitzen auch ohne Beschichtung [17] eine sehr hohe Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung, aber auch gegenüber allen in der Atmosphäre enthaltenen Chemikalien. Weiters zeichnet sich PTFE dadurch aus, dass es unbrennbar ist und seine Struktur durch Temperatureinflüsse nicht verändert wird. Die antiadhäsiven Eigenschaften der Faser wirken dem Eindringen von Wasser und Schmutz in das Gewebe entgegen [14].

Anorganische Fasern

Zur Gruppe der anorganischen Fasern werden Glasfasern, Carbonfasern und Metallfasern gezählt. Gewebe aus Glasfasern zählen nach den Polyestergeweben zu den für Membrankonstruktionen wichtigsten Geweben. Die aus hochwertigem Glas ersponnenen sehr feinen Fäden besitzen eine hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit. Abgesehen davon, dass die Fasern durch Feuchtigkeitseinwirkung geschwächt werden können, ist ihr Verhalten gegenüber Umwelteinflüssen und Chemikalien neutral. Ein weiterer Vorteil von Glasfasern ist ihre hohe Maßhaltigkeit. Ein großer Nachteil dieser Fasern ist ihr sprödes Verhalten, dem mit

der Verwendung von Filamentfasern mit einem Durchmesser von 3 μm begegnet werden kann. Der geringen Scheuerfestigkeit muss durch das Aufbringen von Beschichtungen entgegengewirkt werden [14].

Carbonfasern sind monoatomare Fasern, bei denen eine feste Bindung zwischen den Kohlenstoffatomen besteht. Aufgrund dieser festen Bindungen bestechen Glasfasern mit außergewöhnlicher Steifigkeit und Festigkeit. Anwendungsgebiet der Carbonfasern ist der Hochtechnologiebereich wie z.B. Hochleistungssegel für den America's Cup [14].

Mechanische Eigenschaften von Synthesefasern

In Abb. 2.3 wird das Spannungs-Dehnungsverhalten verschiedener Synthesefasern gegenüber gestellt. Bei genauerer Betrachtung des Diagramms fällt zunächst das annähernd lineare Verhalten von Aramid und Glasfasern auf. Im Vergleich dazu weisen Polyester und Polyamid ein ausgeprägtes nichtlineares Verhalten und größere Dehnungen bei geringeren Spannungen auf. Tab. 2.1 und Abb. 2.3 zeigen, dass die spezifische Festigkeit von Aramid zirka doppelt so hoch wie jene von Glasfasern und zirka 2,7 mal höher als jene von Polyester und Polyamid ist [14].

Material	Dichte	Bruchfestigkeit	Bruchdehnung	E-Modul
	g/cm^3	N/mm^2	%	N/mm^2
Polyamid	1,14	bis 1000	15-20	5000-6000
Polyesterfasern	1,38-1,41	1000-1300	10-18	10.000-15.000
Glasfasern	2,55	bis 3500	2,0-3,5	70.000-90.000
Aramidfasern	1,45	bis 2700	2-4	130.000-150.000
PTFE-Fasern	2,1-2,3	160-380	13-32	700-4000
Carbonfasern	1,7-2,0	2000-3000	< 1	200.000-500.000

Tab. 2.1 Mechanische Eigenschaften einiger Synthesefasern [24]

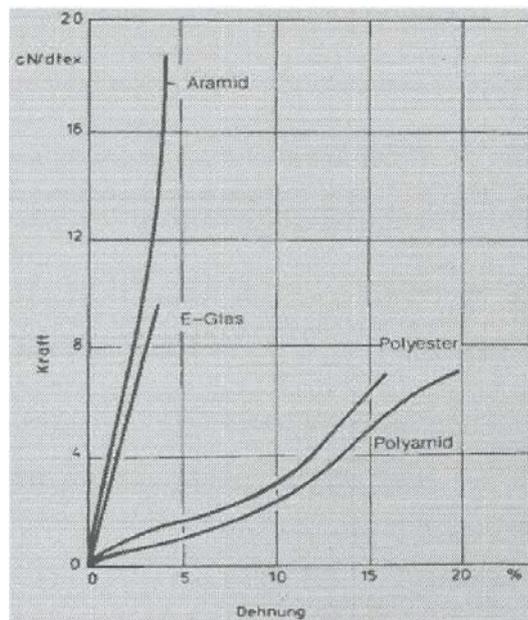


Abb. 2.3 Spannungs-Dehnungsverhalten [16]

Faserherstellung

Synthesefasern können in ihrer Länge und ihrem Querschnitt nahezu beliebig gestaltet werden [24]. Das verwendete Spinnverfahren beeinflusst dabei die Feinheit und die Querschnittsform der Faser. Zur Herstellung von Synthesefasern finden das Schmelzspinnverfahren und das Nassspinnverfahren Anwendung. Ersteres wird hauptsächlich zur Erzeugung von synthetischen Polymeren und Glasfasern verwendet. Bei diesem Verfahren werden die Polymere geschmolzen, anschließend durch eine Spinn Düse gepresst und durch Abkühlung verfestigt. Der angeschlossene Laminiervorgang streckt die Fasern und richtet die Molekülketten parallel aus (siehe Abb. 2.4) [14].

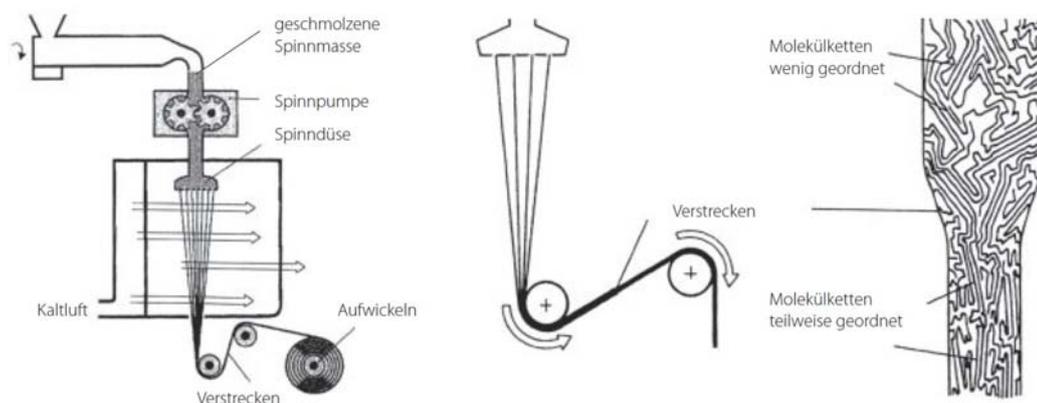


Abb. 2.4 Schematische Darstellung des Schmelzspinnverfahrens [22]

Das Nassspinnverfahren dient zur Herstellung von Fasern aus natürlichen Polymeren. Dabei werden die Polymere in Chemikalien gelöst und durch Spinn Düsen gepresst, um anschließend in einem Fällungsbad und durch Streckung verfestigt zu werden [14].

2.2 Fadenherstellung

2.2.1 Spinnfaserfäden

Naturfasern sind in ihrer Länge beschränkt, deshalb bedient man sich fadenbildender Technologien, um aus ihnen geometrisch stabile Fäden herstellen zu können. Fäden aus Fasern begrenzter Länge werden als Spinnfaserfäden bezeichnet. Der formstabile Fadenverband entsteht, indem die Einzelfasern miteinander um die Fadenlängsachse verdreht werden. Häufig stehen nach dem Verdrehen der Fasern zu einem Faden Faserenden heraus. Die Anzahl der Drehungen pro Meter wird als Drehungshöhe bezeichnet. Diese hat einen wesentlichen Einfluss auf das Elastizitätsverhalten des Fadens. Mit steigender Drehungshöhe sinkt der E-Modul des Fadens gegenüber dem E-Modul der Einzelfaser. Das bedeutet gleichzeitig, dass das mechanische Verhalten des Fadens über die Drehungshöhe entsprechend den Anforderungen eingestellt werden kann. [24].

2.2.2 Multifilamentfäden

Bei Endlosfasern sogenannten Filamenten können diese direkt zu Multifilamentfäden weiterverarbeitet werden. Dabei werden mehrere hundert Filamente zu einem Faden (Multifilamentfaden) gedreht, um die gewünschte Fadendicke zu erreichen. Dadurch können die hohen Bruchfestigkeiten von Synthesefasern besser ausgenutzt werden [24].

2.3 Gewebe

Gewebe bestehen aus orthogonal zueinander verwobenen Fäden, die wie zuvor beschrieben aus miteinander verdrehten Einzelfasern bestehen. Die Fäden in Herstellungsrichtung werden als Kettfäden bezeichnet. Die orthogonal zu den Kettfäden verlaufenden Fäden sind die Schussfäden. Die textilen Membranen werden nach der eingesetzten Faser, der Art der Flächenbildung und - falls vorhanden - der Beschichtungsart unterschieden [22].

Zur Flächenbildung eines Gewebes werden Kett- und Schussfäden gegenseitig eingebunden. Dabei gibt es unterschiedliche Methoden, um die Fäden miteinander zu verkreuzen. Für in Membrankonstruktionen eingesetzte Gewebe kommen zwei Bindungsarten zum Einsatz: die Leinwandbindung, welche die einfachste und engste Verkreuzung der Fäden darstellt, und die Panamabindung als Abwandlung der Leinwandbindung. Je nach angewandtem Verfahren stellt sich bei Kett- und Schussfäden eine charakteristische Welligkeit ein (siehe Abb. 2.5). Der Webprozess und der Beschichtungsvorgang verursachen Unterschiede in den

Welligkeiten von Kett- und Schussfaden (siehe Abb. 2.6). Während der Kettfaden beim Herstellungsprozess unter Spannung gehalten wird und damit einen gestreckteren Fadenverlauf aufweist, stellt sich beim Schussfaden eine größere Welligkeit ein. Diese erhöhte Welligkeit des Schussfadens führt zu einem weicherem Schussfaden und einem geringeren E-Modul in dieser Richtung [22]. Die doppelte oder mehrfache Fadenführung bei der Panamabindung führt gegenüber der Leinwandbindung zu einer geringeren Fadenwelligkeit in Kett- und Schussrichtung (siehe Abb. 2.7) [14].

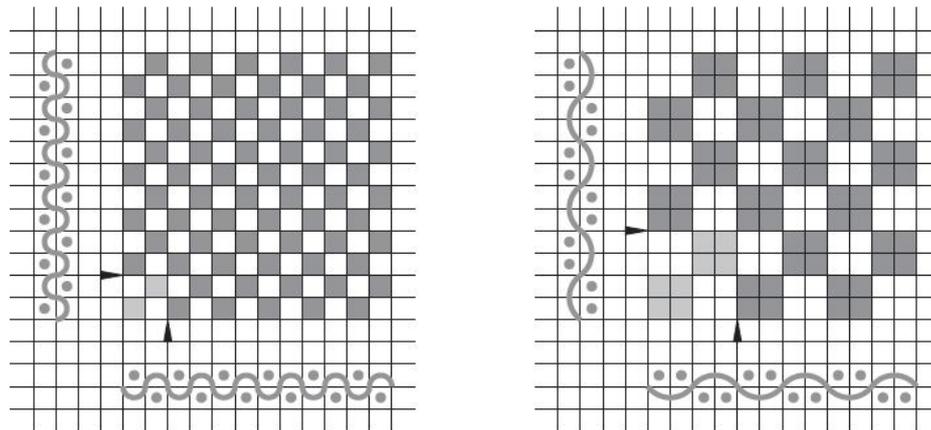


Abb. 2.5 Bindung, links: Leinwandbindung, rechts: Panamabindung [22]

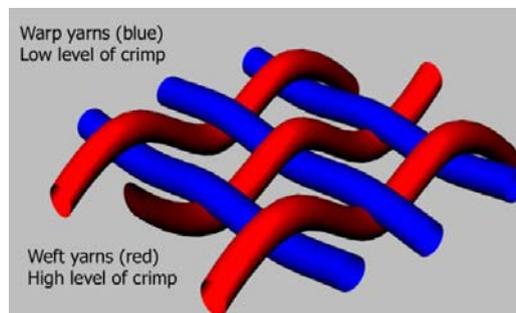


Abb. 2.6 Unterschied in der Welligkeit von Kett- (blau) und Schussfaden (rot) [13]

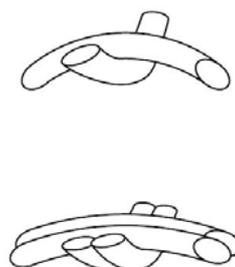


Abb. 2.7 Welligkeitsunterschied verschiedener Bindungsarten, oben: Leinwandbindung, unten: Panamabindung [22]

Der Membranhersteller Serge Ferrari [39] hat eine Vorspanntechnologie entwickelt mit der die Fadenwelligkeit wesentlich verringert und homogenisiert werden kann. Dabei wird das Trägergewebe während dem Beschichtungsvorgang in Kett- und Schussrichtung gespannt (siehe Abb. 2.8). Das so hergestellte, beschichtete Gewebe (Precontraint Gewebe) weist nun identische, deutlich verringerte Welligkeiten in beiden Fadenrichtungen auf. Die Auslenkung der Kett- und Schussfäden minimiert sich und das Gewebe ist annähernd eben. Das bringt die Vorteile der Dehnungsgleichheit, eines symmetrischen, mechanischen Verhaltens und der gleichmäßigen Beschichtungsdicke über dem Fadenrücken mit sich [14].

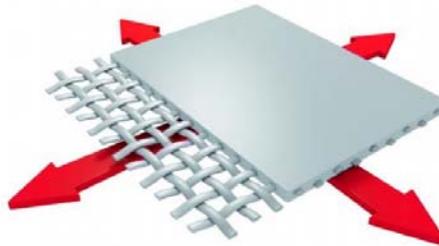


Abb. 2.8 Vorspanntechnologie von Serge Ferrari, Precontraint Gewebe [40]

Die Fadendichte ist ein Maß für die Fadenanzahl pro Zentimeter Gewebe je Fadenrichtung. Gewebe werden sehr eng gewoben und besitzen eine hohe Fadendichte in beiden Fadenrichtungen. Wird das Gewebe weitmaschiger gewoben, verringert sich dessen Fadendichte. Sinkt die Fadendichte unter 2 Fäden/cm spricht man von einem Gittergewebe [24]. An den Knotenpunkten werden die Fäden verklebt oder mit Bindfäden fixiert, damit die gegenseitige Verschiebung der Fäden verhindert wird. Die Fäden werden anschließend mit einer Ummantelung oder Beschichtung versehen, um sie vor UV-Strahlung zu schützen [14].

2.3.1 Unbeschichtete Gewebe

Bei textilen Membranen übernimmt primär das Gewebe die lastabtragende Funktion. Das sich aus dem Verwendungszweck ergebende Anforderungsprofil an den Membranwerkstoff bestimmt die Notwendigkeit einer Beschichtung als Schutz des Gewebes und zur Verbesserung seiner Eigenschaften wie z.B. Wasserundurchlässigkeit [22]. Sind die gestellten Anforderungen gering, kommen auch unbeschichtete Gewebe wie Baumwoll-, Metall- oder PTFE-Gewebe zum Einsatz [17].

Eine Beschichtung ist bei Baumwollgewebe (siehe Abb. 2.9 links) und Baumwollmischgewebe nicht üblich, stattdessen erhält das Gewebe eine Imprägnierung, die dem Gewebe temporär eine flammhemmende, fungizide und wasserabweisende Oberfläche verleiht. Weitere Vorteile des Gewebes aus Baumwolle sind die Hitzebeständigkeit im baupraktischen Bereich und die Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischer Belastungen mit üblichen Konzentrationen [19]. Baumwoll- und Baumwollmischgewebe besitzen geringe Festigkeiten und Elastizitäten und trotz der Imprägnierung weisen sie nur eine kurze Lebensdauer unter Freibewitterung (bis zirka 5 Jahre) auf [26]. Deshalb finden sie lediglich in Innenräumen oder bei gering belasteten, temporären Bauten Anwendung. Gewebe aus Synthefasern

erreichen im Vergleich zu jenen aus Naturfasern eine 6- bis 15-mal höhere Bruchfestigkeit und eine 4- bis 6-fache Lebensdauer [17].

Die Basis eines Metallgewebes (siehe Abb. 2.9 mitte) bilden flache oder runde Drähte, Litzen oder Seile aus metallischen Werkstoffen wie Edelstahl, Titan-, Chrom- oder Chromnickelstahl aber auch Nichteisenmetalle. Diese Drähte werden entweder mit der Leinwandbindung oder der Körperbindung offenporig verwoben. Bei der Körperbindung werden mindestens zwei Drähte paarweise eingebunden. Durch Beizen, Eloxieren oder Lackieren können vielfältige Gewebeoberflächen geschaffen werden. Das Anwendungsgebiet von Metallgewebe erstreckt sich von Fassadenverkleidungen über Innendecken und Werbeträger bis hin zu Einbruchsisicherungen [17].

In der Gruppe der unbeschichteten Fluorpolymergewebe ist das PTFE-Gewebe eines der wichtigsten Vertreter (siehe Abb. 2.9 rechts). Jedoch kommt das Gewebe aufgrund seiner hohen Materialkosten im Bereich des Textilbaus nur selten zum Einsatz. Die Vorteile hinsichtlich Anschmutzverhalten, Knickbeständigkeit und Abriebfestigkeit begünstigen jedoch den Einsatz von PTFE-Geweben bei beweglichen Sonnenschutzsystemen. Bei PTFE-Geweben kann eine durchaus ähnliche Lebensdauer wie bei Folien auf Basis von Fluorpolymer erwartet werden. Im Unterschied zur Folie bietet das Gewebe aufgrund der Gewebezweischenräume eine deutlich größere Angriffsfläche für Feuchtigkeit, biologische und chemische Angriffe. Damit diese Angriffe nicht zu einer Schmälerung der Lebensdauer führen, ist das Aufbringen einer vollflächigen Beschichtung aus Fluorpolymeren in diesem Fall von Vorteil [17].



Abb. 2.9 Unbeschichtete Gewebe, links: Baumwollgewebe, mitte: Metallgewebe, rechts: PTFE-Gewebe [17]

2.3.2 Beschichtete Gewebe

Grundsätzlich werden die Dehnsteifigkeiten einer Membran durch das Gewebe bestimmt, jedoch können einige Eigenschaften durch das Aufbringen von Beschichtungen und Topcoats verändert und verbessert werden [17]. Auf die diversen Einwirkungen lässt sich mit unterschiedlichen Materialkombinationen und -stärken von Trägergewebe, Beschichtung und Finish reagieren. Die Eigenschaften des Kompositwerkstoffes können mit einer geeigneten Kombination dem Anforderungsprofil angepasst werden [22].

Durch die zumeist beidseitig aufgebrachte Beschichtung wird das Gewebe vor Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Feuer, Mikroben und Pilzbefall geschützt. Das führt zu Verbesserungen hin-

sichtlich Wasserundurchlässigkeit, Weiterreißfestigkeit, Dauerknickbeständigkeit, Lebensdauer und Brand- und Anschmutzverhalten. Zudem ermöglicht die Beschichtung unterschiedliche Farbgebungen und das Verbinden mehrerer Gewebeteilflächen mit Hilfe von thermischen oder hochfrequenten Schweißverfahren, da die Gewebefäden nicht direkt miteinander verschweißt werden können. Unbeschichtete Gewebe müssen mit Garnen vernäht werden. Fluorpolymergewebe, bei denen eine Direktverschweißung der Fäden möglich ist, und Gewebe mit Silikonbeschichtungen, bei denen eine Klebeverbindung üblich ist, bilden die Ausnahme. Die Beschichtung erhöht die Schubsteifigkeit der Membran gegenüber kurzzeitigen Belastungen, da sie die Winkelverdrehung der Fäden behindert [17].

Die Beschichtungen, die heutzutage am häufigsten zum Einsatz kommen sind aus Polyvinylchlorid (PVC), Polytetrafluorethylen (PTFE) oder Silikon. Dabei müssen Rohgewebe und Beschichtung aufeinander abgestimmt sein. PTFE-Beschichtungen können - bedingt durch die Beschichtungsmethode - nur auf Gewebe aufgebracht werden, die eine Schmelztemperatur über jener von PTFE besitzen. Daher ist es nicht möglich ein Polyestergewebe mit einer PTFE-Beschichtung zu versehen, da Polyester mit einer Schmelztemperatur von 220 °C bis 260 °C deutlich unter der Schmelztemperatur von PTFE mit zirka 327 °C liegt [17].

Beschichtungen aus PVC und Silikon werden üblicherweise im Streichverfahren aufgebracht, während bei PTFE-Beschichtungen das Sinterverfahren zur Anwendung kommt. Das Streichverfahren wird im Folgenden anhand von einer PVC-Beschichtung vorgestellt (siehe Abb. 2.10). Beim Streichverfahren wird in einem ersten Schritt ein Haftstrich (Gemenge aus PVC und Haftvermittler) aufgebracht. Dieser soll den Verbund zwischen Beschichtung und Rohgewebe für die weitere Verarbeitung sicherstellen. Der Haftstrich wird anschließend im Gelierkanal einer Temperatur von zirka 180 °C ausgesetzt. Dabei vermengen sich Weichmacher- und PVC-Moleküle zu einer homogenen Masse. Während des Gelierprozesses wird eine gleichmäßige Kettspannung aufgebracht und das Trägergewebe entlang des Randes mit Nadeln oder Kluppen im Spannrahmen gehalten. Die Abkühlung der beschichteten Bahn erfolgt mittels wassergekühlten Walzen. Nach dem Abkühlen haftet der Haftstrich folienförmig am Rohgewebe. In einer zweiten Streicheinheit wird der Deckstrich aufgebracht, welcher bis auf den Haftvermittler dieselbe Zusammensetzung wie der Haftstrich aufweist. Analog zu der ersten Streicheinheit wird der Deckstrich geliert und abgekühlt. Üblicherweise wird das Gewebe beidseitig beschichtet, daher muss der gesamte Vorgang auf der Rückseite wiederholt werden [22].

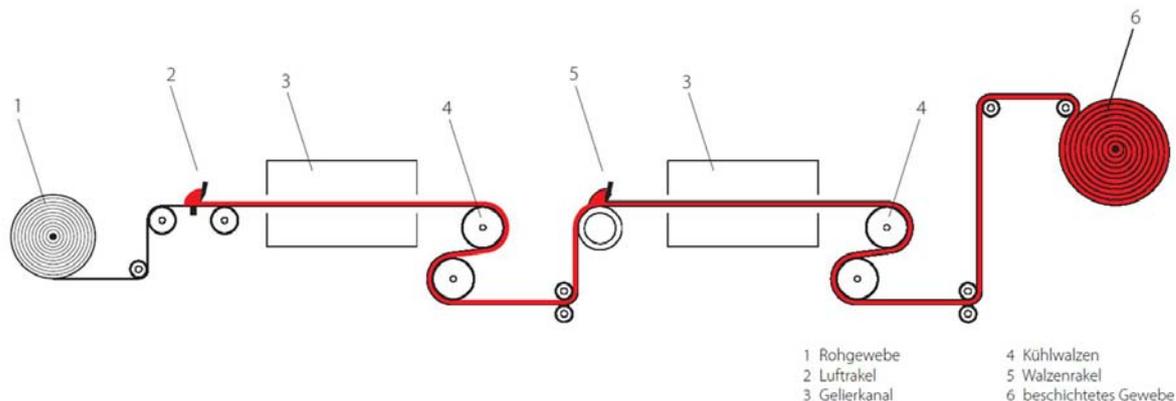


Abb. 2.10 Beschichtungsvorgang im Streichverfahren [22]

Beim Sinterverfahren wird das Rohgewebe durch eine wässrige PTFE-Dispersion gezogen. Anschließend verdampft das Wasser unter Infrarotbestrahlung. PTFE besitzt eine geringe Fließfähigkeit nach dem Aufschmelzen, daher muss es nach dem ersten Beschichtungsvorgang bei 370 °C bis 380 °C gesintert werden. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt bis die gewünschte Beschichtungsdicke erreicht ist. Aufgrund der starken Temperatureinwirkung während des Sintervorgangs ist ein Festhalten der Schussrichtung nicht möglich, weshalb während des Beschichtungsvorgangs nur die Kettrichtung mit einer definierten Kraft gespannt werden kann. Die ohnehin größere Welligkeit des Schussfadens aus dem Webprozess wird somit noch verstärkt [22].

Durch das schichtweise Aufsintern von PTFE-Partikeln besitzt das beschichtete Gewebe eine zerklüftete Oberfläche. Auf dieser rauen Oberfläche könnten Schmutzpartikel und Mikroben leichter haften bleiben und zu einer raschen Verschmutzung der Membran führen. Bei PVC-beschichteten Geweben stellt hingegen das Austreten der Weichmacher ein Problem dar. Durch eine Oberflächenbehandlung (Topcoating oder Finishing) lässt sich einerseits die Oberfläche von PTFE-beschichteten Geweben glätten und damit eine Beeinträchtigung des optischen Erscheinungsbildes verhindern, andererseits verzögert das Finish bei PVC-beschichteten Geweben die Weichmacherwanderung und schützt damit die Beschichtung vor Versprödung. Wie sehr die Eigenschaften des beschichteten Gewebes durch das Aufbringen des Topcoats beeinflusst werden, hängt von dem verwendeten Verfahren ab. Während das Auflaminieren der Folie zu einer zusätzlichen Behinderung der Winkelverschieblichkeit der Kett- und Schussfäden führt, wird das Gewebe durch das Aufbringen von Lacken nur unwesentlich versteift [22].

Primär kommen zwei Membranwerkstoffe im Bereich des Textilen Bauens zum Einsatz: Polyestergewebe mit einer Beschichtung aus PVC und Glasfasergewebe mit einer PTFE-Beschichtung. Ferner werden noch silikonbeschichtete Glasfasergewebe verwendet. Mit Fluorpolymeren oder Polyolefinen beschichtete Polyestergewebe, beschichtete Fluorpolymergewebe sowie PVC-beschichtete Aramidgewebe kommen selten zum Einsatz. Aufgrund

seiner Materialeigenschaften und geringen Materialkosten stellt das PVC-beschichtete Polyestergerewebe den am häufigsten eingesetzten Membranwerkstoff dar [22].

PVC-beschichtetes Polyestergerewebe (siehe Abb. 2.11) zeichnet sich durch Festigkeiten bis zu 9800 N/5 cm (Typ V) und hohen Bruchdehnungen von bis zu 30 % (gutmütiges Tragverhalten) für den Einsatz in weit gespannten Flächentragwerken aus. PVC-beschichtete Polyestergerewebe sind schwer entflammbar und stellen aufgrund ihres geringen Flächengewichts und ihrer geringen Materialstärke nur eine geringe Brandlast dar. Bei ausreichendem Schutz des Gewebes durch Oberflächenversiegelung kann eine Lebensdauer von über 20 Jahren erwartet werden. Aufgrund der sehr guten Knickbeständigkeit werden PVC-beschichtete Polyestergerewebe gerne verwendet, wenn es um den Einsatz bei wandelbaren oder mobilen Konstruktionen geht [17]. Heutzutage stellt auch das Anschmutzverhalten kein Problem mehr dar, nachdem die Oberfläche mit Topcoats nachbehandelt werden kann [24]. Ein großer Nachteil von Polyestergereweben mit PVC-Beschichtung ist die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung. Um die mechanischen Eigenschaften des beschichteten Gewebes dauerhaft erhalten zu können, muss stets ein Schutz des Trägergerewebes gegenüber UV-Strahlung vorhanden sein. Wird das Trägergerewebe der UV-Strahlung ausgesetzt - z.B. durch Ablösen der Beschichtung - , führt das zu einem rapiden Abfall der Festigkeit. Der Zusammenhang zwischen Beschichtungsdicke und Gewebeschutz ist somit direkt proportional [22].



Abb. 2.11 links: PVC-beschichtetes Polyestergerewebe [17], rechts: freigelegtes Polyestergerewebe durch Beschichtungsablösung [22]

Das PTFE-beschichtete Glasfasergewebe (siehe Abb. 2.12) ist inzwischen zu einem der Standardprodukte im Textilbau geworden. Es zeichnet sich durch hohe Festigkeiten (schwerer Standardtyp 7500 N/5 cm), einen erhöhten Widerstand gegen das Anschmutzen, Brandverhalten (nichtbrennbar) und eine Lebenserwartung von 25 bis 30 Jahren aus. Jedoch bewirkt die Sprödeheit des Glasfasergewebes geringere Materialdehnungen (Bruchdehnung ca. 3 % bis 10 %) und eine relativ geringe Knickbeständigkeit, weshalb sich PTFE-beschichtete Glasfasergewebe nicht für den Einsatz bei wandelbaren Flächen eignet [17]. Zusätzlich erschweren die geringe Knickbeständigkeit und die hohe Schubsteifigkeit des Gewebes die Handhabung bei der Montage [22].

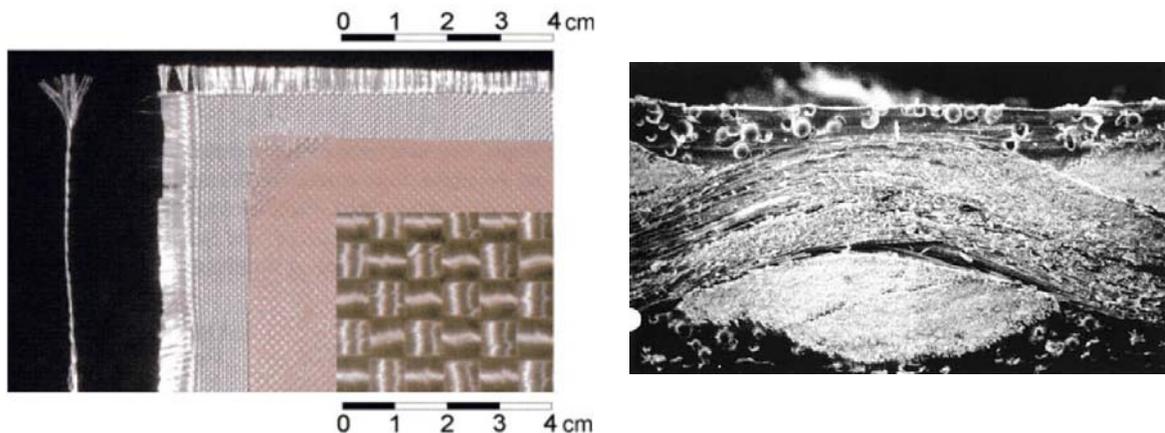


Abb. 2.12 links: Glasfaden, Glasgewebe und beschichtetes Gewebe [22], rechts: Querschnitt durch ein beschichtetes Gewebe [24]

Silikonbeschichtete Glasfasergewebe (siehe Abb. 2.13 links) finden bislang nur selten Anwendung im textilen Hochbau. Ein ausschlaggebender Grund dafür ist die statische Aufladung der Silikonbeschichtung und das damit verbundene schlechte Anschmutzverhalten. Da das mechanische Verhalten primär vom Glasfasergewebe bestimmt wird ist es dem vom PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe ähnlich, sodass sie sich lediglich in ihren beschichtungsabhängigen Eigenschaften unterscheiden. Um ein Beispiel zu nennen, schützt die diffusionsdichte Silikonbeschichtung das Glasfasergewebe besser als die mikroporöse PTFE-Beschichtung [17]. Darüber hinaus verbessert sich durch die Silikonbeschichtung die Empfindlichkeit gegenüber Knicken [22]. Ein großer Nachteil der Silikonbeschichtung liegt in der Verbindungstechnik. Dauerhafte Verbindungen können nur über Klebeverbindungen oder ähnliche Verbindungen realisiert werden, da Silikon nicht thermisch geschweißt werden kann. Sollten hinsichtlich der Verbesserung des Anschmutzverhaltens in Zukunft Fortschritte gemacht werden, könnte sich das kostengünstigere silikonbeschichtete Glasfasergewebe ebenfalls zu einem Standardprodukt im Textilbau entwickeln [17].



Abb. 2.13 links: silikonbeschichtetes Glasfasergewebe, mitte und rechts: Fertigung [22]

PVC-beschichtetes Aramidgewebe stellt mit einer Festigkeit von 24500 N/5 cm (Bruchdehnung 5 bis 6 %) die Membran dar, welche am stärksten belastet werden kann. Die nicht vorhandene UV-Beständigkeit erfordert eine vollständige Ummantelung durch eine opake

Beschichtung. Das Einsatzgebiet dieser beschichteten Gewebemembran beschränkt sich jedoch auf Anwendungen, bei denen hohe Festigkeiten erforderlich sind [17].

2.3.2.1 Klassifikation beschichteter Gewebemembranen

Die Einteilung der Membranwerkstoffe in Typen erfolgt nach steigender Zugfestigkeit. Ursprünglich wurde die Klassifizierung nur für PVC-beschichtete Polyestergewebe angewandt, mittlerweile werden auch andere Materialien nach steigender Zugfestigkeit eingeteilt [15]:

- Typ I: ca. 3000 N/5 cm
- Typ II: ca. 4000 N/5 cm
- Typ III: ca. 5000 N/5 cm
- Typ IV: ca. 7000 N/5 cm
- Typ V: ca. 9000 N/5 cm

In Tab. 2.2 ist die Klassifikation von PVC-beschichtetem Polyestergewebe und PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe dargestellt und deren wichtigsten Eigenschaften nochmals zusammengefasst.

Material Gewebe/ Beschichtung	Gewebetyp	Flächen- gewicht nach DIN 55 352 [g/m ²]	Zugfestigkeit Kette/Schuss nach DIN 53 354 [N/50 mm]	Bruchdehnung Kette/Schuss nach DIN 53 354 [%]	Knickbe- ständigkeit	Feuerbe- ständigkeit nach DIN 4102	Lebens- erwartung [Jahren]
Polyester/PVC	Typ I	800	3000/3000	15/20	sehr gut	B1	> 20
	Typ II	900	4400/3950	15/20			
	Typ III	1050	5750/5100	15/25			
	Typ IV	1300	7450/6400	15/30			
	Typ V	1450	9800/8300	20/30			
Glas/PTFE	Typ I	800	3500/3000	7/10 bis 2/17	aus- reichend	A2	> 25
	Typ II	1050	5000/4400				
	Typ III	1250	6900/5900				
	Typ IV	1500	7300/6500				

Tab. 2.2 Klassifikation und Eigenschaften von den am häufigsten verwendeten beschichteten Gewebemembranen [30]

3

Materialverhalten und -modellierung von beschichteten Geweben

Mechanisches Verhalten Möglichkeiten der rechnerischen Materialmodellierung

Für die statische Analyse von Membrantragwerken ist das mechanische Materialverhalten bei Beanspruchungen unter Last, Zeit und Temperatur von großer Bedeutung. Beschichtete Gewebe sind Verbundwerkstoffe, das heißt das Materialverhalten der Einzelkomponenten (Gewebefasern und Beschichtung) ist ein ganz anderes als jenes des Verbundwerkstoffes [22]. „Dem orthogonal-anisotropen Tragverhalten des reinen Gewebes mit seinem in Kett- und Schussrichtung unterschiedlichen Kraft-Dehnungs-Verhalten überlagert sich die durch die Beschichtung erzeugte Schubsteifigkeit, die die Winkelverschieblichkeit der Maschen behindert.“ [12] Dieses Kapitel befasst sich mit dem mechanischen Verhalten beschichteter Gewebemembranen und den Möglichkeiten der rechnerischen Materialmodellierung.

3.1 Mechanisches Verhalten

Das Materialverhalten kann nicht mit jenem konventioneller, biegesteifer Werkstoffe verglichen werden. Während für die klassischen Baumaterialien - mit Ausnahme von Holz - im Gebrauchslastbereich eine linear elastische und isotrope Spannungs-Dehnungsbeziehung angenommen wird, kann diese Annahme bei Gewebemembranen aufgrund ihres komplexen Verhaltens nicht getroffen werden. Gewebe wie sie bei Membrankonstruktionen zum Einsatz kommen sind

- nichtlinear: das Spannungs-Dehnungsverhalten kann durch ein lineares Elastizitätsgesetz nur näherungsweise beschrieben werden,
- anisotrop: die mechanischen Materialeigenschaften sind richtungsabhängig,
- nichtelastisch: es besteht eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte [4].

Die Nichtlinearität der Gewebemembranen kann durch einen einachsigen Zugversuch an einem Gewebestreifen belegt werden. Die aufgezeichnete Spannungs-Dehnungskurve (siehe Abb. 3.1) zeigt einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Last und Verformung (materielle Nichtlinearität). Diese Tatsache erschwert die Beschreibung des Materialverhaltens von Geweben über Geraden oder Polynome, wie es bei konventionellen Materialien üblich ist. Bei genauerer Beobachtung der Spannungs-Dehnungskurve fällt auf, dass der Deformationswiderstand des Gewebes mit zunehmender Belastungshöhe ansteigt [4].

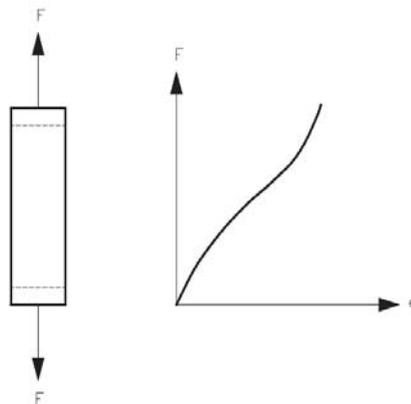


Abb. 3.1 Nichtlineare Spannungs-Dehnungsbeziehung von Gewebematerialien [22]

Das kreuzweise Verweben der Gewebefäden bedingt das orthotrope Verhalten von Gewebemembranen [22]. Um die Anisotropie von Geweben zu zeigen, müssen Streifen unterschiedlicher Orientierung aus dem Material herausgeschnitten und einem einachsigen Zugversuch unterzogen werden. Aus den aufgezeichneten Spannungs-Dehnungskurven lässt sich eine Abhängigkeit des Verlaufs von der Streifenorientierung erkennen (siehe Abb. 3.2) [4].

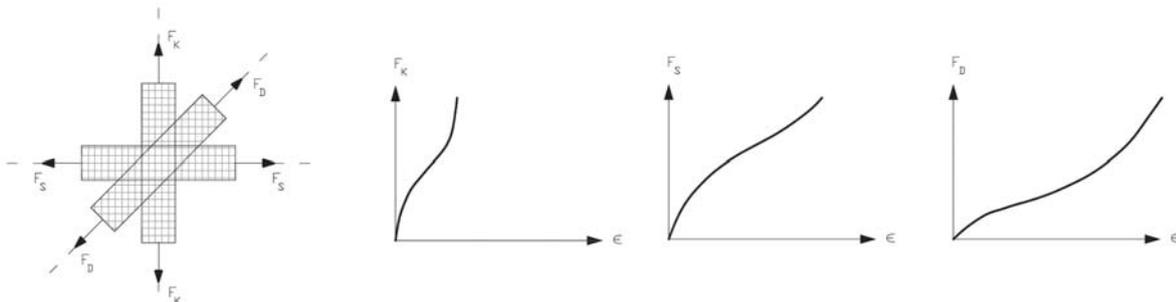


Abb. 3.2 Abhängigkeit des Gewebeverhaltens von der Streifenorientierung [22]

Die Anelastizität kann beim wiederholten Durchführen des Zugversuchs beobachtet werden. Bei den aufgezeichneten Spannungs-Dehnungskurven lässt sich erkennen, dass die Entlastungskurve nicht dem Belastungspfad folgt, sondern sich von diesem unterscheidet (siehe Abb. 3.3). Die Dehnungen nach der Entlastung gehen dabei nicht auf Null zurück. Die Größe dieser bleibenden Dehnungen ist ebenfalls von der Belastungsgeschichte abhängig. Wiederholt man den Belastungsversuch zeigt sich, dass auch die Kurve der Zweitbelastung von jener der Erstbelastung unterschiedlich ist. Mit steigender Anzahl der Belastungszyklen nehmen die Unterschiede in den Be- und Entlastungsästen zwar ab, verschwinden jedoch nicht zur Gänze [4]. Die zunehmende Deckung der Be- und Entlastungskurven deutet darauf hin, dass sich die Spannungs-Dehnungslinien einem linear-elastischen Verlauf annähern (siehe Abb. 3.4) [14]. Bei Durchführung mehrerer Be- und Entlastungszyklen kann auch gezeigt werden, dass der Deformationswiderstand des Gewebes mit zunehmender Belastungsdauer und Belastungshöhe ansteigt [4].

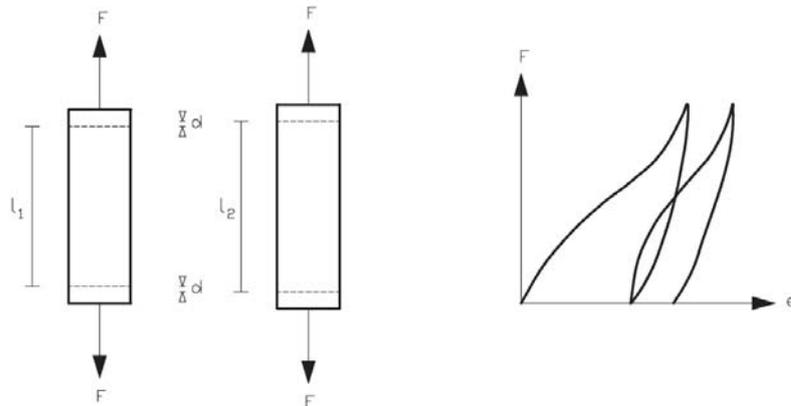


Abb. 3.3 Anelastizität von Gewebematerialien bei wiederholter Belastung [22]

Der Herstellungs- und Beschichtungsprozess von Gewebemembranen (siehe Kapitel 2.3) bedingt die charakteristische Welligkeit der Gewebefäden. Die Krümmung der Fäden ist dabei von der Webart, dem Web- und Beschichtungsverfahren abhängig. Im spannungslosen Zustand ist der Kettfaden gegenüber dem Schussfaden geringer gekrümmt, da dieser während des Herstellungsprozesses unter Spannung gehalten wird. Eine Folge der unterschiedlichen Fadengeometrie ist die wesentlich geringere Dehnsteifigkeit des Gewebes in Schussrichtung [22]. Während die schwach gekrümmten Kettfäden ihre Endsteifigkeit rasch und ohne große Vordehnungen erreichen können, müssen die Schussfäden ihre stärkere Fadenkrümmung zuerst durch Dehnung verringern. Erst nach Erreichen einer gestreckteren Fadengeometrie besitzen auch die Schussfäden ihre Endsteifigkeit (siehe Abb. 4.1) [8]. Damit lässt sich erklären, warum sich bei gleicher Lasteinwirkung in den Gewebehauptrichtungen die Fäden in Schussrichtung stärker dehnen als jene in Kettrichtung [25].

Durch die Verkreuzung der Kett- und Schussfäden kommt es an den Kreuzungspunkten zu Interaktionen [22]. Diese Interaktion der Gewebefäden trägt wesentlich zum ausgeprägten nichtlinearen Kraft-Dehnungsverhalten von Geweben bei [28]. Wird in der Schussrichtung eine Zugbelastung aufgebracht, strecken sich die Schussfäden und das Gewebe verlängert sich in Schussrichtung. Gleichzeitig wird durch die Dehnung der Schussfäden die Krümmung der Kettfäden verstärkt und das Gewebe verkürzt sich in der Kettrichtung. Wird gleichzeitig auch in der Kettrichtung eine Zugbeanspruchung aufgebracht, dann stellt sich dem Strecken der Schussfäden ein Widerstand entgegen. Die Lasthöhe aber auch das Lastverhältnis zwischen Kette und Schuss haben wesentlichen Einfluss auf die Veränderung der Fadenkrümmung. Die Abhängigkeit der Dehnung in Querrichtung von jener in Längsrichtung ist bei Geweben besonders ausgeprägt und wird über die Querdehnzahl μ beschrieben. Die Querdehnzahl ist im Vergleich zu herkömmlichen Werkstoffen bei Geweben nicht konstant, sondern von dem aufbrachten Kraftniveau abhängig. Für die statische Analyse ist von wesentlicher Bedeutung wie die Kräfte und Dehnungen in einer Richtung von einer Krafteinwirkung in der anderen beeinflusst werden. Dieser Einfluss der Querdehnung (Interaktion der Gewebefäden) wird meist in zweiachsigen Zugversuchen ermittelt [22].

Aus den Resultaten biaxialer Zugversuche können weitere Erkenntnisse bezüglich des Materialverhaltens von Gewebemembranen gewonnen werden. Wie die Kraft-Dehnungs-Kurven in

Abb. 3.4 zeigen, nimmt der Elastizitätsmodul - sowohl in der Kett- als auch in der Schussrichtung - mit der Anzahl an Lastzyklen zu [25]. Eine umfangreiche Versuchsreihe an Biax-Tests von Reinhardt [20] konnte jedoch zeigen, dass der Elastizitätsmodul nach drei Belastungszyklen - spätestens aber nach zehn Belastungszyklen - nicht mehr bedeutend zunimmt. Die Kraft-Dehnungs-Kurven von biaxialen Zugversuchen (siehe Abb. 4.4 rechts) zeigen zusätzlich, dass der Elastizitätsmodul nicht konstant, sondern stark vom Spannungsverhältnis zwischen Kette und Schuss abhängig ist [7]. Der Vergleich der Kraft-Dehnungs-Kurven von biaxialen (siehe Abb. 3.4) und uniaxialen (siehe Abb. 4.1) Zugversuchen für PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe zeigt, dass die Zugfestigkeit aus Biax-Tests geringer sind als die im einachsigen Zugversuch bestimmten Zugfestigkeiten. Dieser Effekt wird im Bemessungskonzept mit einem Abminderungsfaktor berücksichtigt [14]. Wie zuvor erwähnt sind die Querdehnzahlen vom Kraftverhältnis Kette:Schuss abhängig, zusätzlich zeigt sich im biaxialen Zugversuch, dass wiederholte Belastungen des Gewebes zu einer überwiegenden Abnahme der Querdehnzahlen gegenüber der Erstbelastung führen [18].

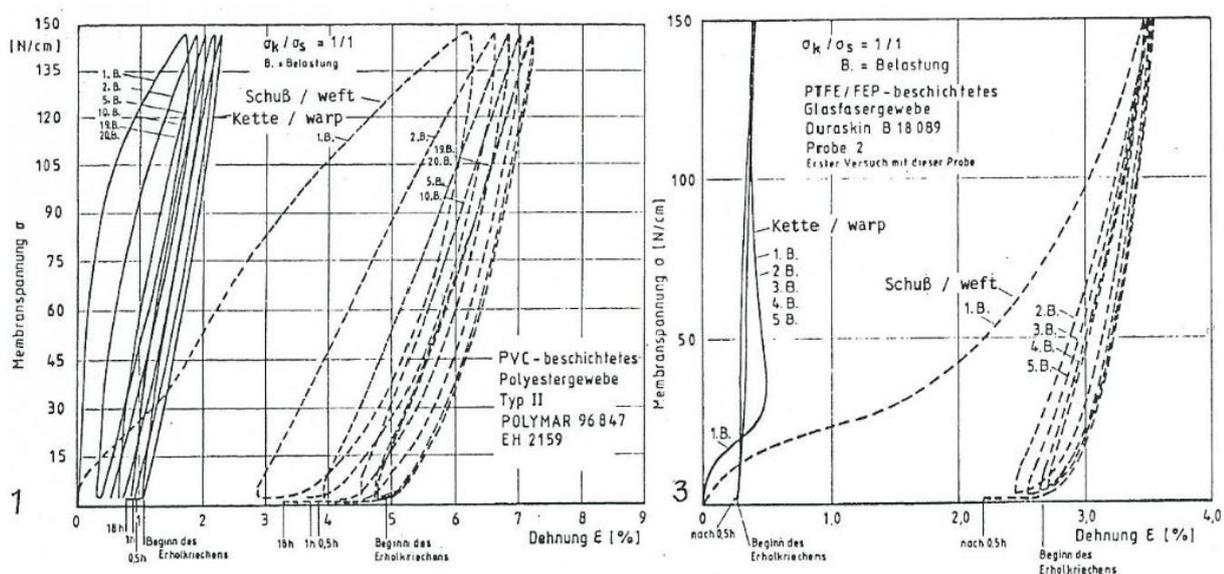


Abb. 3.4 Kraft-Dehnungs-Kurven eines biaxialen Zugversuchs im Gebrauchslastbereich, links: PVC-beschichtetes Polyestergewebe Typ II, rechts: PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe [8]

Die Schubsteifigkeit des Materials - die im Vergleich zur Dehnsteifigkeit von Gewebemembranen relativ gering ist [7] - spielt dann eine wesentliche Rolle, wenn nicht in den Gewebehauptrichtungen verlaufende Beanspruchungen auftreten. Anfangs kann das Gewebe eine Schubdeformation (Winkeländerung zwischen Kett- und Schussfaden) zulassen, wodurch nur geringe Spannungen im Material erzeugt werden (siehe Abb. 3.5 links) [22]. Insbesondere bei nicht fadenparalleler, einachsiger Beanspruchung kommt es zu starken Winkeländerungen zwischen Kett- und Schussfaden [8]. Solange sich Kett- und Schussfaden ungehindert gegeneinander verschieben können, wird der Widerstand gegen Schubverzerrung nur von der Beschichtung aufgebracht und der Anfangsschubmodul ist gering. Die Größe des Anfangsschubmoduls hängt von der Steifigkeit des Beschichtungsmaterials ab und ist bei weichen PVC-Beschichtungen deutlich geringer als bei den steiferen PTFE-Beschichtungen. Mit zunehmender Schubverzerrung geht der Abstand zwischen Kett- und

Schussfäden auf Null und sie beginnen sich gegenseitig zu verklemmen (siehe Abb. 3.5 rechts). Ab diesem Zeitpunkt ist keine weitere Schubdeformation möglich und die Schubspannungen und der Widerstand gegen weitere Schubverzerrung steigen schlagartig an (Jamming Condition) [22]. Der Schubmodul des Gewebes nimmt nun eine nicht zu vernachlässigende Größe an [4].

Die Winkelverdrehung zwischen Kett- und Schussfäden, die vom Gewebe zugelassen werden kann bevor die Jamming Condition erreicht und der Widerstand schlagartig größer wird, bezeichnet man als Grenzwinkel. Der Grenzwinkel ist für den Zuschnitt der Membrankonstruktion von wesentlicher Bedeutung. Die ebenen Zuschnittbahnen können bei der Montage nur bis zum Grenzwinkel verzerrt werden. Je nach Krümmung der Membranfläche bestimmt der Grenzwinkel somit die Bahnenbreite. Die verschiedenen Gewebematerialien besitzen unterschiedliche Grenzwinkel, die von der Bindungsart und der Beschichtung abhängig sind. Die höhere Schubsteifigkeit des PTFE-beschichteten Glasfasergewebes bedingt einen relativ geringen Grenzwinkel von 8° . PVC-beschichtetes Polyestergerewebe lässt Winkelverdrehungen von bis zu 12° zu [22].

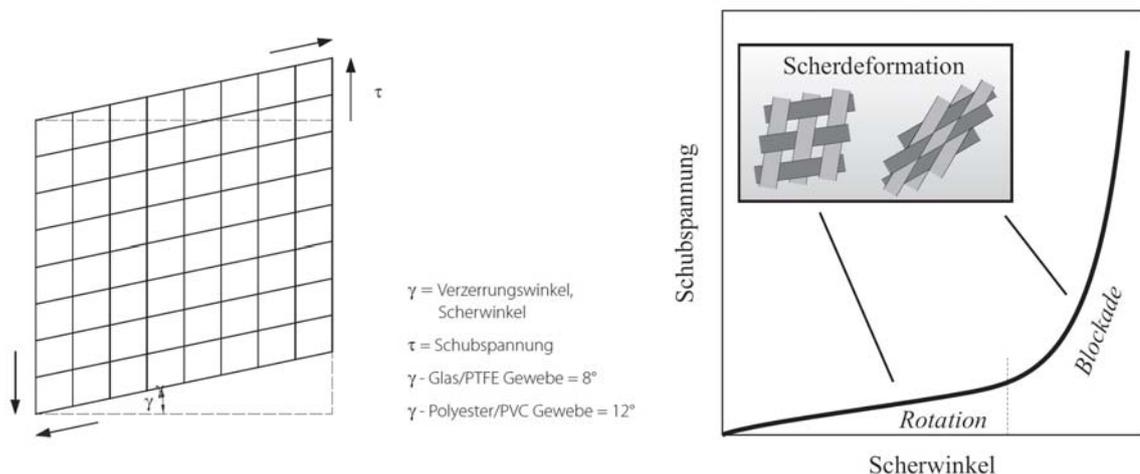


Abb. 3.5 links: Schubverzerrung von Geweben [22], rechts: Jamming Condition [1]

Das Kraft-Dehnungs-Verhalten von Gewebematerialien ist äußerst komplex, da sich die zuvor beschriebenen Effekte überlagern. Charakteristisch für Gewebemembranen ist dabei die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von Höhe, Geschwindigkeit, Dauer und Anzahl der Lasteinwirkungen, aber auch das Spannungsverhältnis zwischen Kett- und Schussrichtung (Änderung der Fadenkrümmung) [22], die eingesetzten Gewebefasern, die verwendete Webstruktur (Welligkeit der Fäden) und die Steifigkeit der Beschichtung haben entscheidenden Einfluss auf das Verhalten [29]. Für das Verhalten von Thermoplasten spielt zusätzlich die Temperatur eine wesentliche Rolle. Ist die Gewebemembran tiefen Temperaturen ausgesetzt, versprödet sie zunehmend, während eine Temperaturerhöhung aufgrund von Veränderungen im Strukturaufbau zu einer Reduktion des Elastizitätsmoduls und der Steifigkeit führt (siehe Abb. 3.6). Darüber hinaus werden die Materialeigenschaften und Festigkeiten der Gewebemembranen von zeitlichen Effekten wie Kriechen (zeitabhängige Dehnungszunahme bei konstanter Spannung) und Relaxation (zeitabhängige Spannungsabnahme bei konstanter Dehnung) beeinflusst [22].

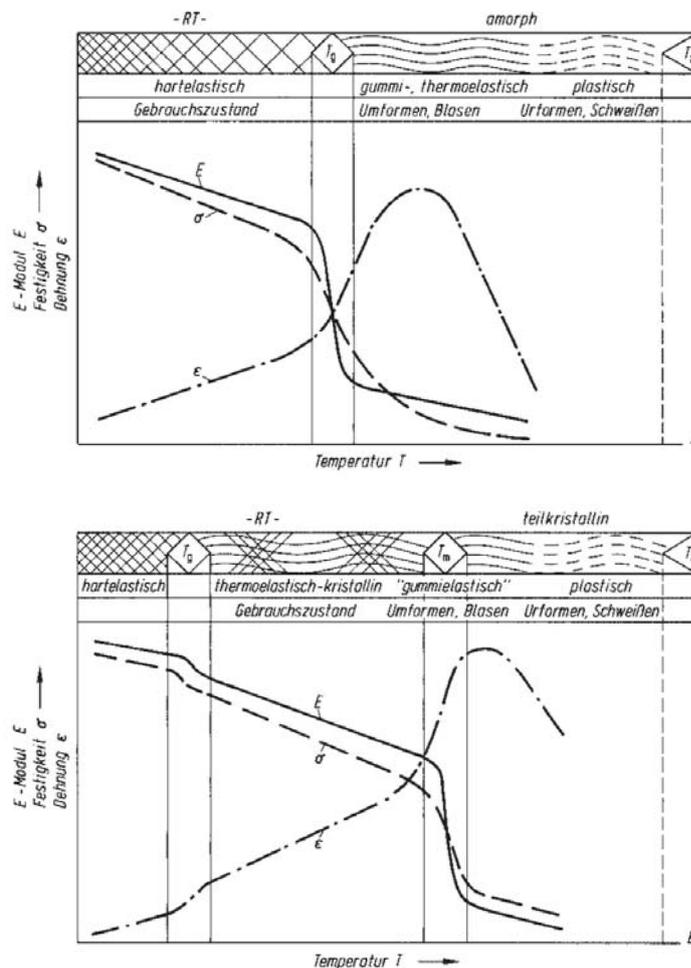


Abb. 3.6 Elastizitätsmodul, Festigkeit und Dehnung in Abhängigkeit von Temperatur und Zustandsbereich für amorphe (oben) und teilkristalline Thermoplaste (unten) [22]

3.2 Möglichkeiten der rechnerischen Materialmodellierung

Beschichtete Gewebe zeigen ein von zahlreichen Faktoren abhängiges, nichtlineares Verhalten, dessen vollständig exakte Abbildung in der praktischen Tragwerksanalyse nicht möglich ist. Zur rechnerischen Modellierung des Materialverhaltens von Gewebemembranen stehen zwei Ansätze zur Verfügung:

- physikalisches (mikrostrukturbasiertes) Modell und
- phänomenologisches Modell [25].

Das Verhalten der Makrostruktur (Gewebe) wird bei physikalischen Modellen (Strukturmodellen) durch die strukturelle Modellierung der Mikrostruktur (Fäden und gegebenenfalls auch die Beschichtung) abgebildet [25]. Die Basis von Strukturmodellen ist eine Einheitszelle, die den Gewebeaufbau aus geometrisch definiert angeordneten Einzelfäden wiedergibt. Die

Fäden werden dabei durch Linien abstrahiert. Für Strukturmodelle ist es notwendig, dass die Eigenschaften des Fadenmaterials und die Fadengeometrie genau bekannt sind. Mit geometrischen Überlegungen wird eine Verknüpfung zwischen Gewebedehnung und Dehnungen der einzelnen Fäden hergestellt. Die Gewebespannungen stellen eine Funktion der Fadenkräfte, der deformierten Fadengeometrie und den Fadenabständen dar [4]. Die Mikrostruktur bleibt bei phänomenologischen Modellen hingegen unberücksichtigt. Der phänomenologische Ansatz bedient sich der Vereinfachung des heterogenen Verbundwerkstoffes zu einem homogenen Kontinuum. Diese Vereinfachung ermöglicht die Abbildung des versuchstechnisch beobachteten Verhaltens des Gewebes mit einer geeigneten mathematischen Beschreibung der Kontinuumseigenschaften. In der Literatur sind drei verschiedene phänomenologische Ansätze (siehe Abb. 3.8) anzufinden:

- linear-elastisch,
- multilinear-elastisch und
- nichtlinear [25].

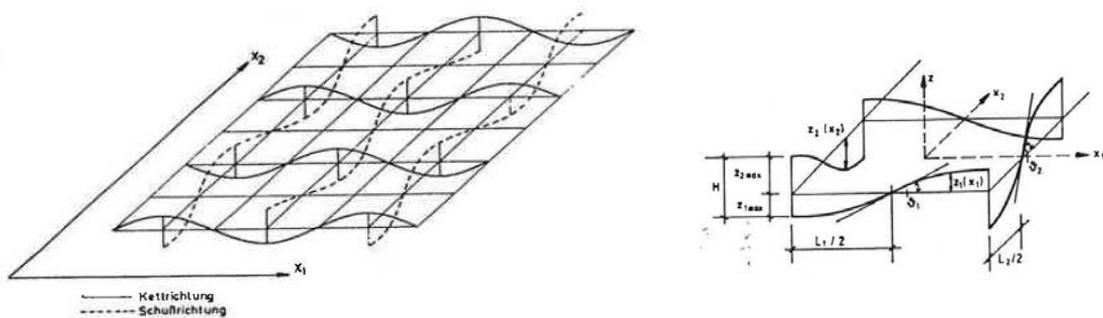


Abb. 3.7 links: Strukturmodell eines Gewebes, rechts: Einheitszelle [4]

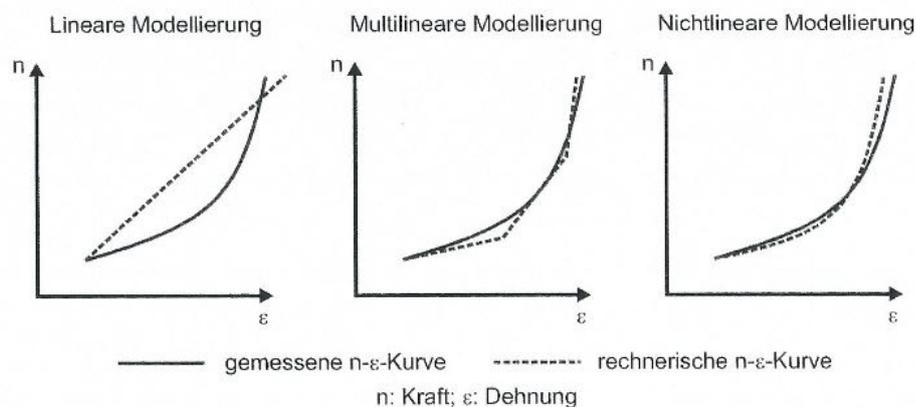


Abb. 3.8 Drei phänomenologische Ansätze zur rechnerischen Modellierung des versuchstechnisch ermittelten Kraft-Dehnungs-Verhaltens [25]

Die lineare Modellierung stellt eine Vereinfachung dar, da die Abweichungen der rechnerischen elastischen Gerade von der tatsächlichen Kraft-Dehnungs-Kurve über große Bereiche beträchtlich sind. Der Grad der Genauigkeit kann durch eine multilineare Modellierung abhängig von der Anzahl der elastischen Geraden und der Schrittweite zwischen ihnen gesteigert werden. Wie in Abb. 3.8 zu erkennen ist, lässt sich mit einer nichtlinearen Modellierung die höchste Genauigkeit erreichen. Mit den zuvor erwähnten Modellen können weitere Einflussfaktoren wie Anisotropie, Kraftverhältnis, Belastungsanzahl und Temperatur noch nicht erfasst werden. Es ist notwendig diese Einflussfaktoren durch weitere Annahmen zu berücksichtigen [25].

Aufgrund der hohen Rechenintensität von Strukturmodellen und des heutigen Entwicklungsstandes von Rechnersystemen finden sie kaum Anwendung in der praktischen Tragwerksplanung [1]. Jedoch können Strukturmodelle Hypothesen liefern, die möglicherweise bei phänomenologischen Modellen Anwendung finden [4]. Von den phänomenologischen Ansätzen wird in der derzeitigen Membranbaupraxis das vereinfachende linear-elastische Materialmodell am häufigsten verwendet. Der multilineare und der nichtlineare Modellierungsansatz finden derzeit in noch keiner kommerziellen Membranbau-Software Anwendung, da sich diese noch in Entwicklung befinden [25].

Die Beschreibung eines linear-elastischen orthotropen (orthogonal anisotrop) Materialverhaltens zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen in einem Membranflächenelement (siehe Abb. 3.9) ist über folgende Gleichungen möglich [18]:

$$\varepsilon_K = \frac{n_K}{E_K t} - \mu_{KS} \frac{n_S}{E_S t} \quad (\text{Glg. 3.1})$$

$$\varepsilon_S = \frac{n_S}{E_S t} - \mu_{SK} \frac{n_K}{E_K t} \quad (\text{Glg. 3.2})$$

$$\gamma_{SK} = \frac{n_{SK}}{Gt} \quad (\text{Glg. 3.3})$$

bzw. in Matrixschreibweise

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_K \\ \varepsilon_S \\ \gamma_{SK} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_K t} & -\frac{\mu_{KS}}{E_S t} & 0 \\ -\frac{\mu_{SK}}{E_K t} & \frac{1}{E_S t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Gt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_K \\ n_S \\ n_{SK} \end{bmatrix} \quad (\text{Glg. 3.4})$$

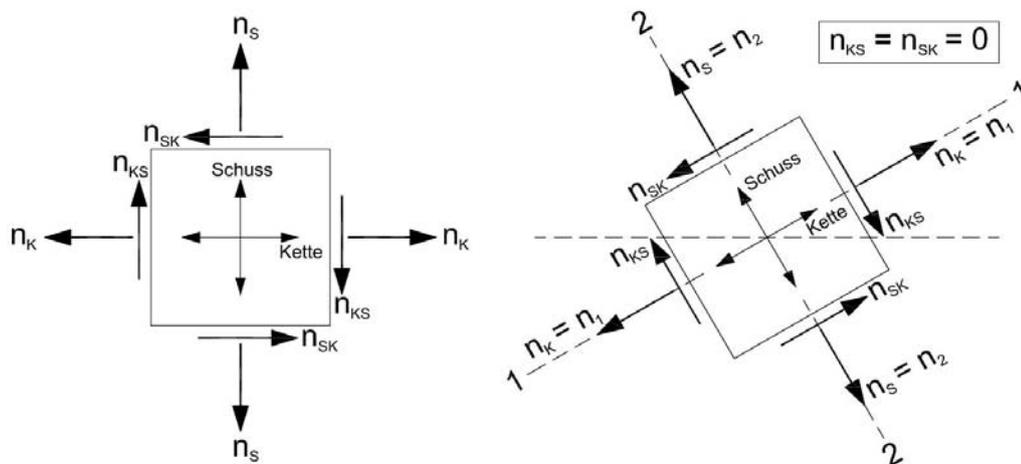


Abb. 3.9 Membrankräfte bzw. -spannungen an einem repräsentativen Flächenelement, links: allgemeine Richtungen, rechts: Hauptspannungsrichtungen

Dabei bedeuten:

- ϵ_K Dehnung in Kettrichtung
- ϵ_S Dehnung in Schussrichtung
- γ_{SK} Winkelverdrehung zwischen Kett- und Schussfaden
- $E_K \cdot t$ Dehnsteifigkeit in Kettrichtung [kN/m]
- $E_S \cdot t$ Dehnsteifigkeit in Schussrichtung [kN/m]
- $G \cdot t$ Schubsteifigkeit [kN/m]
- t Membrandicke [m]
- μ_{KS} Querdehnzahl für Dehnungen in Kettrichtung zufolge Zug in Schussrichtung
- μ_{SK} Querdehnzahl für Dehnungen in Schussrichtung zufolge Zug in Kettrichtung
- n_K Membrankraft in Kettrichtung [kN/m]
- n_S Membrankraft in Schussrichtung [kN/m]
- n_{KS} Schubkraft [kN/m]

Im Membranbau ist es üblich aufgrund der fehlenden Angaben über die Querschnittsdicke die Kräfte auf eine Länge zu beziehen und somit in [kN/m] anzugeben. Trotzdem wird in diesem Zusammenhang häufig von Spannungen gesprochen. Die unbekanntenen elastischen Konstanten E_K , E_S , μ_{KS} , μ_{SK} und G der oben beschriebenen Gleichungen können aus versuchstechnisch gemessenen Kraft- Dehnungs-Beziehungen ermittelt werden. Für die Berechnung mit einer Finite-Elemente-Software wird die Nachgiebigkeitsmatrix üblicherweise als symmetrisch angenommen. Um dieser Annahme gerecht zu werden, muss zusätzlich die Symmetriebedingung

$$\frac{\mu_{KS}}{E_S t} = \frac{\mu_{SK}}{E_K t} \quad (\text{Glg. 3.5})$$

gelten. Die eingeführte Zwangsbedingung hat jedoch eine schlechtere Abbildung der realen Kraft-Dehnungs-Kurven zur Folge [25]. Drei der vier unbekanntenen elastischen Konstanten für die Dehnsteifigkeit sind unabhängig, während die vierte Konstante für die Dehnsteifigkeit über

(Glg. 3.5) von den anderen Konstanten abhängig ist [18]. Dadurch kann die Anzahl unbekannter elastischer Konstanten für die Dehnsteifigkeit auf drei reduziert werden [25]. Der vierte unbekannte Materialparameter ist der Schubmodul. Es besteht keine Verknüpfung zwischen Schub- und Dehnsteifigkeiten, d.h. fadenparallele Normalspannungen führen nur zu fadenparallelen Dehnungen und fadenparallele Schubspannungen bewirken nur Gleitungen [18].

4 Materialkennwerte

Methoden zur versuchstechnischen Bestimmung von Materialkennwerten Streuung von Materialkennwerten

Rechenprogramme benötigen zur Simulation des Tragverhaltens unterschiedliche Materialparameter als Eingangswerte, die von der Art der Materialmodellierung abhängig sind. Für das linear-elastische Materialmodell werden beispielsweise elastische Konstanten benötigt. Dahingegen stellen die Materialparameter bei nichtlinearer Materialmodellierung beispielsweise Variablen in Polynomen höherer Ordnung dar. Dabei stellt das Finden eines Polynoms, welches den gesamten Kraft-Dehnungs-Verlauf am besten abdeckt, die größte Schwierigkeit dar. Bei Strukturmodellen sind die Eingangswerte z.B. Fadenwelligkeit und Kontaktbeiwerte zwischen sich kreuzenden Fäden. Auch wenn sich die benötigten Parameter je nach verwendeter Modellierung unterscheiden, so steht fest, dass diese Parameter versuchstechnisch ermittelt werden müssen [25].

Von den zuvor beschriebenen Möglichkeiten der Materialmodellierung wird in der derzeitigen Membranbaupraxis das vereinfachende linear-elastische Materialmodell am häufigsten verwendet. Sowohl die Strukturmodelle als auch die anderen phänomenologischen Modellierungsansätze finden derzeit in keiner kommerziellen Membranbau-Software Anwendung [25]. Folgende Argumente rechtfertigen die Annahme eines linear-elastischen Materialmodells:

- Die Durchführung von biaxialen Zugversuchen hat gezeigt, dass der Elastizitätsmodul nach spätestens zehn Belastungszyklen nicht mehr bedeutend zunimmt (siehe Abb. 3.4) [20].
- Die Kraft-Dehnungs-Kurven eines biaxialen Zugversuches nähern sich mit jedem Belastungszyklus einem linearen Verlauf an (siehe Abb. 3.4) [14].
- Die Rechenintensität verringert sich wesentlich gegenüber einer Modellierung mit nicht-linearem Ansatz oder Strukturmodellen [1].

4.1 Methoden zur versuchstechnischen Bestimmung von Materialkennwerten

Zur Bestimmung der Materialkennwerte im linear-elastischen Materialmodell findet man in der Literatur eine Vielzahl an vorhandenen Methoden. Diese Methoden bzw. Versuchsdurchführungen werden in einachsige bzw. zweiachsige, fadenparallele Zugversuche und Schubversuche unterteilt.

4.1.1 Einachsiger, fadenparalleler Zugversuch

Der einachsige Zugversuch ist einer der wichtigsten Standardprüfungen für Membranwerkstoffe und deutlich weniger zeitaufwendig als die Durchführung biaxialer Zugversuche. Bei der Prüfung wird ein Gewebestreifen in eine einachsige Prüfmaschine eingespannt und bis zum Bruch gedehnt. Die Geweberichtung orthogonal zur Lastrichtung ist dabei nicht gespannt. Die Prüfung wird jeweils für die Kett- und Schussrichtung durchgeführt. Die Resultate des einachsigen Zugversuches sind einerseits die erreichbare Zugfestigkeit und die Bruchdehnung von Gewebemembranen für die Kett- und Schussrichtung [14], jedoch können über die aufgezeichneten Kraft-Dehnungsbeziehungen und das linear-elastische Materialmodell auch die Elastizitätsmoduli E_K und E_S bestimmt werden. Die derartig bestimmten Querdehnzahlen genügen jedoch nicht der zuvor in (Glg. 3.5) beschriebenen Symmetriebedingung [18].

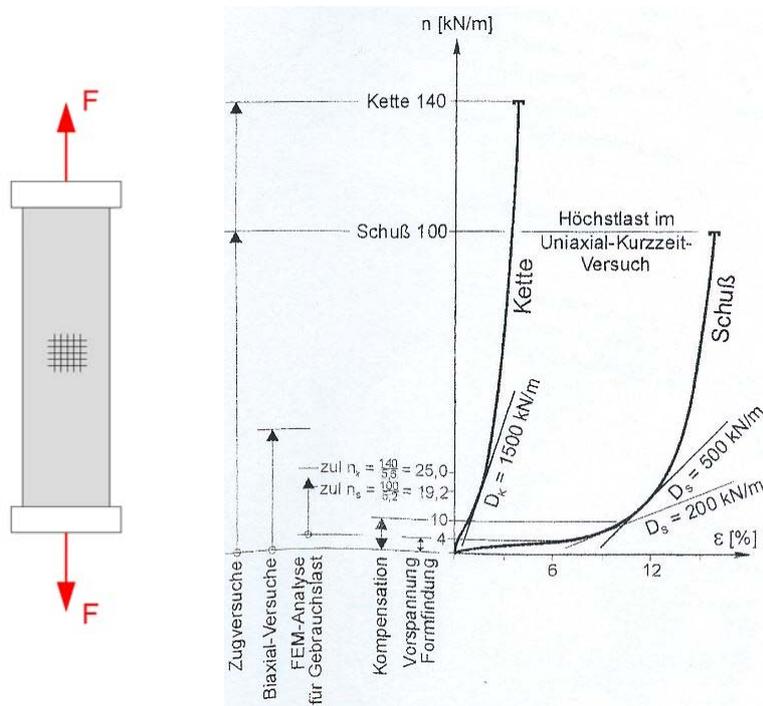


Abb. 4.1 links: Versuchsanordnung, rechts: Kraft-Dehnungsdiagramm eines einachsigen Zugversuchs am Beispiel von PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe [2]

4.1.2 Zweiachsige, fadenparallele Zugversuche

Membrantragwerke zeigen hauptsächlich eine flächige Lastabtragung, weshalb zur Erfassung des Kraft-Dehnungs-Verhaltens primär biaxiale Zugversuche besser geeignet sind. In der Literatur finden sich verschiedene Versuchsabläufe und Auswertungsmethoden für die versuchstechnische Ermittlung von Materialkennwerten [25].

Im Folgenden werden zwei Regelwerke und ein Design Guide vorgestellt, die unterschiedliche Vorgehensweisen zur Bestimmung der fiktiven elastischen Konstanten E_K , E_S , μ_{KS} und μ_{SK} aus biaxialen, fadenparallelen Zugversuchen beschreiben. Die Konstanten werden deshalb als fiktiv bezeichnet, da sie das tatsächliche nichtlineare Materialverhalten vereinfacht linear approximieren und zu ihrer Bestimmung die Kraft-Dehnungs-Beziehungen mehrerer Kraftverhältnisse gleichzeitig berücksichtigt werden [21].

Bei den beiden Regelwerken handelt es sich um die japanische Norm MSAJ/M-02-1995 „Testing Methods for Elastic Constants of Membrane Materials“ [32] und die US-amerikanische Norm ASCE/SEI 55-10 „Tensile Membrane Structures“ [33], wobei der ASCE/SEI 55-10 bei der Versuchsdurchführung auf den MSAJ/M-02-1995 verweist und damit die Auswertungsmethodik vergleichbar ist. Darüber hinaus macht auch der „European Design Guide for Tensile Surface Structures“ der europäischen Vereinigung TensiNet [7] Angaben zur Versuchsdurchführung und Auswertung bei der Bestimmung von Materialkennwerten [25].

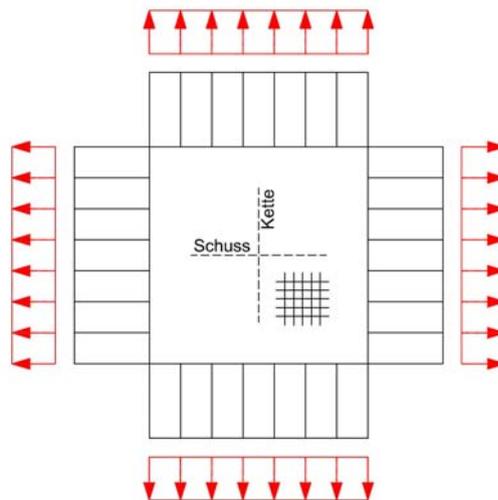


Abb. 4.2 Darstellung der Versuchsanordnung für biaxiale Zugversuche

Da sich der ASCE/SEI bezüglich des Versuchsablaufs auf den MSAJ/M-02-1995 bezieht wird im Folgenden nur die Vorgehensweise der japanischen Norm näher erläutert. Charakteristisch für den Versuchsaufbau nach MSAJ/M-02-1995 ist der genormte kreuzförmige Versuchskörper - die Kett- und Schussrichtung verlaufen jeweils parallel zu den Rändern des Versuchskörpers - auf den sequentiell Zugkräfte mit unterschiedlichen Kraftverhältnissen Kette:Schuss aufgebracht werden. Nacheinander werden folgende Kraftverhältnisse aufgebracht: 3x 1:1, 1x 2:1, 3x 1:1, 1x 1:2, 3x 1:1, 1x 1:0, 3x 1:1 und 1x 0:1 (siehe Abb. 4.3). Diese Kraftverhältnisse werden während der Lastaufbringung konstant gehalten. Die maximale Versuchskraft beträgt 1/4 der aus einem einachsigen Zugversuch bestimmten Reißfestigkeit des Materials [25].

Das Ergebnis des Biax-Tests sind Kraft-Dehnungs-Diagramme mit Be- und Entlastungspfaden für den getesteten Membranwerkstoff unter den verschiedenen Kraftverhältnissen wie in Abb. 4.4 links dargestellt. Aus dem gesamten Messschrieb lassen sich für die fünf Kraftverhältnisse 5 Belastungsäste je Geweberichtung extrahieren (d.h. insgesamt zehn Belastungsäste) wie in Abb. 4.4 rechts dargestellt [28]. Für jeden dieser Belastungsäste wird anschließend ein Satz von fiktiven elastischen Konstanten (Elastizitätsmoduli und Querdehnzahlen) mit den zugehörigen elastischen Geraden bestimmt. Bei der Bestimmung der Neigung der elastischen Geraden soll nicht ein bestimmter Punkt der gemessenen Kraft-Dehnungskurven möglichst gut getroffen werden, sondern möglichst der ganze Kurvenverlauf gut wiedergegeben werden. Um eine möglichst gute Deckung der sich aus den Konstantensätzen ergebenden elastischen Geraden mit den gemessenen Kraft-Dehnungsästen zu erzielen, bedient sich der MSAJ/M-02-1995 einer Ausgleichsrechnung mit der Methode der kleinsten Fehlerquadratsummen. Bei der Berechnung der Fehlerquadratsummen bleiben Kurvenbereiche, die unter einer definierten Untergrenze liegen, unberücksichtigt. Von den fünf Konstantensätzen je Geweberichtung ist derjenige als optimal anzusehen, dessen über alle Kraftverhältnisse gebildete Fehlerquadratsumme minimal ist. Bei der Berechnung dieser Fehlerquadratsumme bleiben die Null-Kraft-Äste (Schussast im Kraftverhältnis 1:0 und der Kettast im Kraftverhältnis 0:1) jedoch unberücksichtigt. Die beschriebene Vorgehensweise mit Berücksichtigung beinahe aller Kraft-Dehnungs-Äste in der Bestimmung eines einzigen optimalen Konstantensatzes stellt praktisch eine Mittelung der Konstanten dar. Im Mittel kann durch diese Maßnahme der Fehler zwischen Rechenmodell und Experiment verringert werden, jedoch kann das zu großen Fehlern bei einzelnen Kraft-Dehnungs-Kurven führen [25].

Dennoch gibt es Unterschiede in den Auswertungsmethoden zwischen ASCE/SEI 55-10 und MSAJ/M-02-1995, die nun kurz erwähnt werden. Während bei der Auswertung nach japanischer Norm nur zwei Null-Kraft-Äste unberücksichtigt bleiben, werden beim ASCE/SEI 55-10 alle vier Null-Kraft-Äste bei der Auswertung vernachlässigt. Darüber hinaus wertet der ASCE/SEI 55-10 die Kraft-Dehnungs-Kurven über den gesamten Versuchskraftbereich (von Null bis zur maximalen Versuchskraft) aus. Durch die unterschiedlichen Auswertungsmethoden können die nach den beiden Regelwerken ermittelten Materialkennwerte nicht direkt verglichen werden [25].

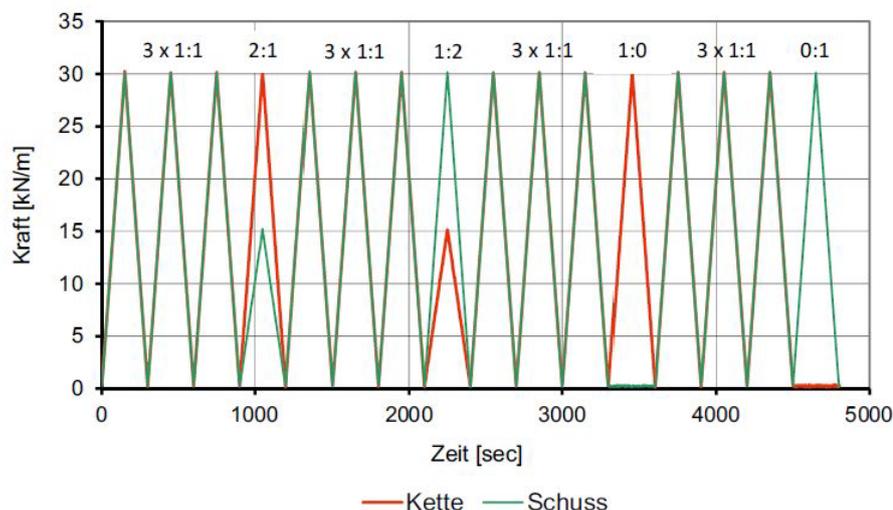


Abb. 4.3 Lastgeschichte im Biax-Versuch nach MSAJ/M-02-1995 [28]

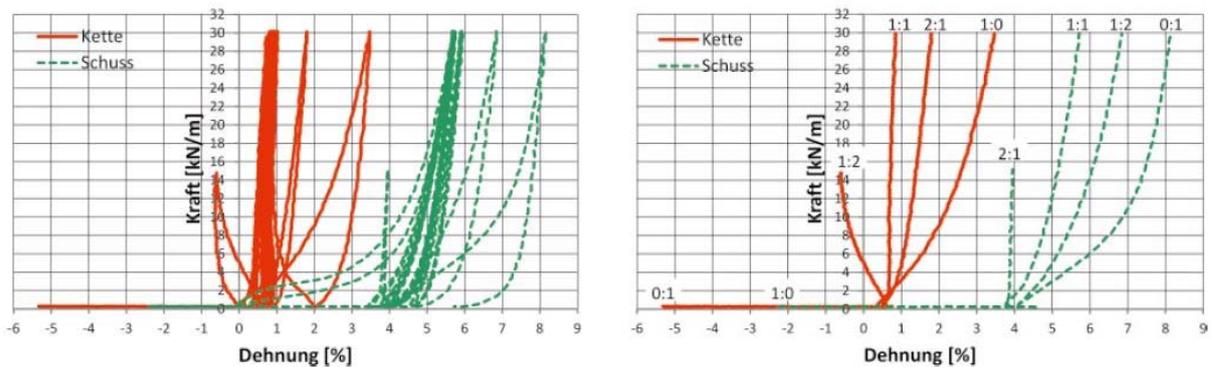


Abb. 4.4 Kraft-Dehnungsdiagramme einer PTFE/Glas-Membrane als Ergebnis des Biax-Versuchs nach MSAJ/M-02-1995, links: gesamter Messschrieb, rechts: zehn aus den Belastungsvorgängen extrahierte Kraft-Dehnungs-Äste [28]

Eine weitere Vorgehensweise zur versuchstechnischen Bestimmung der Materialkennwerte wird im „European Design Guide for Tensile Surface Structures“ von TensiNet beschrieben. Analog zu MSAJ/M-02-1995 und ASCE/SEI 55-10 wird ein biaxialer, fadenparalleler Zugversuch an einem genormten kreuzförmigen Versuchsprobekörper durchgeführt. Die maximale Versuchskraft beträgt 80 % der sogenannten Arbeitsspannung. Als Arbeitsspannung wird die höchste Kraft im Tragwerk bezeichnet, die mit 1/5 der aus einem einachsigen Zugversuch bestimmten Reißfestigkeit des Materials angenommen wird [25].

Zunächst wird eine biaxiale Vorspannung in der Größenordnung von 1/10 bis 1/5 der Arbeitsspannung auf die Kreuzprobe aufgebracht. Während die Kraft in der Schussrichtung konstant auf Vorspannniveau bleibt, wird die Kraft in der Kettrichtung stetig bis zur maximalen Versuchskraft erhöht. Das Kräfteverhältnis Kette:Schuss ändert sich dabei stufenlos. Dieser Versuchsaufbau soll die realen Verhältnisse in antiklastisch gekrümmten Membranstrukturen simulieren. In realen Tragwerken kann es allerdings auch zu Entlastungen oder völligen Verlust der Vorspannkraft in den zur belasteten Fadenrichtung orthogonal liegenden Fäden kommen, während die Vorspannkraft im Versuchsablauf unverändert bleibt. Die maximale Versuchskraft wird in Kettrichtung fünf Mal aufgebracht, bevor der Versuchsaufbau umgedreht und die Kraft in Schussrichtung fünf Mal bis zur maximalen Versuchskraft gesteigert wird, während die Kraft in Kettrichtung konstant auf Vorspannniveau gehalten wird (siehe Abb. 4.5). Das Ergebnis des Versuchs sind Kraft-Zeit-Kurven und zugehörige Dehnungs-Zeit-Kurven. Für jeden der zehn Belastungsvorgänge erhält man je eine Dehnungs-Zeit-Kurve für jede Geweberichtung (insgesamt 20 Dehnungs-Zeit-Kurven) [25].

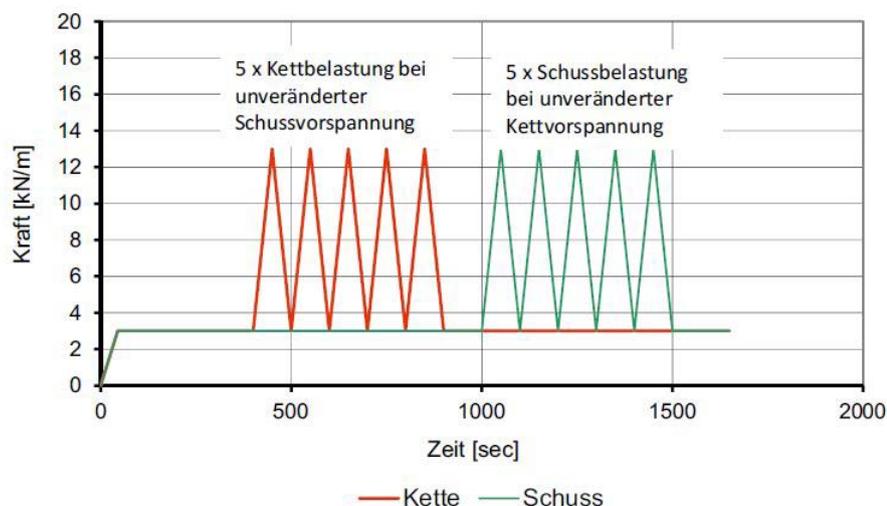


Abb. 4.5 Lastgeschichte im Biax-Versuch nach TensiNet Design Guide [28]

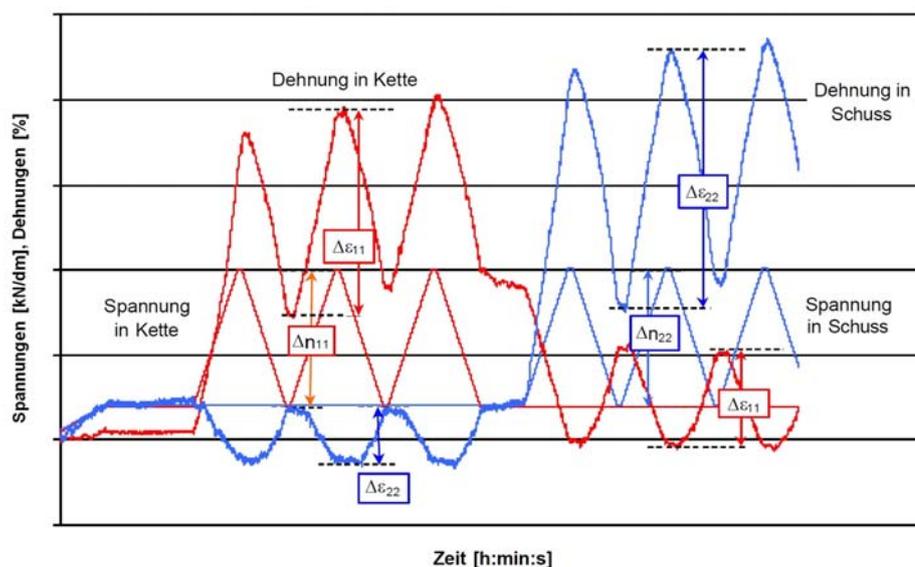


Abb. 4.6 Kraft-Zeit-Kurven und Dehnungs-Zeit-Kurven als Ergebnis des Biax-Versuchs nach TensiNet Design Guide [5]

Aus den Ergebnisdiagrammen (Kraft-Zeit-Kurven und Dehnungs-Zeit-Kurven) können für ein beliebiges Kraftintervall $\Delta n_{K,i}$ z.B. in Kettrichtung das Kraftintervall in Schussrichtung $\Delta n_{S,i}$ und die zugehörigen Dehnungen in Kette $\Delta \epsilon_{K,i}$ und Schuss $\Delta \epsilon_{S,i}$ abgelesen werden (siehe Abb. 4.6). Für die Bestimmung der Materialkennwerte macht man es sich zunutze, dass für das Kraftintervall in Kettrichtung $\Delta n_{K,i}$ das zugehörige Kraftintervall in Schussrichtung $\Delta n_{S,i}$ zufolge der gewählten Lastgeschichte gleich Null ist. Zusammen mit den zugehörigen Dehnungen in Kett- und Schussrichtung können zwei Gleichungen nach (Glg. 3.1) und (Glg. 3.2) aufgestellt werden. Es bedarf jedoch einer weiteren Gleichung zur Bestimmung der drei unbekanntelastischen Konstanten (reduzierte Anzahl an Unbekanntenzufolge der Symmetriebedingung (Glg. 3.5)) in den beiden Gleichungen. Mit einem Kraftverhältnis in Schuss-

richtung können analog zur Kettrichtung zwei weitere Bestimmungsgleichungen aufgestellt werden. Als Resultat erhält man ein Gleichungssystem mit vier Gleichungen und drei unbekanntem elastischen Konstanten E_K , E_S und μ_{KS} . Aufgrund der überzähligen Bestimmungsgleichung besitzt das Gleichungssystem keine eindeutige Lösung. Der Design Guide schlägt für diese Situation keine Vorgehensweise vor. Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten die Situation zu lösen: Die erste Möglichkeit besteht in der Vernachlässigung einer der vier Gleichungen bei der Bestimmung der Konstanten. Es ist zu beachten, dass es bei dieser Vorgehensweise zum Verlust der in der vernachlässigten Gleichung enthaltenen Information kommt. Für den Tragwerksplaner wirft sich damit die Frage auf, welche der Bestimmungsgleichungen unberücksichtigt bleiben soll. Als zweite Möglichkeit bietet sich die Bestimmung mehrerer Sätze von Konstanten mit anschließender Mittelung der Ergebniswerte an. Es lässt sich keine Aussage darüber machen mit welcher Vorgehensweise die Kräfte und Verformungen im realen Tragwerk besser vorhergesagt werden können. Unabhängig davon, welche der zuvor beschriebenen Möglichkeiten zur Anwendung kommt, wird der Vorgang für die weiteren vier Belastungsvorgänge wiederholt. Daraus resultieren fünf Sätze von Konstanten für die Belastungsvorgänge. Des weiteren ist es möglich für jeden beliebigen Kraftbereich zwischen Vorspannniveau und maximaler Versuchskraft weitere elastische Konstanten zu bestimmen [25].

4.1.3 Schubversuche

Zur versuchstechnischen Bestimmung des Schubmoduls G finden sich in der Literatur verschiedene Methoden: nicht-fadenparallele, biaxiale Zugversuche, uniaxiale Zugversuche und ‚Picture Frame‘-Test.

Bei einem nicht-fadenparallelen, biaxialen Zugversuch zur Bestimmung des Schubmoduls wird eine Versuchsprobe so aus dem Material herausgeschnitten, dass die Gewebefäden 45° verdreht zu den Probenrändern sind (siehe Abb. 4.7). An dieses Probestück werden allseitig Gewebestreifen angeschweißt, deren Fadenorientierungen parallel zur Belastungsrichtung sind. Die Belastungen werden parallel zu den Rändern aufgebracht. Die Probe wird zu Beginn mit einem Kraftverhältnis von 1:1 vorgespannt. In den Geweberichtungen (Kett- und Schussrichtung) können nur Schubspannungen auftreten, wenn das aufgebrachte Kraftverhältnis ungleich 1:1 ist (siehe Abb. 4.8). Darum wird in einem nächsten Schritt die Kraft in einer Maschinenrichtung erhöht, während die Kraft in der anderen Richtung reduziert wird. Die Spannungsdifferenz wird anschließend linear gesteigert. Diese spezielle Lastgeschichte (siehe Abb. 4.9) bewirkt einen linearen Anstieg der Schubspannungen (siehe Abb. 4.10) [7], wodurch die Schubspannungen und -dehnungen von den Spannungen bzw. Dehnungen in den Geweberichtungen entkoppelt werden. Die Auswertung und Berechnung des Schubmoduls wird dadurch wesentlich vereinfacht. Mit den gemessenen Dehnungen in Kettrichtung, in Schussrichtung und der Winkelhalbierenden zwischen Kette und Schuss können anschließend die Schubspannungen und der Schubmodul bestimmt werden [5].

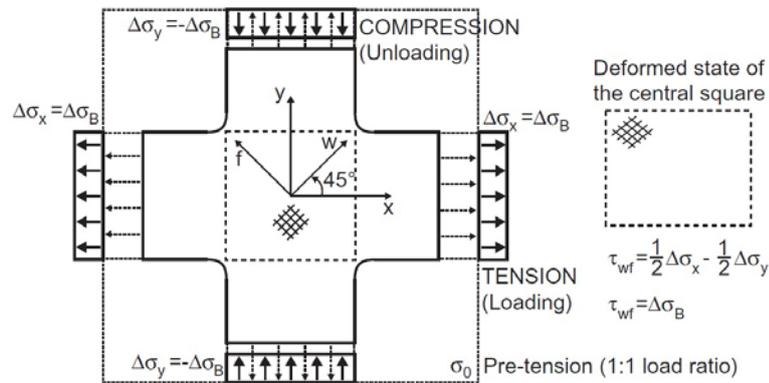


Abb. 4.7 Versuchsaufbau eines nicht-fadenparallelen, biaxialen Zugversuchs [7]

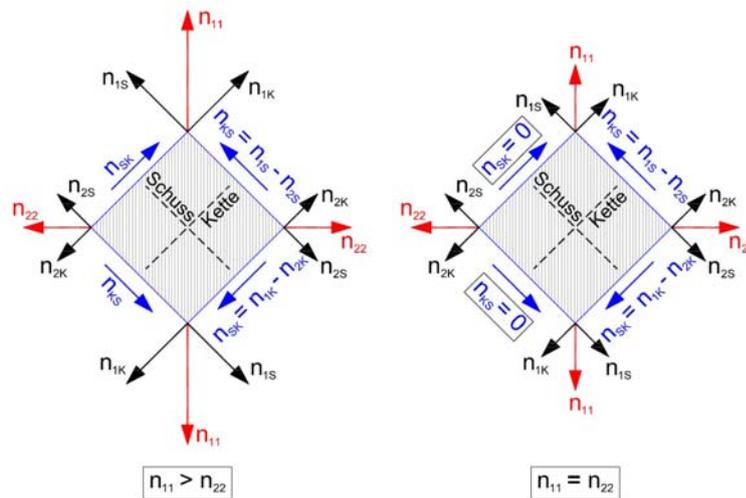


Abb. 4.8 Spannungen an einem Flächenelement bei nicht-fadenparalleler Zugbelastung, links: bei Kraftverhältnis 1:1, rechts: bei Kraftverhältnis ungleich 1:1

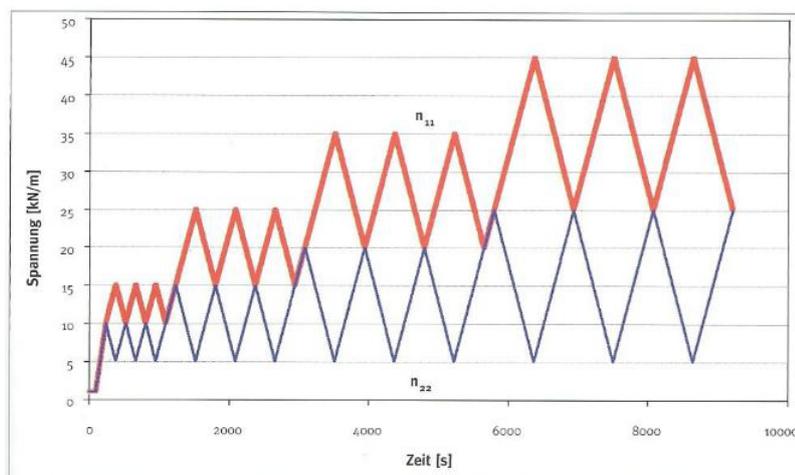


Abb. 4.9 Lastgeschichte für biaxialen Schubversuch [7]

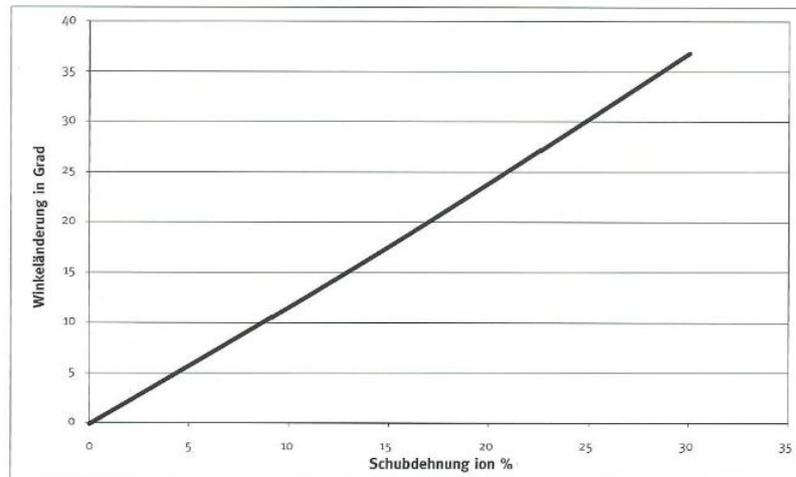


Abb. 4.10 Zusammenhang zwischen Schubdehnung und Winkeländerung [7]

Eine Weiterentwicklung des zuvor beschriebenen biaxialen Schubversuchs mit um 45° verdrehten Geweberichtungen ist eine als ‚Shear ramp‘ bezeichnete Versuchsanordnung nach Galliot [10]. Die Besonderheit dieser Versuchsanordnung ist, dass mit nur einem fadenparallelen Test an einer Versuchsprobe sowohl die Dehn- als auch die Schubsteifigkeiten bestimmt werden können. Ermöglicht wird das durch eine spezielle Art der Lastaufbringung und eine modifizierte biaxiale Prüfmaschine (siehe Abb. 4.11). Im Gegensatz zum nichtfadenparallelen Zugversuch sind die Arme der Kreuzprobe geschlitzt. Mit Hilfe der modifizierten biaxialen Zugmaschine können diese Streifen der Probenarme - nach Aufbringung einer Grundlast σ_0 (Vorspannung) - individuell belastet bzw. entlastet und eine lineare Spannungsverteilung über die Probenarme erzeugt werden (siehe Abb. 4.12). Wie zuvor beschrieben treten bei fadenparallelen, biaxialen Zugversuchen, wie sie zur Bestimmung der Dehnsteifigkeiten verwendet werden (siehe Kapitel 4.1.2), ausschließlich fadenparallele Zugspannungen auf. Durch die lineare Spannungsverteilung über die Probenarme ist es möglich gleichzeitig Dehn- und Schubspannungen in der Versuchsprobe zu erzeugen [10].

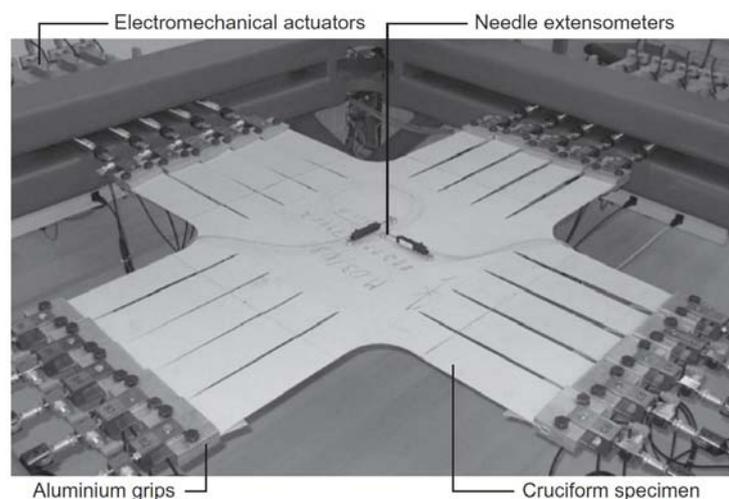


Abb. 4.11 Biaxiale Prüfmaschine zur Durchführung des ‚Shear ramp‘-Tests [10]

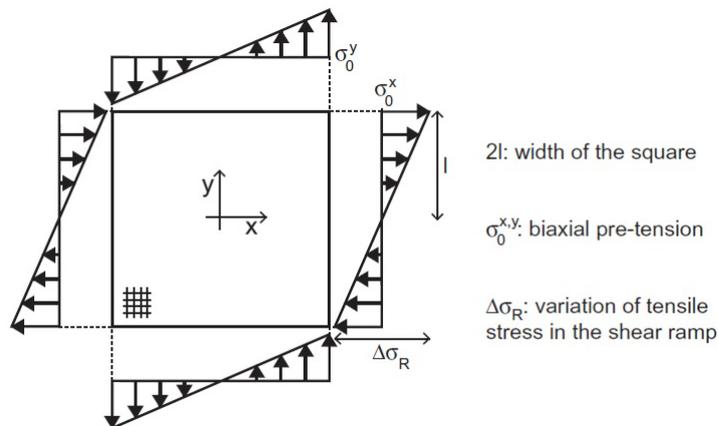


Abb. 4.12 Spezielle Lastaufbringung beim ‚Shear ramp‘-Test [10]

Biaxiale Schubversuche sind sehr zeitaufwendig und kommen am sinnvollsten bei der Erstzulassung eines Produkts zur Anwendung [7]. Vereinfacht kann der Schubmodul auch mit einem einachsigen Ersatzversuch bestimmt werden. Dabei wird ein Gewebestreifen in eine einachsige Prüfmaschine eingespannt. Der Streifen wird an den beiden Enden durch die Spannblöcke der Prüfmaschine in horizontaler Richtung gehalten. In der Mitte des Gewebestreifens sitzt eine horizontal bewegliche Klemme, mit der der Gewebestreifen horizontal gezogen werden kann (siehe Abb. 4.13). Für die Auswertung werden die Verschiebung und die Auslenkkraft gemessen. Der Auslenkwinkel zur vertikalen Achse wird anschließend aus der Verschiebung berechnet und dient als Grundlage zur Bestimmung der Schubkraft im Gewebestreifen bzw. des Schubmoduls des Materials [5].

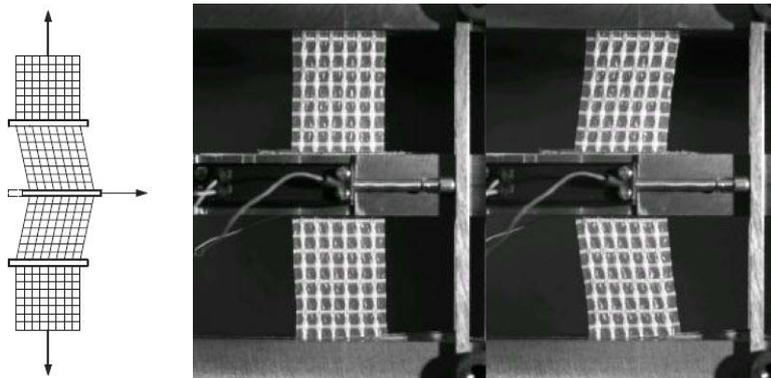


Abb. 4.13 links: Schematischer Versuchsaufbau [22], mitte und rechts: Versuchsaufbau im unbelasteten und belasteten Zustand [5]

Bei einem Bias-Test wird ein Gewebestreifen in eine einachsige Zugmaschine eingespannt, wobei die Gewebefäden um 45° zur Lastrichtung verdreht sind. Die Schubverzerrung kann direkt über den Weg der Prüfmaschinen bestimmt werden. Die Schubkraft im Gewebe kann anschließend über die gemessene Kraft und die Prüfkörpergeometrie ermittelt werden. Nachteil dieser Methode ist, dass die Dehnungen über die Probe nicht homogen sind. Über die Probe verteilt ergeben sich 3 Bereiche mit unterschiedlichen Dehnungen. Während der

Schubwinkel im Bereich 3 doppelt so groß wie in Bereich 2 ist, bleibt Bereich 1 unverformt (siehe Abb. 4.14) [10].

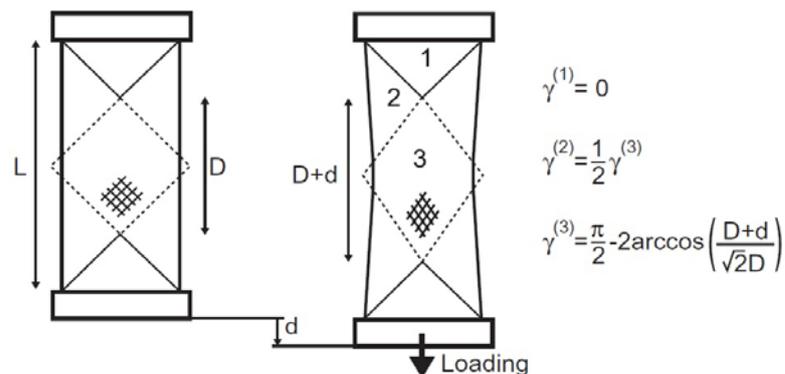


Abb. 4.14 Versuchsdurchführung des Bias-Tests [10]

Bei einem ‚Picture Frame‘-Test ist die Probe in einen quadratischen Rahmen eingeklemmt (siehe Abb. 4.15). Die Rahmenteile sind an den Ecken gelenkig miteinander verbunden, sodass sich der Rahmen rautenförmig verformt, wenn er gedrückt oder gezogen wird. Die Dehnungen sind hier über die gesamte Probe homogen. Die Schubverzerrung und die Schubkraft können direkt über die Rahmengeometrie und den Weg der Prüfmaschine bestimmt werden [10].

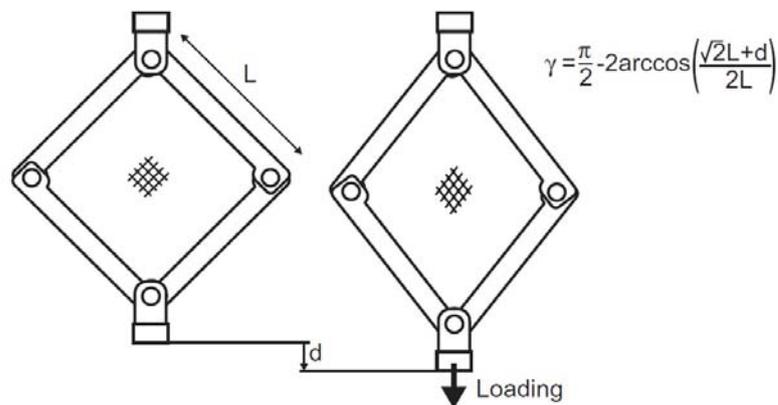


Abb. 4.15 Versuchsdurchführung des ‚Picture Frame‘-Tests [10]

Die zuvor beschriebenen Versuchsdurchführungen und Auswertungsmethoden zur Bestimmung der Materialkennwerte unterscheiden sich deutlich voneinander, was dazu führt, dass die nach den verschiedenen Methoden bestimmten fiktiven, elastischen Konstanten nicht vergleichbar sind.

4.2 Streuung von Materialkennwerten

Es gibt eine Vielzahl an Faktoren, die zu einer Streuung der Materialkennwerte (Dehn- und Schubsteifigkeiten) beitragen:

- multifaktorielle Abhängigkeit des Materialverhaltens (siehe Kapitel 3.1) von Gewebeaufbau, Steifigkeit der Beschichtung, Gewebeerorientierung, Art und Dauer der Belastung, und Fadeninteraktion
- Hersteller und Produktion
- Verbindungstechnik
- Temperatur und zeitliche Effekte (siehe Kapitel 3.1)
- Versuchsdurchführung und Auswertungsmethoden (siehe Kapitel 4.1)

Die multifaktorielle Abhängigkeit des Materialverhaltens und die Einflüsse von Temperatur und zeitlichen Effekten wurden bereits im Kapitel 3.1 im Detail erläutert. Darüber hinaus können die Materialeigenschaften für ein und denselben Gewebetyp von Hersteller zu Hersteller verschieden sein. Aber auch für das Membranprodukt eines bestimmten Herstellers können kleine Veränderungen in der Prozesskette die Eigenschaften des Endprodukts wesentlich verändern (Produktchargen). Des Weiteren werden die Steifigkeitseigenschaften der Membran lokal durch Schweißnähte oder anderen Verbindungsarten verändert, da sich die Materialstärke in diesem Bereich verdoppelt. Zudem trägt die Vielzahl an Versuchsdurchführungen und Auswertungsmethoden zur Streuung der Materialkennwerte beschichteter Membranen bei.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Streuung der Steifigkeitskennwerte zufolge der vielzähligen Möglichkeiten der Versuchsdurchführung und Auswertung zur Bestimmung von Materialkennwerten betrachtet.

4.2.1 Steifigkeitskennwertspektren für verschiedene, beschichtete Gewebemembranen

Das Fehlen einheitlicher Regelungen zur versuchstechnischen Bestimmung von Materialkennwerten hat zur Folge, dass es eine Vielzahl an unterschiedlichen Versuchsdurchführungen und Auswertungsmethoden gibt. Je nach Kombination aus Versuchsdurchführung und Auswertungsmethode ergeben sich für ein und dasselbe Membranprodukt unterschiedliche Steifigkeitsmatrizen (siehe Abb. 4.16) [28].

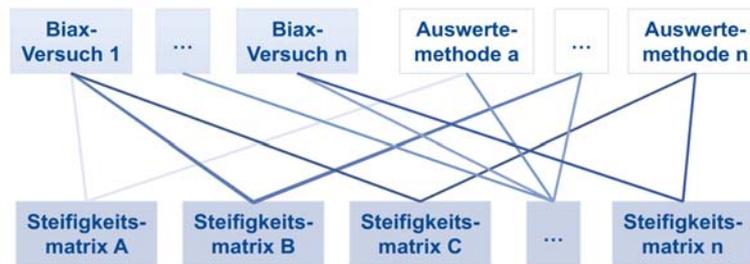


Abb. 4.16 Unterschiedliche Steifigkeitsmatrizen zufolge der nicht einheitlich geregelten Versuchsdurchführungen und -auswertungen [28]

Zur Bestimmung der Größenordnung der Streuungsbreiten von Materialkennwerten beschichteter Gewebemembranen (materialspezifische Steifigkeitskennwertspektren) wurde eine Recherche in der einschlägigen Literatur durchgeführt und Erfahrungs- bzw. Messwerte von Planungsbüros, Materialherstellern und Prüfanstalten gesammelt. In Tab. 4.1 bis Tab. 4.7 sind die recherchierten Steifigkeitskennwerte für die verschiedenen Gewebetypen von PVC-beschichtetem Polyestergewebe (PVC/PES) und PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe (PTFE/Glas) zusammengestellt. Da für PVC/PES Typ I und PTFE/Glas Typ V keine ausreichende Anzahl an Recherchewerten vorhanden ist, wird auf eine Darstellung im Folgenden verzichtet.

Typ	Webart	E_{KETTE} kN/m	E_{SCHUSS} kN/m	ν_{KS}	ν_{SK}	G kN/m	Versuch
I	-	-	-	-	-	7,0	Biax-Test
I	-	-	-	-	-	11,0	Biax-Test
I	L 1/1	425,5	188,8	0,436	0,003	-	Uni-ax-Test
I	L 1/1	382,7	192,6	0,130	0,259	-	Biax-Test
I	L 1/1	406,8	198,5	0,104	0,212	-	Biax-Test
I	L 1/1	785,3	563,9	0,852	0,000	-	Uni-ax-Test
I	L 1/1	800,7	594,5	0,055	0,074	-	Biax-Test
I	L 1/1	715,4	546,1	0,132	0,173	-	Biax-Test
I	L 1/1	764,2	501,6	0,313	-	13,7	Biax-Test
I	L 1/1	660,5	666,7	0,228	-	8,9	Biax-Test
I	L 1/1	657,6	561,3	0,031	0,433	13,8	Biax-Test
I	L 1/1	654,5	673,0	0,213	0,245	9,4	Biax-Test
I	-	-	-	-	-	7	Biax-Test
I	-	-	-	-	-	11	Biax-Test
I	-	-	-	-	-	8	Biax-Test
I	-	-	-	-	-	13	Biax-Test
I	-	571,0	500,0	0,500	0,570	40	Richtwert
I	-	600,0	300,0	-	-	-	Richtwert

Tab. 4.1 Steifigkeitskennwerte, links: PVC/PES Typ I [8], [9], [11] [14], [18], [35], [38]

Typ	Webart	E_{KETTE} kN/m	E_{SCHUSS} kN/m	v_{KS}	v_{SK}	G kN/m	Versuch
II	P 2/2	642,9	219,5	0,093	0,271	-	Biax-Test
II	P 2/2	1196,8	611,4	0,001	0,003	-	Biax-Test
II	P 2/2	1027,3	748,2	0,236	-	13,3	Biax-Test
II	P 2/2	917,5	1001,5	0,235	-	10,9	Biax-Test
II	P 2/2	1042,2	804,1	0,268	-	16,9	Biax-Test
II	P 2/2	922,4	815,7	0,038	0,341	12,4	Biax-Test
II	P 2/2	884,3	1044,3	0,165	0,340	11,9	Biax-Test
II	P 2/2	927,8	889,5	0,050	0,410	13,7	Biax-Test
II	-	1000,0	600,0	-	-	-	Biax-Test
II	-	-	-	-	-	10	Biax-Test
II	-	-	-	-	-	15	Biax-Test
II	-	647,0	575,0	0,500	0,560	45	Richtwert
II	-	1000,0	500,0	-	-	-	Richtwert

Tab. 4.2 Steifigkeitskennwerte für PVC/PES Typ II [9], [11], [18], [35], [38]

Typ	Webart	E_{KETTE} kN/m	E_{SCHUSS} kN/m	v_{KS}	v_{SK}	G kN/m	Versuch
III	-	900,0	560,0	0,150	-	-	Biax-Test
III	-	290,0	380,0	0,750	-	-	Biax-Test
III	-	2000,0	530,0	0,250	-	-	Biax-Test
III	P 2/2	1468,0	1025,8	0,238	-	15,9	Biax-Test
III	P 2/2	1304,3	1124,3	0,022	0,345	13,1	Biax-Test
III	-	1200,0	800,0	-	-	-	Biax-Test
III	-	722,0	650,0	0,500	0,560	50	Richtwert
III	-	1600,0	1000,0	-	-	-	Richtwert

Tab. 4.3 Steifigkeitskennwerte für PVC/PES Typ III [9], [11], [25], [35], [38]

Typ	Webart	E_{KETTE} kN/m	E_{SCHUSS} kN/m	v_{KS}	v_{SK}	G kN/m	Versuch
IV	P 3/3	1714,2	1169,3	0,238	-	16,3	Biax-Test
IV	P 3/3	1488,7	1304,1	0,000	0,376	14,0	Biax-Test
IV	-	1500,0	1000,0	-	-	-	Biax-Test
IV	-	898,0	748,0	0,460	0,550	55	Richtwert
IV	-	2000,0	1250,0	-	-	-	Richtwert

Tab. 4.4 Steifigkeitskennwerte für PVC/PES Typ IV [9], [11], [35], [38]

Typ	Webart	E_{KETTE} kN/m	E_{SCHUSS} kN/m	v_{KS}	v_{SK}	G kN/m	Versuch
II	-	1500,0	1000,0	-	-	-	Biax-Test
II	-	1067,0	800,0	0,500	0,670	70,0	Richtwert
II	-	1080,0	1200,0	0,670	0,600	100,0	Richtwert

Tab. 4.5 Steifigkeitskennwerte für PTFE/Glas Typ II [35]

Typ	Webart	E_{KETTE} kN/m	E_{SCHUSS} kN/m	ν_{KS}	ν_{SK}	G kN/m	Versuch
III	L 1/1	762,7	299,0	0,312	0,797	-	Biax-Test
III	L 1/1	2153,1	1081,7	0,387	0,770	-	Biax-Test
III	-	2433,0	1274,0	0,400	-	37,1	Biax-Test
III	-	-	-	-	-	37,8	Biax-Test
III	-	1800,0	1300,0	-	-	-	Biax-Test
III	-	3607,0	1603,0	0,400	-	57,8	Biax-Test
III	-	-	-	-	-	48,7	Biax-Test
III	-	1250,0	900,0	0,600	0,830	100	Richtwert
III	-	1192,0	894,0	0,440	0,580	100	Richtwert
III	-	1961,0	1217,0	0,450	0,720	80	Richtwert

Tab. 4.6 Steifigkeitskennwerte für PTFE/Glas Typ III [11], [18], [35]

Typ	Webart	E_{KETTE} kN/m	E_{SCHUSS} kN/m	ν_{KS}	ν_{SK}	G kN/m	Versuch
IV	-	2000,0	1500,0	-	-	-	Biax-Test
IV	-	1875,0	1250,0	0,500	0,750	100,0	Richtwert
IV	-	2116,0	1824,0	0,480	0,560	100,0	Richtwert

Tab. 4.7 Steifigkeitskennwerte für PTFE/Glas Typ IV [35]

Tabelle Tab. 4.8 stellte eine Zusammenfassung der zuvor tabellarisch dargestellten Materialkennwerte (Tab. 4.1 bis Tab. 4.7) dar und zeigt den Minimal-, Maximal- und Mittelwert der Dehn- und Schubsteifigkeiten sowie die zugehörige Standardabweichung verschiedener Gewebetypen von PVC/PES und PTFE/Glas. Zusätzlich wird die auf den Mittelwert bezogene Standardabweichung (relative Standardabweichung) angegeben. Diese beträgt bei der Dehnsteifigkeit bis zu ca. 47 % (Ketttrichtung) bzw. ca. 41 % (Schussrichtung) und bei der Schubsteifigkeit bis zu 81 %. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die Schubsteifigkeiten bei PTFE/Glas weniger stark streuen als bei PVC/PES. Bei den Dehnsteifigkeiten sind die Relationen der relativen Standardabweichungen zwischen PVC/PES und PTFE/Glas von Gewebetyp zu Gewebetyp unterschiedlich. Während bei Typ II und III die relative Standardabweichung tendenziell bei PTFE/Glas höher ist, tritt bei Typ IV genau der umgekehrte Fall ein.

PVC-beschichtetes Polyestergewebe			E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	G
Typ I	Maximum	[kN/m]	800,7	673,0	40,0
	Minimum	[kN/m]	382,7	188,8	7,0
	Mittelwert	[kN/m]	618,7	457,3	13,0
	Standardabweichung σ	[kN/m]	146,6	185,1	9,3
	rel. Standardabweichung σ^*	[%]	23,7	40,5	71,6
Typ II	Maximum	[kN/m]	1196,8	1044,3	45,0
	Minimum	[kN/m]	642,9	219,5	10,0
	Mittelwert	[kN/m]	928,0	709,9	16,6
	Standardabweichung σ	[kN/m]	163,7	239,8	10,9
	rel. Standardabweichung σ^*	[%]	17,6	33,8	65,6
Typ III	Maximum	[kN/m]	2000,0	1124,3	50,0
	Minimum	[kN/m]	290,0	380,0	13,1
	Mittelwert	[kN/m]	1185,5	758,8	26,3
	Standardabweichung σ	[kN/m]	538,2	270,4	20,5
	rel. Standardabweichung σ^*	[%]	45,4	35,6	78,0
Typ IV	Maximum	[kN/m]	2000,0	1304,1	55,0
	Minimum	[kN/m]	898,0	748,0	14,0
	Mittelwert	[kN/m]	1520,2	1094,3	28,4
	Standardabweichung σ	[kN/m]	405,1	225,1	23,0
	rel. Standardabweichung σ^*	[%]	26,6	20,6	81,0
PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe			E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	G
Typ II	Maximum	[kN/m]	1500,0	1200,0	100,0
	Minimum	[kN/m]	1067,0	800,0	70,0
	Mittelwert	[kN/m]	1215,7	1000,0	85,0
	Standardabweichung σ	[kN/m]	246,3	200,0	21,2
	rel. Standardabweichung σ^*	[%]	20,3	20,0	25,0
Typ III	Maximum	[kN/m]	3607,0	1603,0	100,0
	Minimum	[kN/m]	762,7	299,0	37,1
	Mittelwert	[kN/m]	1894,9	1071,1	65,9
	Standardabweichung σ	[kN/m]	885,8	388,2	27,4
	rel. Standardabweichung σ^*	[%]	46,7	36,2	41,6
Typ IV	Maximum	[kN/m]	2116,0	1824,0	100,0
	Minimum	[kN/m]	1875,0	1250,0	100,0
	Mittelwert	[kN/m]	1997,0	1524,7	100,0
	Standardabweichung σ	[kN/m]	120,5	287,8	0,0
	rel. Standardabweichung σ^*	[%]	6,0	18,9	0,0

Tab. 4.8 Standardabweichungen der Materialkennwerte, oben: PVC/PES, unten: PTFE/Glas

5 Parameterstudie

Methodik
Numerische Berechnung
Ergebnisse
Ergebnisauswertung

Der Einfluss von Materialkennwerten (Dehn- und Schubsteifigkeiten) auf die Spannungs- und Verformungsberechnung von beschichteten Gewebemembranen soll im folgenden Kapitel mit Hilfe einer Parameterstudie an typischen Formen für Membrantragwerke aufgezeigt und beurteilt werden. Die Studie umfasst neben der Variation materieller Kennwerte auch die Variation geometrischer und lastspezifischer Parameter.

5.1 Methodik

Die Parameterstudie soll primär die Auswirkungen von materialspezifischen Streuungen in den Steifigkeitskennwerten verschiedener Gewebetypen auf die Spannungs- und Verformungsberechnung aufzeigen. Dazu werden 2 unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt:

- Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}), konstanter Schubsteifigkeit und Gewebeorientierung in den Hauptkrümmungsrichtungen und
- Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeiten, konstanten Dehnsteifigkeiten und variabler Gewebeorientierung.

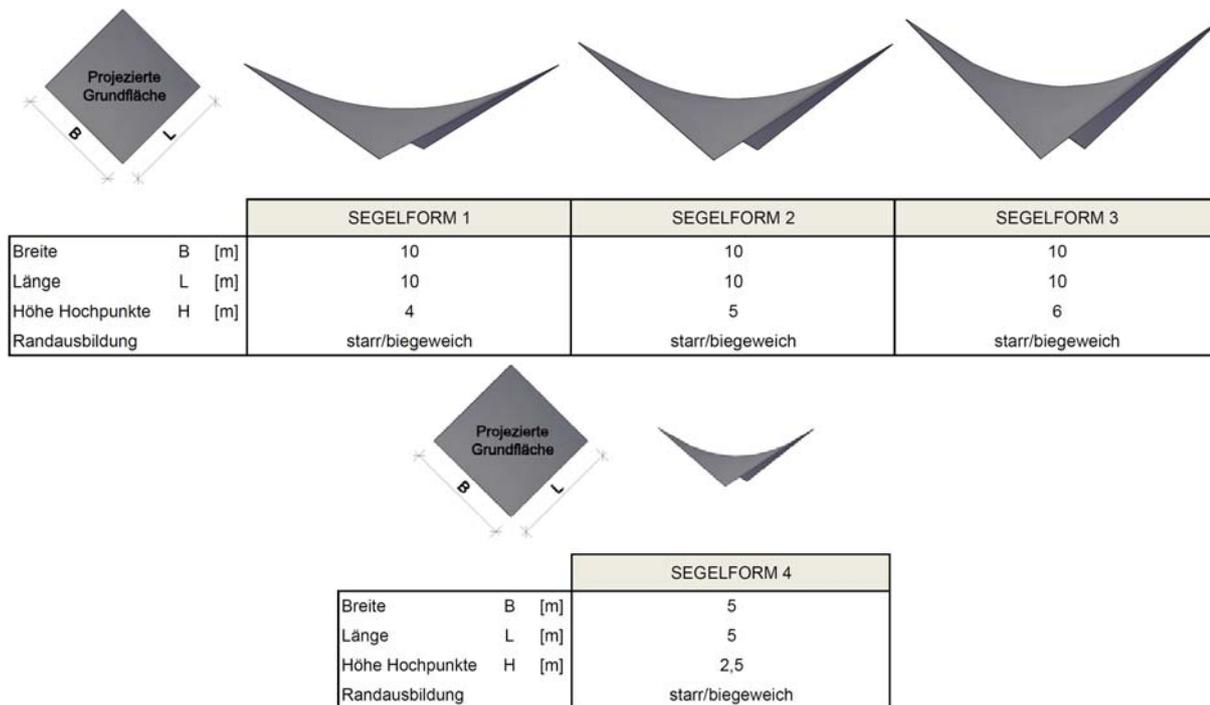
Zudem werden weitere Parameter wie Segelform (Randausbildung, Größe und Krümmung) und Membranvorspannung variiert. Zusätzlich soll überprüft werden, welche Folgen eine Vernachlässigung des Schubmoduls bei den Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bzw. mit Variation der Schubsteifigkeit hat. Abb. 5.2 und Abb. 5.3 geben einen detaillierten Überblick über den Ablauf der Parameterstudie und die Variation der Berechnungsparameter.

Die Variation der jeweiligen Berechnungsparameter wird nachstehend näher erläutert.

Formen

Tab. 5.1 zeigt jene einfachen Grundformen die für die Parameterstudie herangezogen werden. Bei den untersuchten Formen handelt es sich um diverse Vierpunktsegel mit unterschiedlichen Größen, Krümmungen (Höhe der Hochpunkte) und Randausbildungen (starr bzw. biegeweich). Die angegebenen Abmessungen für Breite und Länge beziehen sich auf die projizierte Grundfläche des Segels. Ausgehend vom Basissegel mit einer Grundfläche von 10 x 10 m und einer Hochpunkthöhe von 5 m werden die verschiedenen Krümmungen durch

Absenken bzw. Anheben der Hochpunkte um 20 % der Ursprungshöhe (5 m) realisiert. Unter Anwendung eines Skalierungsfaktors von 0,5 auf die Segelformen 2 entsteht die Segelform 4. Für die Parameterstudie werden alle Segelformen sowohl mit starren als auch mit biegeweichen Rändern untersucht. Der Seilstich beträgt bei den Randseilen der Ausführung mit biegeweichen Rändern etwa 10 %. Durch Anwendung der Kesselformel $F = p \cdot r$ ergibt sich die Vorspannung des Randseiles für die Formfindung.



Tab. 5.1 Segelformen

Bei den Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten wird das Gewebe generell in die Hauptkrümmungsrichtungen orientiert, sodass die Kettrichtung zwischen den Hochpunkten spannt. Von den Hauptkrümmungsrichtungen abweichende Gewebeorientierungen kommen bei den Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit zur Anwendung. Wie in Abb. 5.1 dargestellt wird eine um den Winkel von 0°, 15°, 30° und 45° zur Hauptkrümmungsrichtung verdrehte Kettrichtung betrachtet.

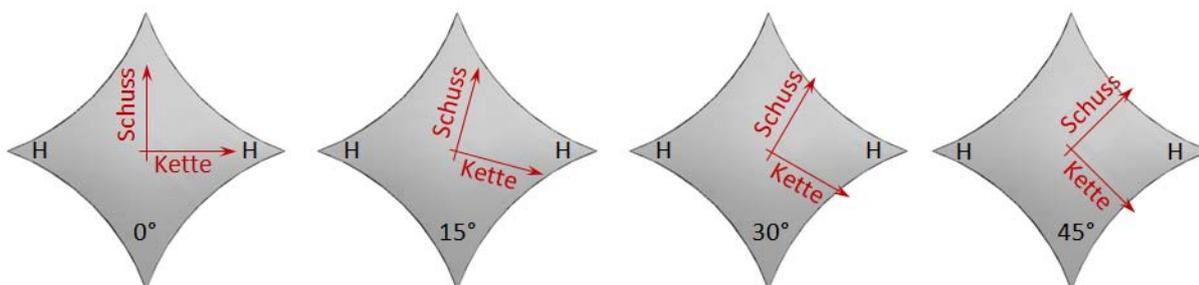


Abb. 5.1 Gewebeorientierungen bei den Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit

Vorspannung und Lasten

Die Membranvorspannung wird bei den durchgeführten Untersuchungen in der Regel zwischen 2 kN/m, 3 kN/m und 4 kN/m variiert. Das Vorspannungsverhältnis zwischen Kett- und Schussrichtung wurde vereinfachend mit 1:1 angenommen.

Bezüglich der Lasten werden zwei Lastfälle mit verschiedenen Lastrichtungen unterschieden. Der Lastfall mit nach unten orientierter Lastrichtung steht stellvertretend für eine Belastung durch Schnee und Winddruck. Vereinfachend wird die Belastung global auf die projizierte Fläche bezogen. Der zweite Lastfall besitzt eine nach oben orientierte Lastrichtung und entspricht einer Belastung durch Windsog. Die Windsogbelastung wird lokal auf die Elementfläche bezogen. Die Lastannahmen erfolgen im Interesse realitätsnaher Untersuchung und zielen auf eine gewählte Spannungsausnutzung des Gewebes im bemessungsbestimmenden Lastfall (Schnee und Winddruck) von ca. 75 % ab. Die so ermittelte Gesamtlast wird zu 85 % der Schneelast und zu 15 % der Winddruckbelastung zugeordnet. Dabei handelt es sich um Annahmen, die mit Hilfe von üblichen Lastverteilungen in Österreich getroffen wurden. Für eine realitätsnahe Annahme der zugehörigen Windsogbelastung wurde vereinfachend mittels der in ÖNORM EN 13782 „Fliegende Bauten - Zelte - Sicherheit“ [34] angegebenen Windbeiwerte für Membrantragwerke gearbeitet. Mit Hilfe der Windbeiwerte für Winddruck von 0,3 und für Windsog von 0,7 kann ein Verhältnis zwischen Windsog- und Winddruckbelastung von 1:2,33 angenommen werden.

Die Bemessungswiderstände der beschichteten Gewebemembranen werden basierend auf den in [30] angegebenen Richtwerten bestimmt (siehe Tab. 5.2).

Gewebe	Bemessungswiderstand f_d [kN/m]			
	Kurzzeitlasten			
	erhöhtes Temperaturniveau		niedriges Temperaturniveau	
	Kette	Schuss	Kette	Schuss
PVC/PES Typ I	17,25	17,25	21,57	21,57
PVC/PES Typ II	25,30	22,72	31,63	28,40
PVC/PES Typ III	33,07	29,33	41,63	36,66
PVC/PES Typ IV	42,85	36,81	53,56	46,01
PTFE/Glas Typ II	28,76	25,30	35,94	31,63
PTFE/Glas Typ III	39,68	33,93	49,60	42,41
PTFE/Glas Typ IV	41,98	37,38	52,48	46,73

Tab. 5.2 Bemessungswiderstände für Gewebemembranen

Die zuvor beschriebenen Lastannahmen werden lediglich bei Änderung des Gewebematerials bzw. Gewebetyps und Reduktion der Segelgröße angepasst, um wiederum eine Spannungsausnutzung von 75 % zu erreichen. Bei Änderung von Vorspannung, Krümmung, Randausbildung des Segels und der Gewebeorientierung wurde auf eine Anpassung der Lastannahmen verzichtet.

Bezüglich der Einwirkungskombinationen wird bei den Untersuchungen der Parameterstudie zwischen dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) unterschieden. Die Einwirkungskombinationen werden vereinfacht für ULS mittel (Glg. 5.1) und für SLS mittels (Glg. 5.2) bestimmt. Der Teilsicherheits-

beiwert γ_f beträgt für die ständigen Lasten (Vorspannung) 1,35 und für veränderliche Lasten (Schnee und Wind) 1,50.

$$\gamma_f \cdot \sum G_k + \gamma_f \cdot \sum Q_k \quad (\text{Glg. 5.1})$$

$$\sum G_k + \sum Q_k \quad (\text{Glg. 5.2})$$

Material und Materialkennwerte (Steifigkeitskennwertspektren)

Bei den Untersuchungen der Parameterstudie werden PVC-beschichtetes Polyestergewebe Typ I bis Typ IV und PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe Typ II bis Typ IV berücksichtigt. Für die nichtlineare Berechnung des Tragwerks wird auf eine linear-elastische, orthotrope Materialmodellierung zurückgegriffen. Diese Vereinfachung stützt sich auf die Erkenntnis einer umfangreichen Versuchsreihe von Reinhardt [20], dass der Elastizitätsmodul nach drei Belastungszyklen - spätestens aber nach zehn Belastungszyklen - nicht mehr bedeutend zunimmt. Zusätzlich werden die Flächenelemente so definiert, dass sie ausschließlich eine Membrantragwirkung besitzen. Für die Steifigkeitskennwertspektren der Parameterstudie (siehe Tab. 5.3) werden die aus der Literaturrecherche und der Befragung von Planungsbüros, Materialherstellern und Prüfanstalten gewonnenen Streuungen der Materialkennwerte verschiedener Gewebemembranen (siehe Kapitel 4.2) kritisch hinterfragt und selektiert. Aufgrund von fehlenden Angaben in der Literatur werden bei den mit einem * markierten Steifigkeitskennwerten basierend auf den Angaben in [2] Annahmen getroffen.

Je nach Streuungsbreite der Steifigkeitskennwerte werden neben den Berechnungen mit den oberen und unteren Grenzwerten für die Steifigkeitskennwerte ein bis zwei zusätzliche Berechnungen (Zwischenberechnungen) mit dazwischenliegenden Steifigkeitskennwerten durchgeführt. Bei der Festlegung der Steifigkeitskennwerte der Zwischenberechnungen wird auf eine gleichmäßige Schrittweite geachtet. Nähere Informationen über die den Berechnungen zugrundegelegten Steifigkeitskennwerte sind dem Kapitel 5.1.1 zu entnehmen.

Über alle durchgeführten Untersuchungen wird generell eine Querdehnzahl von 0,5 und programmsspezifisch eine fiktive Materialstärke von 1 mm angenommen.

Gewebe	E_{KETTE}		E_{SCHUSS}		G		$E_{K,mittel}$	$E_{S,mittel}$	G_{mittel}
	min. [kN/m]	max. [kN/m]	min. [kN/m]	max. [kN/m]	min. [kN/m]	max. [kN/m]			
PVC/PES Typ I	650	800	500	650	7	14	720	590	10
PVC/PES Typ II	900	1200	600	1050	10	17	990	810	13
PVC/PES Typ III	900	1500	550	1150	13	16	1220	810	14,5
PVC/PES Typ IV	1450	1750	1000	1300	14	17	1570	1160	15
PTFE/Glas Typ II	1050	1500	800	1250	20*	40*	1220	1000	30
PTFE/Glas Typ III	1800	2400	1100	1600	40	60	2130	1310	45
PTFE/Glas Typ IV	1900	2100	1250	1850	60*	80*	2000	1520	70

Tab. 5.3 Ausgewählte Steifigkeitsspektren für verschiedene Gewebemembranen

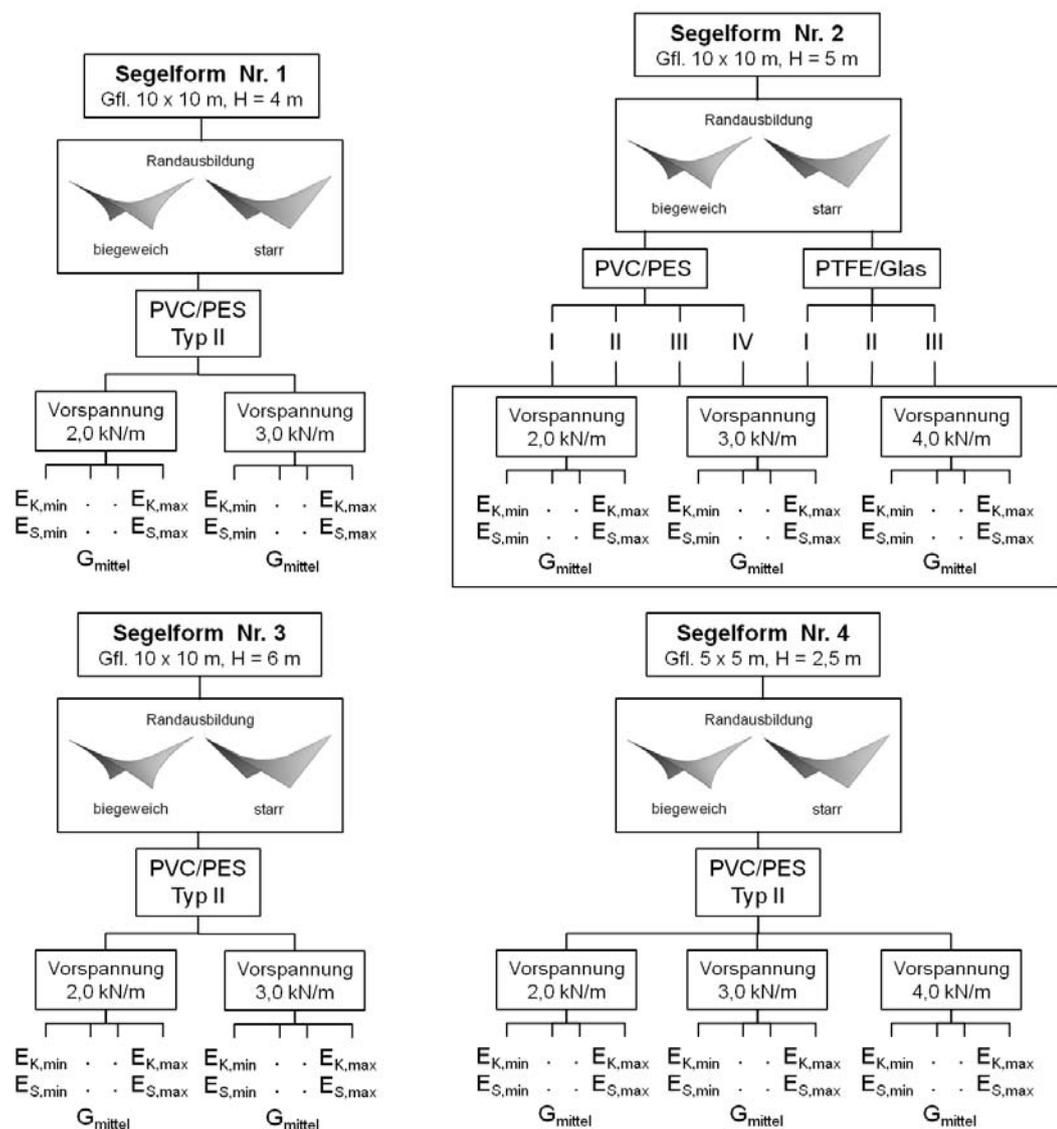


Abb. 5.2 Ablaufplan der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten

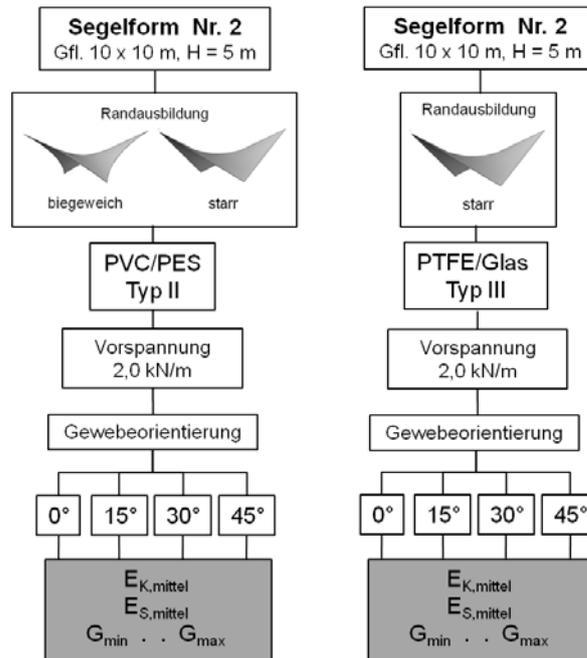


Abb. 5.3 Ablaufplan der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit

5.1.1 Übersicht der durchgeführten Untersuchungen

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die durchgeführten Untersuchungen der Parameterstudie und deren Berechnungsparametern für die verschiedenen Gewebetypen und Segelformen.

5.1.1.1 Segelform 1

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche		Höhe	Elastizitätsmoduli		Quer- dehnzahl	Schub- modul	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L		E_{KETTE}	E_{SCHUSS}			Memb.	Seil	Memb.	Seil	$s + w_D$	w_S	$s + w_D$	w_S
			[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	
Nr. 1 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 4 m)	PVC/PES Typ II	starr	10,0	10,0	4,0	900	600	0,5	13	2,0	-	2,7	-	1,70	0,60	2,55	0,89
						1000	750	0,5	13								
						1100	900	0,5	13								
						1200	1050	0,5	13								
		900	600	0,5	13	3,0	-	4,1	-								
		1000	750	0,5	13												
		1100	900	0,5	13												
		1200	1050	0,5	13												
	biegeweich	10,0	10,0	4,0	900	600	0,5	13	2,0	30,0	2,7	40,5	1,70	0,60	2,55	0,89	
					1000	750	0,5	13									
					1100	900	0,5	13									
					1200	1050	0,5	13									
		900	600	0,5	13	3,0	45,0	4,1	60,8								
		1000	750	0,5	13												
		1100	900	0,5	13												
		1200	1050	0,5	13												

Tab. 5.4 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 1, PVC/PES Typ II

5.1.1.2 Segelform 2

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer-	Schubmodul	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H	E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	dehnzahl		Memb.	Seil	Memb.	Seil	$s + w_D$	w_S	$s + w_D$	w_S
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]		[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ I	starr	10,0	10,0	5,0	650	500	0,5	10	2,0	-	2,7	-	1,15	0,40	1,73	0,60
						725	575	0,5	10								
						800	650	0,5	10								
						650	500	0,5	10	3,0	-	4,1	-				
						725	575	0,5	10								
						800	650	0,5	10								
	650	500	0,5	10	4,0	-	5,4	-									
	725	575	0,5	10													
	800	650	0,5	10													
	biegew.	10,0	10,0	5,0	650	500	0,5	10	2,0	30,0	2,7	40,5	1,15	0,40	1,73	0,60	
					725	575	0,5	10									
					800	650	0,5	10									
650					500	0,5	10	3,0	45,0	4,1	60,8						
725					575	0,5	10										
800					650	0,5	10										
650	500	0,5	10	4,0	60,0	5,4	81,0										
725	575	0,5	10														
800	650	0,5	10														

Tab. 5.5 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ I

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer-	Schubmodul	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H	E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	dehnzahl		Memb.	Seil	Memb.	Seil	$s + w_D$	w_S	$s + w_D$	w_S
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]		[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	starr	10,0	10,0	5,0	900	600	0,5	13	2,0	-	2,7	-	1,70	0,60	2,55	0,89
						1000	750	0,5	13								
						1100	900	0,5	13								
						1200	1050	0,5	13	3,0	-	4,1	-				
						900	600	0,5	13								
						1000	750	0,5	13								
	1100	900	0,5	13	4,0	-	5,4	-									
	1200	1050	0,5	13													
	900	600	0,5	13					2,0	30,0	2,7	40,5					
	1000	750	0,5	13													
	1100	900	0,5	13													
	1200	1050	0,5	13	3,0	45,0	4,1	60,8									
900	600	0,5	13														
1000	750	0,5	13														
1100	900	0,5	13	4,0	60,0	5,4	81,0										
1200	1050	0,5	13														
900	600	0,5	13														
1000	750	0,5	13														
1100	900	0,5	13														
1200	1050	0,5	13														

Tab. 5.6 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ II

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer- dehnzahl	Schub- modul	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H	E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	μ_{KS}	G	Memb.	Seil	Memb.	Seil	s + w _D	w _S	s + w _D	w _S
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	starr	10,0	10,0	5,0	900	600	0,5	0,1	2,0	-	2,7	-	1,70	0,60	2,55	0,89
						1000	750	0,5	0,1								
						1100	900	0,5	0,1								
						1200	1050	0,5	0,1								
						900	600	0,5	0,1								
						1000	750	0,5	0,1								
	1100	900	0,5	0,1													
	1200	1050	0,5	0,1													
	biegeweich	10,0	10,0	5,0	900	600	0,5	0,1	2,0	30,0	2,7	60,8	1,70	0,60	2,55	0,89	
					1000	750	0,5	0,1									
					1100	900	0,5	0,1									
					1200	1050	0,5	0,1									
900					600	0,5	0,1										
1000					750	0,5	0,1										
1100	900	0,5	0,1														
1200	1050	0,5	0,1														

Tab. 5.7 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten unter Vernachlässigung des Schubmoduls bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ II

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Gewebe- orientierung	Elastizitätsmoduli		Quer- dehnzahl	Schub- modul	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H		E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	μ_{KS}	G	Memb.	Seil	Memb.	Seil	s + w _D	w _S	s + w _D	w _S
			[m]	[m]	[m]		[°]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	starr	10,0	10,0	5,0	0	990	810	0,5	0,1	2,0	-	2,7	-	1,70	0,60	2,55	0,90
							990	810	0,5	10								
							990	810	0,5	17								
						15	990	810	0,5	0,1								
							990	810	0,5	10								
							990	810	0,5	17								
						30	990	810	0,5	0,1								
							990	810	0,5	10								
							990	810	0,5	17								
						45	990	810	0,5	0,1								
	990	810	0,5	10														
	990	810	0,5	17														
	biegeweich	10,0	10,0	5,0	0	990	810	0,5	0,1	2,0	30,0	2,7	40,5	1,70	0,60	2,55	0,90	
						990	810	0,5	10									
						990	810	0,5	17									
					15	990	810	0,5	0,1									
						990	810	0,5	10									
						990	810	0,5	17									
					30	990	810	0,5	0,1									
						990	810	0,5	10									
990						810	0,5	17										
45					990	810	0,5	0,1										
	990	810	0,5	10														
	990	810	0,5	17														

Tab. 5.8 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ II

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer-	Schub-	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H	E _{KETTE}	E _{SCHUSS}	dehnzahl		Memb.	Seil	Memb.	Seil	s + w _D	w _S	s + w _D	w _S
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]		[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ III	starr	10,0	10,0	5,0	900	550	0,5	14,5	2,0	-	2,7	-	2,35	0,82	3,53	1,23
						1100	750	0,5	14,5								
						1300	950	0,5	14,5								
						1500	1150	0,5	14,5								
		900	550	0,5	14,5	3,0	-	4,1	-								
		1100	750	0,5	14,5												
		1300	950	0,5	14,5												
		1500	1150	0,5	14,5												
	900	550	0,5	14,5	4,0	-	5,4	-									
	1100	750	0,5	14,5													
	1300	950	0,5	14,5													
	1500	1150	0,5	14,5													
	biegew.	10,0	10,0	5,0	900	550	0,5	14,5	2,0	30,0	2,7	40,5	2,35	0,82	3,53	1,23	
					1100	750	0,5	14,5									
					1300	950	0,5	14,5									
					1500	1150	0,5	14,5									
900		550	0,5	14,5	3,0	45,0	4,1	60,8									
1100		750	0,5	14,5													
1300		950	0,5	14,5													
1500		1150	0,5	14,5													
900	550	0,5	14,5	4,0	60,0	5,4	81,0										
1100	750	0,5	14,5														
1300	950	0,5	14,5														
1500	1150	0,5	14,5														

Tab. 5.9 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ III

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer-	Schub-	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H	E _{KETTE}	E _{SCHUSS}	dehnzahl		Memb.	Seil	Memb.	Seil	s + w _D	w _S	s + w _D	w _S
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]		[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ IV	starr	10,0	10,0	5,0	1450	1000	0,5	15	2,0	-	2,7	-	3,00	1,05	4,50	1,58
						1600	1150	0,5	15								
						1750	1300	0,5	15								
		1450	1000	0,5	15	3,0	-	4,1	-								
		1600	1150	0,5	15												
		1750	1300	0,5	15												
	1450	1000	0,5	15	4,0	-	5,4	-									
	1600	1150	0,5	15													
	1750	1300	0,5	15													
	biegew.	10,0	10,0	5,0	1450	1000	0,5	15	2,0	30,0	2,7	40,5	3,00	1,05	4,50	1,58	
					1600	1150	0,5	15									
					1750	1300	0,5	15									
1450		1000	0,5	15	3,0	45,0	4,1	60,8									
1600		1150	0,5	15													
1750		1300	0,5	15													
1450	1000	0,5	15	4,0	60,0	5,4	81,0										
1600	1150	0,5	15														
1750	1300	0,5	15														

Tab. 5.10 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ IV

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer-	Schub-	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H	E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	dehnzahl		Memb.	Seil	Memb.	Seil	$s + w_D$	w_S	$s + w_D$	w_S
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]								
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ II	starr	10,0	10,0	5,0	1050	800	0,5	30	2,0	-	2,7	-	1,95	0,68	2,93	1,02
						1200	950	0,5	30								
						1350	1100	0,5	30								
						1500	1250	0,5	30								
		1050	800	0,5	30	3,0	-	4,1	-	1,95	0,68	2,93	1,02				
		1200	950	0,5	30												
		1350	1100	0,5	30												
		1500	1250	0,5	30												
	1050	800	0,5	30	4,0	-	5,4	-	1,95	0,68	2,93	1,02					
	1200	950	0,5	30													
	1350	1100	0,5	30													
	1500	1250	0,5	30													
	biegew.	10,0	10,0	5,0	1050	800	0,5	30	2,0	30,0	2,7	40,5	1,95	0,68	2,93	1,02	
					1200	950	0,5	30									
					1350	1100	0,5	30									
					1500	1250	0,5	30									
1050		800	0,5	30	3,0	45,0	4,1	60,8	1,95	0,68	2,93	1,02					
1200		950	0,5	30													
1350		1100	0,5	30													
1500		1250	0,5	30													
1050	800	0,5	30	4,0	60,0	5,4	81,0	1,95	0,68	2,93	1,02						
1200	950	0,5	30														
1350	1100	0,5	30														
1500	1250	0,5	30														

Tab. 5.11 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 2, PTFE/Glas Typ II

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer-	Schub-	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H	E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	dehnzahl		Memb.	Seil	Memb.	Seil	$s + w_D$	w_S	$s + w_D$	w_S
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]								
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ III	starr	10,0	10,0	5,0	1800	1100	0,5	45	2,0	-	2,7	-	2,50	0,88	3,75	1,31
						2000	1267	0,5	45								
						2200	1434	0,5	45								
						2400	1600	0,5	45								
		1800	1100	0,5	45	3,0	-	4,1	-	2,50	0,88	3,75	1,31				
		2000	1267	0,5	45												
		2200	1434	0,5	45												
		2400	1600	0,5	45												
	1800	1100	0,5	45	4,0	-	5,4	-	2,50	0,88	3,75	1,31					
	2000	1267	0,5	45													
	2200	1434	0,5	45													
	2400	1600	0,5	45													
	biegew.	10,0	10,0	5,0	1800	1100	0,5	45	2,0	30,0	2,7	40,5	2,50	0,88	3,75	1,31	
					2000	1267	0,5	45									
					2200	1434	0,5	45									
					2400	1600	0,5	45									
1800		1100	0,5	45	3,0	45,0	4,1	60,8	2,50	0,88	3,75	1,31					
2000		1267	0,5	45													
2200		1434	0,5	45													
2400		1600	0,5	45													
1800	1100	0,5	45	4,0	60,0	5,4	81,0	2,50	0,88	3,75	1,31						
2000	1267	0,5	45														
2200	1434	0,5	45														
2400	1600	0,5	45														

Tab. 5.12 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 2, PTFE/Glas Typ III

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Gewebeorientierung [°]	Elastizitätsmoduli		Quer- dehnzahl μ_{KS}	Schub- modul G	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H		E_{KETTE}	E_{SCHUSS}			Memb.	Seil	Memb.	Seil	$s + w_D$	w_S	$s + w_D$	w_S
			[m]	[m]	[m]		[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ III	starr	10,0	10,0	5,0	0	2130	1310	0,5	0,1	2,0	-	2,7	-	2,50	0,88	3,75	1,31
							2130	1310	0,5	40								
							2130	1310	0,5	60								
						15	2130	1310	0,5	0,1								
		2130	1310	0,5	40													
		2130	1310	0,5	60													
		30	2130	1310	0,5	0,1												
			2130	1310	0,5	40												
	2130		1310	0,5	60													
	45		2130	1310	0,5	0,1												
		2130	1310	0,5	40													
		2130	1310	0,5	60													
		biegeweich	10,0	10,0	5,0	0	2130	1310	0,5	0,1	2,0	30,0	2,7	40,5	2,50	0,88	3,75	1,31
	2130						1310	0,5	40									
	2130						1310	0,5	60									
	15					2130	1310	0,5	0,1									
2130			1310	0,5	40													
2130			1310	0,5	60													
30	2130		1310	0,5	0,1													
	2130		1310	0,5	40													
	2130	1310	0,5	60														
	45	2130	1310	0,5	0,1													
2130		1310	0,5	40														
2130		1310	0,5	60														
2130		1310	0,5	60														

Tab. 5.13 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit bei starrer Randausbildung für Segelform 2, PTFE/Glas Typ III

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer- dehnzahl μ_{KS}	Schub- modul G	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)					
			B	L	H	E_{KETTE}	E_{SCHUSS}			Memb.	Seil	Memb.	Seil	$s + w_D$	w_S	$s + w_D$	w_S				
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]						
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ IV	starr	10,0	10,0	5,0	1900	1250	0,5	70	2,0	-	2,7	-	2,70	0,95	4,05	1,42				
							2000	1550	0,5									70			
							2100	1850	0,5									70			
						1900	1250	0,5	70												
		2000	1550	0,5	70																
		2100	1850	0,5	70																
		biegew.	10,0	10,0	5,0	1900	1250	0,5	70					2,0	30,0	2,7	40,5	2,70	0,95	4,05	1,42
							2000	1550	0,5												
	2100						1850	0,5	70												
	1900					1250	0,5	70													
		2000	1550	0,5	70																
		2100	1850	0,5	70																
	1900	1250	0,5	70																	
		2000	1550	0,5	70																
		2100	1850	0,5	70																
		4,0	60,0	5,4	81,0																

Tab. 5.14 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 2, PTFE/Glas Typ IV

5.1.1.3 Segelform 3

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer-	Schub-	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H	E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	dehnzahl		Memb.	Seil	Memb.	Seil	$s + w_D$	w_S	$s + w_D$	w_S
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]								
Nr. 3 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 6 m)	PVC/PES Typ II	starr	10,0	10,0	6,0	900	600	0,5	13	2,0	-	2,7	-	1,70	0,60	2,55	0,89
						1000	750	0,5	13								
						1100	900	0,5	13								
						1200	1050	0,5	13								
						900	600	0,5	13								
						1000	750	0,5	13								
		1100	900	0,5	13												
		1200	1050	0,5	13												
		biegeweich	10,0	10,0	6,0	900	600	0,5	13	2,0	30,0	2,7	40,5	1,70	0,60	2,55	0,89
						1000	750	0,5	13								
						1100	900	0,5	13								
						1200	1050	0,5	13								
900	600					0,5	13										
1000	750					0,5	13										
1100	900	0,5	13														
1200	1050	0,5	13														

Tab. 5.15 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 3, PVC/PES Typ II

5.1.1.4 Segelform 4

Form	Material	Randausbildung	Abmess. Grundfläche			Elastizitätsmoduli		Quer-	Schub-	char. Vorsp.		Design-Vorsp.		char. Lasten (SLS)		Design-Lasten (ULS)	
			B	L	H	E_{KETTE}	E_{SCHUSS}	dehnzahl		Memb.	Seil	Memb.	Seil	$s + w_D$	w_S	$s + w_D$	w_S
			[m]	[m]	[m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]								
Nr. 4 (Grundfläche 5 x 5 m, Höhe 2,5 m)	PVC/PES Typ II	starr	5,0	5,0	2,5	900	600	0,5	13	2,0	-	2,7	-	3,20	1,12	4,80	1,68
						1000	750	0,5	13								
						1100	900	0,5	13								
						1200	1050	0,5	13								
						900	600	0,5	13								
						1000	750	0,5	13								
		1100	900	0,5	13												
		1200	1050	0,5	13												
		biegeweich	5,0	5,0	2,5	900	600	0,5	13	2,0	30,0	2,7	40,5	3,20	1,12	4,80	1,68
						1000	750	0,5	13								
						1100	900	0,5	13								
						1200	1050	0,5	13								
900	600					0,5	13										
1000	750					0,5	13										
1100	900	0,5	13														
1200	1050	0,5	13														

Tab. 5.16 Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biegeweicher Randausbildung für Segelform 4, PVC/PES Typ II

5.2 Numerische Berechnung

Das Tragverhalten von Membrantragwerken unterscheidet sich deutlich von jenem konventioneller Konstruktionen. Während bei konventionellen Konstruktionen biegesteife Tragelemente mit geringen Verformungen zum Einsatz kommen, stellen Membrane biegeeweiche Tragelemente dar. Daraus ergeben sich einige Besonderheiten, auf die bei der numerischen Berechnung von Membrantragwerken zu achten ist [30].

Biegeeweiche Elemente besitzen keine nennenswerte Biegesteifigkeit und neigen dadurch unter Lasteinwirkung zu großen Verformungen. Daher ist für die statische Analyse von Membrantragwerken weder eine Berechnung nach Theorie 1. Ordnung noch Theorie 2. Ordnung geeignet. Der ersteren Methode sind kleine Verformungen und die Bildung des Gleichgewichts am unverformten System zugrundegelegt. Die Berechnungsmethode nach Theorie 2. Ordnung bildet zwar das Gleichgewicht am verformten System, geht jedoch auch von kleinen Verformungen aus. Daher ist für die statische Berechnung von Membrantragwerken eine geometrisch nichtlineare Berechnung nach Theorie 3. Ordnung (Seiltheorie) erforderlich. Diese Berechnungsmethode geht von beliebig großen Verformungen aus und bildet das Gleichgewicht am endlich verformten System. Daraus ergibt sich ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Last und Verformung (geometrische Nichtlinearität) [30].

Bei mechanisch vorgespannten Membrantragwerken kommen fast ausschließlich beschichtete Gewebemembranen zum Einsatz [4]. Bedingt durch den Web- und Beschichtungsprozess weisen beschichtete Gewebemembranen häufig unterschiedliche Materialeigenschaften in Kett- und Schussrichtung auf (orthotropes Materialverhalten). Aus diesem Grund ist es für die numerische Berechnung von großer Bedeutung anisotrope Materialeigenschaften berücksichtigen zu können [22].

Zudem können durch das Ausfallen von Zugelementen bei Druckbelastung Systemänderungen hervorgerufen werden (systembedingte Nichtlinearität), die in der numerischen Berechnung Berücksichtigung finden müssen [30].

Die zuvor beschriebenen Besonderheiten in der Berechnung von Membrantragwerken, erfordern den Einsatz geeigneter Berechnungssoftware wie z.B. Sofistik [36] die in der Lage ist diese Besonderheiten bei der Modellierung zu berücksichtigen.

Berechnungsgrundlagen von Sofistik

Die im Berechnungsprogramm Sofistik [36] verwendete Finite Elemente Methode ist ein Weggrößenverfahren bei dem die Unbekannten die Knotenverschiebungen sind [37].

$$[K] \cdot \{u\} = \{f\} \quad (\text{Glg. 5.3})$$

Dabei stellt K die Gesamtsteifigkeitsmatrix, u den Verschiebungsvektor und f den Belastungsvektor dar. Die Diskretisierung der Membranoberfläche erfolgt mit finiten Flächenelementen. Die Formulierung des Flächenelementes erfolgt mit einem isoparametrischen Ansatz [37]. Bei einem isoparametrischen Element werden für die Transformation der globalen in lokale Koordinaten und für den Verformungsansatz dieselben Formfunktionen verwendet. Die

unbekannten Knotenverschiebungen sind die Parameter der Formfunktionen. Die unbekannt Parameter (Knotenverschiebungen) werden über das Minimum der potentiellen Energie des Systems ermittelt.

$$n_{xx} = S_x \cdot \varepsilon_x - \mu \cdot S_{xy} \cdot \varepsilon_y \quad (\text{Glg. 5.4})$$

$$n_{yy} = S_y \cdot \varepsilon_y - \mu \cdot S_{xy} \cdot \varepsilon_x \quad (\text{Glg. 5.5})$$

$$n_{xy} = G \cdot t_{xy} \cdot \gamma_{xy} \quad (\text{Glg. 5.6})$$

mit den Dehnsteifigkeiten

$$S_x = \frac{E_x \cdot t_x}{1 - \mu^2} \quad (\text{Glg. 5.7})$$

$$S_y = \frac{E_y \cdot t_y}{1 - \mu^2} \quad (\text{Glg. 5.8})$$

$$S_{xy} = \frac{E_x \cdot t_{xy}}{1 - \mu^2} \quad (\text{Glg. 5.9})$$

Dabei bedeuten:

- n_{xx} Membrankraft in x-Richtung [kN/m]
- n_{yy} Membrankraft in y-Richtung [kN/m]
- n_{xy} Schubkraft [kN/m]
- S_x Dehnsteifigkeit in x-Richtung [kN/m]
- S_y Dehnsteifigkeit in y-Richtung [kN/m]
- S_{xy} Schubsteifigkeit [kN/m]
- ε_x Dehnung in x-Richtung
- ε_y Dehnung in y-Richtung
- γ_{xy} Schubverzerrung
- μ Querdehnzahl
- t_x Dicke in x-Richtung [m]
- t_y Dicke in y-Richtung [m]
- t_{xy} ideelle Dicke [m]
- E_x E-Modul in x-Richtung [kN/m²]
- E_y E-Modul in y-Richtung [kN/m²]
- G Schubmodul [kN/m²]

Für die iterative Berechnung von nichtlinearen Effekten wird in Sofistik ein modifiziertes Newtonverfahren mit konstanter Steifigkeit und ein Beschleunigungsalgorithmus nach Crisfield verwendet. Der Algorithmus merkt sich die Entwicklung der Restkräfte über die Iterationen und ermittelt daraus Faktoren für die weiteren Verschiebungsinkremente [37].

Bei der Eingabe der Querdehnzahl kann vorab nur die Querdehnzahl einer Anisotropierichtung berücksichtigt werden. Die Querdehnzahl der zweiten Anisotropierichtung wird anschließend intern mit dem Verhältnis der Elastizitätsmoduli nach folgender Gleichung umgerechnet:

$$\mu_{yx} = \mu_{xy} \cdot \frac{E_x}{E_y} \quad (\text{Glg. 5.10})$$

5.3 Ergebnisse

Die Lage der maximalen Ergebniswerte ist bei den durchgeführten Untersuchungen oftmals nicht ident. Um dennoch eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander garantieren zu können und eine Abbildung von Spannungsspitzen zu vermeiden, werden die Ergebniswerte (Spannungen und Verformungen) für sämtliche Untersuchungen im Bereich des Segelzentrums ausgelesen (siehe Abb. 5.4). Bei den Ergebnissen der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten werden neben den Verformungen lediglich die bemessungsrelevanten Spannungen in Tragrichtung des jeweiligen Lastfalls ausgewiesen. Wie in Abb. 5.5 dargestellt entspricht bei einer Last mit Wirkungsrichtung nach unten die Kettrichtung der Tragrichtung und die Schussrichtung stellt die Spannrichtung dar. Umgekehrt entspricht bei einer Last mit Wirkungsrichtung nach oben die Schussrichtung der Tragrichtung und die Kettrichtung ist Spannrichtung. Die Schubspannungen werden bei den Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten aufgrund der vernachlässigbar geringen Werte ($< \text{ca. } 1,0\%$ der maximalen Tragspannung) nicht berücksichtigt. Bei den Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit werden zusätzlich auch die Spannungen der Spannrichtung und die Schubspannungen ausgelesen.

Die Bestimmung der Materialstärke von Gewebemembranen ist relativ aufwendig, deshalb werden im Membranbau die Spannungen nicht auf eine Flächeneinheit, sondern auf eine Breite von 1 m bezogen [17]. Dementsprechend werden die Spannungswerte im Folgenden mit der Einheit kN/m angegeben. Da die Membranoberfläche in Sofistik aber mit Flächenelementen modelliert wird (d.h. für die Berechnung muss eine Eingabe für die Materialdicke erfolgen), ist es erforderlich die Ergebnisse mit einer fiktiven Materialstärke umzurechnen. Um die Umrechnung zu erleichtern, wird eine fiktive Materialstärke von 1 mm angenommen, dann entspricht ein Spannungswert von z.B. $1 \text{ kN/m} = 1 \text{ N/mm}^2$.

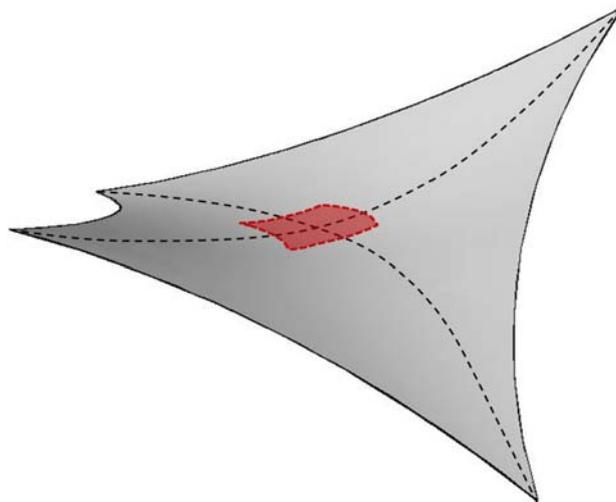


Abb. 5.4 Auslesebereich für die Ergebnisse

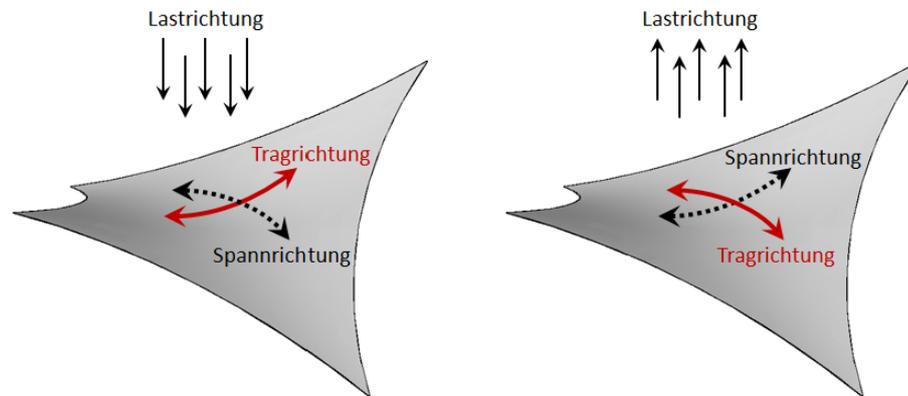


Abb. 5.5 Definition der Trag- und Spannrichtung in Abhängigkeit von der Lastrichtung, links: nach unten gerichtete Last, rechts: nach oben gerichtete Last

5.3.1 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten und konstanter Schubsteifigkeit

5.3.1.1 Segelform 1

In Tab. 5.17 werden die Ergebnisse bei Variation der Dehnsteifigkeiten von PVC/PES Typ II für Segelform 1 dargestellt.

Form	Material	Berechnung	E_{KETTE} [kN/m]	E_{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	STARRER RAND				BIEGEWEICHER RAND			
							LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog	
							Kette	Verf.	Schuss	Verf.	Kette	Verf.	Schuss	Verf.
							n_x	w_z	n_y	w_z	n_x	w_z	n_y	w_z
		[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]			
Nr. 1 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 4 m)	PVC/PES Typ II	1	900	600	$G_{\text{mittel}} = 13$	2,0	26,70	331,5	10,70	-272,9	25,70	358,6	9,10	-371,4
							26,80	312,1	10,73	-222,4	26,38	332,0	9,34	-319,0
							27,03	293,5	10,89	-185,9	27,08	316,1	9,48	-269,0
							27,30	276,4	11,06	-157,9	27,58	289,7	9,75	-258,3
		2	1000	750	$G_{\text{mittel}} = 13$	3,0	27,20	323,6	10,95	-218,4	25,65	342,0	9,65	-228,9
							27,20	303,7	11,13	-170,1	26,38	310,5	9,71	-186,4
							27,38	285,1	11,25	-136,5	27,00	285,6	9,86	-159,2
							27,65	268,2	11,40	-112,5	27,53	265,1	9,99	-143,7

Tab. 5.17 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ II

5.3.1.2 Segelform 2

PVC/PES Typ I

Tab. 5.18 zeigt die Ergebnisse bei Variation der Dehnsteifigkeiten von PVC/PES Typ I für Segelform 2.

PVC/PES Typ II - Vernachlässigung des Schubmoduls ($G = 0,1 \text{ kN/m}$)

Tab. 5.20 zeigt die Ergebnisse bei Variation der Dehnsteifigkeiten unter Vernachlässigung des Schubmoduls von PVC/PES Typ II für Segelform 2.

Form	Material	Berechnung	E_{KETTE} [kN/m]	E_{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	STARRER RAND				BIEGEWEICHER RAND				
							LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		
							Kette	Verf.	Schuss	Verf.	Kette	Verf.	Schuss	Verf.	
							n_x	w_z	n_y	w_z	n_x	w_z	n_y	w_z	
		[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	1	900	600	$G = 0,1$	2,0	23,12	260,2	7,81	-240,1	25,25	286,0	8,47	-276,6	
		2	1000	750			23,33	243,7	8,07	-183,3	25,58	264,2	8,61	-227,6	
		3	1100	900			23,65	228,1	8,68	-144,1	26,20	244,6	8,89	-193,8	
		4	1200	1050			23,92	213,9	8,98	-115,9	26,60	229,7	9,25	-167,8	
			1	900	600	$G = 0,1$	3,0	23,55	251,7	8,63	-175,7	24,53	259,6	8,13	-124,0
			2	1000	750			23,72	234,9	9,05	-121,2	25,05	236,4	8,32	-87,0
			3	1100	900			24,00	219,3	9,33	-84,9	25,63	217,4	8,53	-63,7
			4	1200	1050			24,25	205,3	9,57	-59,0	26,05	201,6	8,61	-47,2

Tab. 5.20 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten unter Vernachlässigung des Schubmoduls ($G = 0,1 \text{ kN/m}$), PVC/PES Typ II

PVC/PES Typ III

In Tab. 5.21 werden die Ergebnisse bei Variation der Dehnsteifigkeiten von PVC/PES Typ III für Segelform 2 dargestellt.

Form	Material	Berechnung	E_{KETTE} [kN/m]	E_{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	STARRER RAND				BIEGEWEICHER RAND				
							LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		
							Kette	Verf.	Schuss	Verf.	Kette	Verf.	Schuss	Verf.	
							n_x	w_z	n_y	w_z	n_x	w_z	n_y	w_z	
		[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[mm]		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ III	1	900	550	$G_{\text{mittel}} = 14,5$	2,0	30,82	332,7	10,49	-382,4	31,43	372,1	12,34	-463,3	
		2	1100	750			31,50	289,3	10,83	-301,2	32,88	321,6	12,55	-397,0	
		3	1300	950			32,40	254,9	11,29	-236,1	34,10	286,8	12,62	-353,0	
		4	1500	1150			33,07	227,6	11,59	-197,9	35,08	260,5	12,11	-321,1	
			1	900	550	$G_{\text{mittel}} = 14,5$	3,0	31,30	326,2	11,10	-330,6	31,40	351,0	12,09	-333,1
			2	1100	750			32,00	282,7	11,42	-253,9	32,78	300,2	12,27	-273,7
			3	1300	950			32,73	248,6	11,82	-196,9	33,80	263,7	12,39	-236,9
			4	1500	1150			33,43	221,7	12,08	-162,1	34,68	238,4	12,41	-209,7
			1	900	550	$G_{\text{mittel}} = 14,5$	4,0	31,82	320,1	11,39	-271,4	31,28	335,2	11,24	-198,9
			2	1100	750			32,42	276,3	12,00	-198,5	32,65	282,8	11,58	-146,9
			3	1300	950			33,10	242,5	12,43	-151,1	33,70	245,9	11,65	-114,6
			4	1500	1150			33,77	215,8	12,65	-118,9	34,55	218,7	11,70	-92,0

Tab. 5.21 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ III

PTFE/Glas Typ III

Tab. 5.24 zeigt die Ergebnisse bei Variation der Dehnsteifigkeiten von PTFE/Glas Typ III für Segelform 2.

Form	Material	Berechnung	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	STARRER RAND				BIEGEWEICHER RAND			
							LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog	
							Kette	Verf.	Schuss	Verf.	Kette	Verf.	Schuss	Verf.
							n _x	w _z	n _y	w _z	n _x	w _z	n _y	w _z
[kN/m]		[mm]		[kN/m]		[mm]		[kN/m]		[mm]				
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ III	1	1800	1100	G _{mittel} = 45	2,0	37,20	188,7	11,52	-266,6	32,95	287,4	12,33	-411,7
		2	2000	1267			37,50	173,2	11,89	-233,2	33,33	244,1	12,50	-392,6
		3	2200	1434			37,83	159,9	12,10	-206,8	33,68	213,9	12,60	-375,8
		4	2400	1600			38,12	148,4	12,21	-188,5	34,08	196,5	12,91	-359,4
	PTFE/Glas Typ III	1	1800	1100	G _{mittel} = 45	3,0	37,67	185,0	12,27	-238,2	33,38	214,1	12,98	-285,1
		2	2000	1267			37,93	169,4	12,23	-207,3	33,85	195,9	12,93	-280,0
		3	2200	1434			38,22	156,2	12,47	-183,0	34,18	181,3	12,90	-264,0
		4	2400	1600			38,50	144,8	12,61	-165,4	34,70	169,0	12,68	-248,8
	PTFE/Glas Typ III	1	1800	1100	G _{mittel} = 45	4,0	38,15	181,4	12,51	-208,0	33,88	197,6	13,10	-168,0
		2	2000	1267			38,37	165,7	12,52	-179,9	34,35	179,8	13,18	-151,2
		3	2200	1434			38,63	152,5	12,74	-156,0	34,70	165,4	13,35	-137,1
		4	2400	1600			38,92	141,1	12,91	-139,5	35,08	152,9	13,45	-125,7

Tab. 5.24 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PTFE/Glas Typ III

PTFE/Glas Typ IV

In Tab. 5.25 werden die Ergebnisse bei Variation der Dehnsteifigkeiten von PTFE/Glas Typ IV für Segelform 2 dargestellt.

Form	Material	Berechnung	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	STARRER RAND				BIEGEWEICHER RAND			
							LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog	
							Kette	Verf.	Schuss	Verf.	Kette	Verf.	Schuss	Verf.
							n _x	w _z	n _y	w _z	n _x	w _z	n _y	w _z
[kN/m]		[mm]		[kN/m]		[mm]		[kN/m]		[mm]				
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ IV	1	1900	1250	G _{mittel} = 70	2,0	39,48	194,1	12,59	-236,1	28,63	379,7	12,64	-413,1
		2	2000	1550			38,92	191,9	13,50	-193,6	30,10	371,8	12,73	-350,4
		3	2100	1850			38,73	187,8	13,74	-148,2	30,40	345,0	13,24	-314,9
	PTFE/Glas Typ IV	1	1900	1250	G _{mittel} = 70	3,0	39,90	190,4	13,51	-213,3	30,85	327,4	13,90	-291,0
		2	2000	1550			39,25	187,7	14,20	-167,4	31,73	319,5	14,23	-247,1
		3	2100	1850			39,03	183,4	14,62	-125,6	32,78	300,8	14,33	-215,4
	PTFE/Glas Typ IV	1	1900	1250	G _{mittel} = 70	4,0	40,33	186,7	14,00	-188,5	30,25	284,7	14,53	-170,2
		2	2000	1550			39,58	183,4	14,78	-137,5	31,45	259,6	15,05	-146,0
		3	2100	1850			39,32	178,9	14,90	-97,9	32,13	243,4	15,43	-117,4

Tab. 5.25 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PTFE/Glas Typ IV

5.3.1.3 Segelform 3

Tab. 5.26 zeigt die Ergebnisse bei Variation der Dehnsteifigkeiten von PVC/PES Typ II für Segelform 3.

Form	Material	Berechnung	E_{KETTE} [kN/m]	E_{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	STARRER RAND				BIEGEWEICHER RAND			
							LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog	
							Kette	Verf.	Schuss	Verf.	Kette	Verf.	Schuss	Verf.
							n_x	w_z	n_y	w_z	n_x	w_z	n_y	w_z
[kN/m]		[mm]		[kN/m]		[mm]		[kN/m]		[mm]				
Nr. 3 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 6 m)	PVC/PES Typ II	1	900	600	$G_{mittel} = 13$	2,0	22,58	204,5	8,39	-182,7	21,50	193,2	6,82	-192,4
		2	1000	750			22,53	192,0	8,45	-134,8	21,88	175,3	6,92	-139,2
		3	1100	900			22,58	180,1	8,56	-101,7	22,20	161,3	7,14	-107,9
		4	1200	1050			22,70	169,3	8,66	-78,6	22,48	149,2	7,12	-75,7
		1	900	600	$G_{mittel} = 13$	3,0	23,03	196,4	8,33	-119,3	21,43	178,7	7,53	-13,4
		2	1000	750			22,90	183,5	8,53	-66,4	21,78	159,5	7,82	5,1
		3	1100	900			22,93	171,7	8,66	-28,8	22,08	144,3	7,98	13,8
		4	1200	1050			23,00	161,1	8,73	-8,5	22,33	131,9	8,08	20,0

Tab. 5.26 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ II

5.3.1.4 Segelform 4

In Tab. 5.27 werden die Ergebnisse bei Variation der Dehnsteifigkeiten von PVC/PES Typ II für Segelform 4 abgebildet.

Form	Material	Berechnung	E_{KETTE} [kN/m]	E_{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	STARRER RAND				BIEGEWEICHER RAND			
							LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog	
							Kette	Verf.	Schuss	Verf.	Kette	Verf.	Schuss	Verf.
							n_x	w_z	n_y	w_z	n_x	w_z	n_y	w_z
[kN/m]		[mm]		[kN/m]		[mm]		[kN/m]		[mm]				
Nr. 4 (Grundfläche 5 x 5 m, Höhe 2,5 m)	PVC/PES Typ II	1	900	600	$G_{mittel} = 13$	2,0	23,45	120,1	8,74	-106,5	22,48	111,8	7,29	-99,8
		2	1000	750			23,43	112,4	8,80	-79,3	22,95	100,7	7,56	-74,7
		3	1100	900			23,53	105,2	8,95	-59,7	23,33	91,9	7,76	-60,5
		4	1200	1050			23,70	98,7	9,03	-47,1	23,63	84,7	7,88	-49,2
		1	900	600	$G_{mittel} = 13$	3,0	23,90	116,2	8,96	-72,7	22,15	107,9	7,95	-32,8
		2	1000	750			23,83	108,2	9,09	-46,4	22,53	96,5	8,32	-18,5
		3	1100	900			23,93	101,1	9,21	-30,6	23,03	87,3	8,39	-9,7
		4	1200	1050			24,03	94,6	9,30	-20,2	23,38	79,8	8,49	-3,7
		1	900	600	$G_{mittel} = 13$	4,0	24,43	112,6	9,62	-29,8	21,95	104,6	9,18	-23,9
		2	1000	750			24,25	104,2	9,87	-22,0	22,38	92,9	9,38	-16,8
		3	1100	900			24,28	96,6	10,10	-18,3	22,75	83,8	9,53	-11,7
		4	1200	1050			24,35	90,5	10,30	-15,3	23,10	76,3	9,64	-7,8

Tab. 5.27 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ II

5.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit und konstanten Dehnsteifigkeiten

5.3.2.1 Segelform 2

PVC/PES Typ II

Tab. 5.28 und Tab. 5.29 zeigen die Ergebnisse bei Variation der Schubsteifigkeit von PVC/PES Typ II für Segelform 2.

Form	Material	Berechnung	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Gewebeorientierung	STARRER RAND							
								LF: Schnee + Winddruck				LF: Windsog			
								Kette	Schuss	Schub	Verf.	Kette	Schuss	Schub	Verf.
								n _x	n _y	n _{xy}	w _z	n _x	n _y	n _{xy}	w _z
[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[mm]								
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	1	990	810	0,1	2,0	0°	23,00	2,85	0,00	249,8	0,00	8,64	0,00	-157,1
		2			23,52			2,36	0,06	244,4	0,00	8,80	0,03	-163,2	
		3			23,62			2,03	0,08	241,4	0,00	8,86	0,04	-166,4	
		1	990	810	0,1	2,0	15°	26,55	3,43	0,01	283,5	0,00	9,86	0,00	-157,8
		2			25,07			1,27	0,21	279,5	0,00	8,26	0,06	-167,9	
		3			24,93			1,11	0,40	276,8	0,00	8,53	0,10	-174,0	
		1	990	810	0,1	2,0	30°	29,10	4,68	0,01	474,1	1,35	14,60	0,01	-254,1
		2			28,37			3,88	0,84	455,3	1,01	13,78	0,59	-230,9	
		3			27,93			3,61	1,42	443,3	0,92	13,20	0,95	-216,2	
	1	990	810	0,1	2,0	45°	29,57	23,97	0,01	674,9	16,02	13,10	0,01	-433,1	
	2			28,18			22,77	1,38	670,0	14,60	11,98	0,99	-438,6		
	3			27,17			21,92	2,28	647,8	13,65	11,25	1,58	-408,2		

Tab. 5.28 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit für starre Randausbildung, PVC/PES Typ II

Form	Material	Berechnung	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Gewebeorientierung	BIEGEWEICHER RAND							
								LF: Schnee + Winddruck				LF: Windsog			
								Kette	Schuss	Schub	Verf.	Kette	Schuss	Schub	Verf.
								n _x	n _y	n _{xy}	w _z	n _x	n _y	n _{xy}	w _z
[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[mm]								
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	1	990	810	0,1	2,0	0°	24,68	2,84	0,00	265,3	0,00	8,94	0,00	-203,6
		2			24,55			1,82	0,21	242,3	0,00	8,82	0,00	-211,2	
		3			23,85			1,27	0,24	235,4	0,00	8,82	0,00	-212,1	
		1	990	810	0,1	2,0	15°	16,08	0,93	0,02	701,3	0,00	8,06	0,00	-211,9
		2			16,70			0,19	1,26	586,4	0,00	8,15	0,18	-236,6	
		3			17,30			0,19	1,86	531,4	0,09	8,88	0,39	-254,3	
		1	990	810	0,1	2,0	30°	17,38	1,23	0,02	1026,0	1,30	8,95	0,02	-583,4
		2			16,53			1,40	1,60	954,8	1,54	8,09	1,57	-456,4	
		3			16,00			1,77	2,55	899,7	1,46	7,84	2,21	-408,3	
	1	990	810	0,1	2,0	45°	12,03	11,70	0,02	1346,0	7,27	6,00	0,02	-899,4	
	2			11,60			10,15	2,19	1226,0	6,39	4,98	1,59	-717,7		
	3			10,90			9,28	3,53	1147,0	6,00	4,45	2,37	-608,9		

Tab. 5.29 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit für biegeweiche Randausbildung, PVC/PES Typ II

PTFE/Glas Typ III

In Tab. 5.30 werden die Ergebnisse bei Variation der Schubsteifigkeit von PTFE/Glas Typ III für Segelform 2 dargestellt.

Form	Material	Berechnung	E_{KETTE} [kN/m]	E_{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Gewebeorientierung	STARRER RAND							
								LF: Schnee + Winddruck				LF: Windsog			
								Kette	Schuss	Schub	Verf.	Kette	Schuss	Schub	Verf.
								n_x	n_y	n_{xy}	w_z	n_x	n_y	n_{xy}	w_z
								[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[mm]
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ III	1	2130	1310	0,1	2,0	0°	37,82	4,88	0,00	169,50	0,00	10,68	0,00	-226,30
		1			40,0			38,02	3,71	0,11	162,60	0,00	10,17	0,08	-230,20
		3			60,0			38,03	3,36	0,12	160,20	0,00	10,31	0,09	-234,40
		1	2130	1310	0,1	2,0	15°	40,98	2,62	0,00	200,70	0,00	13,64	0,00	-197,70
		1			40,0			40,25	2,17	0,83	194,30	0,00	14,27	0,10	-202,70
		3			60,0			39,95	1,99	1,28	191,40	0,00	12,91	0,25	-210,40
	1	2130	1310	0,1	2,0	30°	49,22	7,80	0,00	369,40	1,93	21,40	0,00	-239,90	
	1			40,0			46,62	6,80	2,73	338,30	0,52	18,03	1,83	-210,60	
	3			60,0			45,30	6,48	3,92	324,70	0,90	16,35	2,13	-202,70	
	1	2130	1310	0,1	2,0	45°	49,78	35,88	0,01	617,20	27,63	19,50	0,00	-429,90	
	1			40,0			46,25	31,65	4,65	550,90	22,13	15,68	3,16	-337,90	
	3			60,0			43,30	29,73	6,62	519,20	20,03	14,08	4,27	-296,20	

Tab. 5.30 Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit, PTFE/Glas Typ III

5.4 Ergebnisauswertung

In diesem Kapitel werden die zuvor dargestellten Ergebnisse bei Variation der Dehnsteifigkeiten bzw. der Schubsteifigkeit unter Berücksichtigung der Parameter Vorspannung, Segelform, Lastrichtung und Randausbildung ausgewertet.

Die Variation der Dehnsteifigkeiten bzw. der Schubsteifigkeit bewirkt Abweichungen in den Ergebniswerten (Spannungs- und Verformungswerte), die unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Als Maß für die Ergebnisabweichung werden in den folgenden Auswertungstabellen die absolute und die relative Ergebnisdifferenz angegeben. Die absolute Ergebnisdifferenz ergibt sich nach (Glg. 5.11) aus der Differenz des minimalen und maximalen Ergebniswerts. Die relative Ergebnisdifferenz in Prozent berechnet sich nach (Glg. 5.12) aus der Differenz von minimalem und maximalem Ergebniswert bezogen auf den maximalen Ergebniswert. In den Auswertungstabellen werden die Minimal- (blau) und Maximalwerte (rot) der absoluten und der relativen Ergebnisdifferenzen farblich hervorgehoben.

$$\text{Diff}_{\text{abs}} = \text{ERG}_{\text{max}} - \text{ERG}_{\text{min}} \quad (\text{Glg. 5.11})$$

$$\text{Diff}_{\text{rel}} = \frac{\text{ERG}_{\text{max}} - \text{ERG}_{\text{min}}}{\text{ERG}_{\text{max}}} \cdot 100 \quad (\text{Glg. 5.12})$$

5.4.1 Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten und konstanter Schubsteifigkeit

Zugspannungen (Tragrichtung)

Eine Erhöhung der Vorspannung, führt zu keiner wesentlichen Veränderung der relativen Ergebnisdifferenzen der Spannungen in Tragrichtung. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung der Resultate für die Spannungen anhand der Ergebnisse bei einer Vorspannung von 3 kN/m.

Tab. 5.31 und Tab. 5.32 zeigen, dass eine Erhöhung der Dehnsteifigkeiten überwiegend einen Anstieg der Spannungen in Tragrichtung zur Folge hat. Zudem kann basierend auf den absoluten bzw. relativen Ergebnisdifferenzen festgestellt werden, dass eine Abhängigkeit vom Material, Gewebetyp und den zugehörigen Steifigkeitskennwertspektren besteht. Sowohl bei den Kett- als auch bei den Schussspannungen sind die relativen Ergebnisdifferenzen mit 9,4 % (Ketttrichtung) und 8,2 % (Schussrichtung) bei PVC-beschichtetem Polyestergewebe Typ III am größten. Das entspricht einer absoluten Ergebnisdifferenz von 3,28 kN/m (Ketttrichtung) und 0,99 kN/m (Schussrichtung).

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	starre Ränder		biegew. Ränder	
						LF: s + w _D	LF: w _S	LF: s + w _D	LF: w _S
						Kette n _x [kN/m]	Schuss n _y [kN/m]	Kette n _x [kN/m]	Schuss n _y [kN/m]
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ I	650	500	G _{mittel} = 10	3,0	16,68	7,18	15,90	6,90
		800	650			17,13	7,31	16,45	7,01
		Absolute Differenz Δ [kN/m]				0,45	0,13	0,55	0,11
	Relative Differenz [%]				2,6	1,8	3,3	1,6	
	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	3,0	24,22	8,88	23,73	8,33
		1200	1050			24,55	9,54	24,98	8,61
		Absolute Differenz Δ [kN/m]				0,33	0,66	1,25	0,28
	Relative Differenz [%]				1,4	6,9	5,0	3,3	
	PVC/PES Typ III	900	550	G _{mittel} = 14,5	3,0	31,30	11,10	31,40	12,09
		1500	1150			33,43	12,08	34,68	12,41
		Absolute Differenz Δ [kN/m]				2,13	0,99	3,28	0,32
	Relative Differenz [%]				6,4	8,2	9,4	2,5	
PVC/PES Typ IV	1450	1000	G _{mittel} = 15	3,0	40,57	14,19	42,70	16,51	
	1750	1300			41,73	14,84	45,30	16,41	
	Absolute Differenz Δ [kN/m]				1,17	0,65	2,60	0,11	
Relative Differenz [%]				2,8	4,4	5,7	0,7		
Nr. 1 (Gf. 10 x 10 m, H = 4 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	3,0	27,20	10,95	25,65	9,65
		1200	1050			27,65	11,40	27,53	9,99
		Absolute Differenz Δ [kN/m]				0,45	0,45	1,88	0,35
Relative Differenz [%]				1,6	3,9	6,8	3,5		
Nr. 3 (GfL. 10 x 10 m, H = 6 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	3,0	23,03	8,33	21,43	7,53
		1000	750			22,90	8,53	21,78	7,82
		1200	1050			23,00	8,73	22,33	8,08
		Absolute Differenz Δ [kN/m]				0,12	0,39	0,90	0,54
Relative Differenz [%]				0,5	4,5	4,0	6,7		
Nr. 4 (GfL. 5 x 5 m, H = 2,5 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	3,0	23,90	8,96	22,15	7,95
		1000	750			23,83	9,09	22,53	8,32
		1200	1050			24,03	9,30	23,38	8,49
		Absolute Differenz Δ [kN/m]				0,20	0,34	1,23	0,54
Relative Differenz [%]				0,8	3,7	5,2	6,4		

Tab. 5.31 Zusammenfassung der Ergebnisse der Spannungen in Tragrichtung bei 3 kN/m Vorspannung für PVC-beschichtetes Polyestergewebe

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	starre Ränder		biegew. Ränder			
						LF: s + w _D	LF: w _S	LF: s + w _D	LF: w _S		
						Kette n _x [kN/m]	Schuss n _y [kN/m]	Kette n _x [kN/m]	Schuss n _y [kN/m]		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ II	1050	800	G _{mittel} = 30	3,0	27,30	10,27	26,05	9,62		
		1500	1250			28,58	10,58	27,40	9,75		
		Absolute Differenz Δ [kN/m]				1,28	0,31	1,35	0,13		
		Relative Differenz [%]				4,5	2,9	4,9	1,3		
	PTFE/Glas Typ III	1800	1100	G _{mittel} = 45	3,0	37,67	12,27	33,38	12,98		
		2000	1267			37,93	12,23	33,85	12,93		
		2400	1600			38,50	12,61	34,70	12,68		
		Absolute Differenz Δ [kN/m]				0,83	0,38	1,33	0,30		
	Relative Differenz [%]				2,2	3,0	3,8	2,3			
	PTFE/Glas Typ IV	1900	1250	G _{mittel} = 70	3,0	39,90	13,51	30,85	13,90		
		2100	1850			39,03	14,62	32,78	14,33		
		Absolute Differenz Δ [kN/m]				0,87	1,11	1,93	0,43		
Relative Differenz [%]						2,2	7,6	5,9	3,0		

Tab. 5.32 Zusammenfassung der Ergebnisse der Spannungen in Tragrichtung bei 3 kN/m Vorspannung für PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe

Sowohl bei einer Belastung durch Schnee und Winddruck als auch durch Windsog erfährt das Segel lokal beschränkte Druckausfälle in der Spannrichtung. Diese Bereiche treten bei Belastung durch Schnee und Winddruck in den Bereichen der Tief- und/oder der Hochpunkte auf. Demgegenüber kommt es bei einer Belastung durch Windsog im Segelzentrum zu Druckausfällen. Das Ausfallen der Spannrichtung in lokalen Bereichen des Segels hat Auswirkungen auf das Tragverhalten des Tragwerks. Für das Tragverhalten des Gesamtsystems, aber insbesondere im Auslesebereich, ist die Lage der Bereiche, in denen es zu einem Druckausfall kommt von wesentlicher Bedeutung. Während bei einer Belastung durch Schnee und Winddruck und Druckausfällen in den Eckbereichen die Spannrichtung (Schussrichtung) im Segelzentrum uneingeschränkt mitwirken kann, wird das Mitwirken der Spannrichtung (Ketttrichtung) bei einer Belastung durch Windsog und Druckausfällen im Segelzentrum wesentlich eingeschränkt. Dieser Umstand bewirkt, dass die relativen Ergebnisdifferenzen der Spannungen in Schussrichtung (Tragrichtung) tendenziell höher sind als jene der Spannungen in Ketttrichtung (Tragrichtung).

Bei genauerer Betrachtung der Abb. 5.6 fällt auf, dass beim Segel mit biegeweichen Rändern die Fläche, in der Druckausfälle auftreten, größer ist als jene beim Segel mit starrer Randausbildung. Das bedingt die Zunahme der relativen Ergebnisdifferenzen der Kettspannungen (Tragrichtung) beim Segel mit biegeweichen Rändern gegenüber jenem mit starren Randausbildung. Bei den Schussspannungen (Tragrichtung) sind hingegen die relativen Ergebnisdifferenzen bei biegeweicher Randausbildung tendenziell geringer. Dieser Effekt kann damit begründet werden, dass beim Segel mit starren Rändern auf der Verbindung zwischen den

beiden Hochpunkten größere Bereiche der Spannrichtung (Kettrichtung) ausfallen (siehe Abb. 5.7).

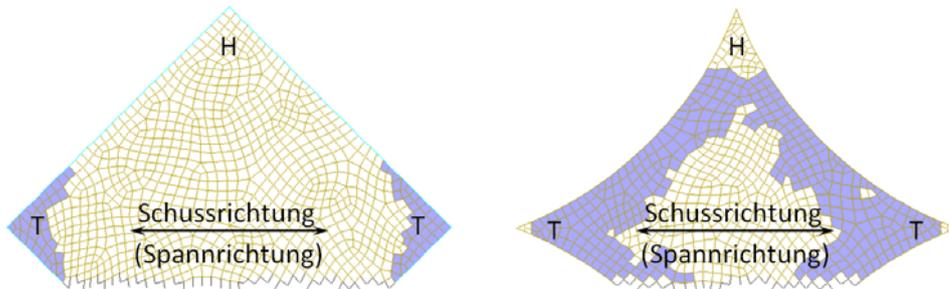


Abb. 5.6 Bereiche mit Druckausfall in Spannrichtung (blau markiert) bei Belastung durch Schnee und Winddruck, links: bei starren Rändern, rechts: bei biegeweichen Rändern

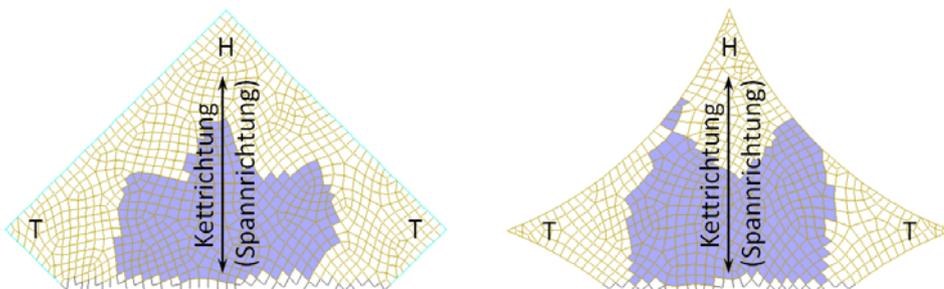


Abb. 5.7 Bereiche mit Druckausfall in Spannrichtung (blau markiert) bei Belastung durch Windsog, links: bei starren Rändern, rechts: bei biegeweichen Rändern

Eine Reduktion der Krümmung durch das Herabsetzen der Hochpunkte um 20 % (Segelform 1) hat bei den Spannungen in Tragrichtung im Lastfall „Schnee + Winddruck“ keine signifikante Änderung der relativen Ergebnisdifferenzen gegenüber Segelform 2 zur Folge. Dahingegen führt die Krümmungsreduktion bei den Spannungen in Tragrichtung im Lastfall „Windsog“ zu einer geringfügigen Änderung der relativen Ergebnisdifferenzen gegenüber Segelform 2.

Eine Erhöhung der Krümmung durch das Anheben der Hochpunkte um 20 % (Segelform 3) führt bei den Spannungen in Tragrichtung im Lastfall „Schnee + Winddruck“ zu keinen signifikanten Änderungen der relativen Ergebnisdifferenzen gegenüber Segelform 2. Im Gegensatz dazu bewirkt eine Krümmungserhöhung bei den Spannungen in Tragrichtung im Lastfall „Windsog“ eine geringfügige Änderung der relativen Ergebnisdifferenzen gegenüber Segelform 2.

Eine Änderung der Segelgröße (Segelform 4) durch Anwendung eines Skalierungsfaktors von 0,5 auf die Segelform 2 führt bei den Spannungen in Tragrichtung im Lastfall „Schnee und Winddruck“ zu keiner signifikanten Änderung der relativen Ergebnisdifferenzen gegenüber Segelform 2. Andererseits führt die Größenreduktion bei den Spannungen in Tragrichtung im Lastfall „Windsog“ zu einer geringfügigen Änderung der relativen Ergebnisdifferenzen gegenüber Segelform 2.

Der Grund für die unterschiedlichen Auswirkungen einer Krümmungsveränderung (Reduktion bzw. Erhöhung) bzw. Änderung der Segelgröße auf die Änderungen der relativen Ergebnisdifferenzen der Tragspannungen im Lastfall „Schnee + Winddruck“ bzw. im Lastfall „Windsog“ können dadurch begründet werden, dass sich die „Druckausfallbereiche“ beim Lastfall „Windsog“ über die verschiedenen Segelkrümmungen stärker verändern (siehe Abb. 5.8).

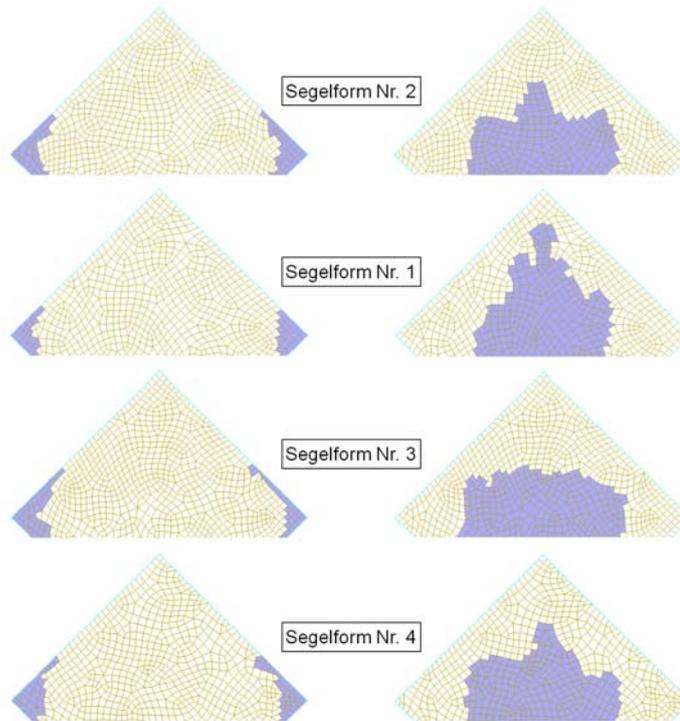


Abb. 5.8 Darstellung der „Druckausfallbereiche“ verschiedener Segelformen am Beispiel des Segels mit starrer Randausbildung, links: Lastfall „Schnee + Winddruck“, rechts: Lastfall „Windsog“

Bei einer Berechnung unter Vernachlässigung des Schubmoduls bei der Variation der Dehnsteifigkeiten weichen die Verformungswerte gegenüber jenen bei einer Berechnung mit Berücksichtigung des Schubmoduls um bis zu ca. 4 % ab (siehe Tab. 5.33).

Form	Material	E_{KETTE} [kN/m]	E_{SCHUSS} [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	starrer Rand								biegeweicher Rand							
					LF: Schnee + Winddruck				LF: Windsog				LF: Schnee + Winddruck				LF: Windsog			
					Kette				Schuss				Kette				Schuss			
					n_x [kN/m]				n_y [kN/m]				n_x [kN/m]				n_y [kN/m]			
				$G = 13$ kN/m	$G = 0,1$ kN/m	abs. Differenz [kN/m]	Relative Differenz [%]	$G = 13$ kN/m	$G = 0,1$ kN/m	abs. Differenz [kN/m]	Relative Differenz [%]	$G = 13$ kN/m	$G = 0,1$ kN/m	abs. Differenz [kN/m]	Relative Differenz [%]	$G = 13$ kN/m	$G = 0,1$ kN/m	abs. Differenz [kN/m]	Relative Differenz [%]	
Nr. 2 (Gf. 10 x 10 m, H= 5 m)	PVC/PES Typ II	900	600	3,0	24,22	23,55	0,67	2,8	8,88	8,63	0,25	2,8	23,73	24,53	0,80	3,3	8,33	8,13	0,20	2,4
		1000	750		24,22	23,72	0,50	2,1	9,12	9,05	0,07	0,8	24,18	25,05	0,87	3,5	8,45	8,32	0,13	1,6
		1100	900		24,33	24,00	0,33	1,4	9,37	9,33	0,03	0,3	24,60	25,63	1,03	4,0	8,54	8,53	0,01	0,1
		1200	1050		24,55	24,25	0,30	1,2	9,54	9,57	0,03	0,3	24,98	26,05	1,08	4,1	8,61	8,61	0,00	0,0

Tab. 5.33 Ergebnisdifferenzen der Spannungen in Tragrichtung bei einer Berechnung mit und ohne Berücksichtigung des Schubmoduls

Verformungen

Eine Erhöhung der Vorspannung, führt zu einer wesentlichen Veränderung der relativen Ergebnisdifferenzen der Verformungen, weshalb die Ergebnisauswertung anhand aller Vorspannungskräfte erfolgt. In welchem Ausmaß sich die relativen Ergebnisdifferenzen bei einer Variation der Vorspannung verändern, hängt wesentlich von den Spannungsverhältnissen in der Spannrichtung und möglichen Veränderungen des Gesamttragverhaltens ab.

Wie in Tab. 5.34 bis Tab. 5.36 ersichtlich, bewirkt eine Dehnsteifigkeitserhöhung einen Abfall der Verformungen. Darüber hinaus kann beobachtet werden, dass das Ausmaß der relativen Ergebnisdifferenzen der Verformungen vom Material, Gewebetyp und den zugehörigen Steifigkeitskennwertspektren abhängig ist. Das Maximum der absoluten Ergebnisdifferenz mit 184,5 mm und der relativen Ergebnisdifferenz mit 92,9 % können bei PVC-beschichtetem Polyestergewebe beobachtet werden.

Wie zuvor bei den Spannungen beschrieben (siehe Abb. 5.6 und Abb. 5.7), kommt es bei einer Belastung durch Windsog im Segelzentrum (Auslesebereich) zu Druckausfällen, während die Druckausfälle bei einer Belastung durch Schnee und Winddruck an den Rändern der Membrankonstruktion auftreten. Das führt zu unterschiedlichen Verhalten in der Lastabtragung. Dieser Effekt bewirkt, dass die relativen Ergebnisdifferenzen der Verformung für den Lastfall „Windsog“ größer sind als bei einer Belastung durch Schnee und Winddruck.

Der Vergleich zwischen den relativen Ergebnisdifferenzen bei einem Segel mit starren und biegeweichen Rändern unter Schnee- und Winddruckbelastung zeigt, dass die relativen Ergebnisdifferenzen beim Segel mit biegeweichen Rändern gegenüber jenen bei starrer Randausbildung zunehmen. Der Grund dafür liegt in den unterschiedlichen Ausmaßen der Bereiche, in denen die Spannrichtung auf Druck ausfällt (siehe Abb. 5.6). Im Unterschied dazu wird bei einer Belastung durch Windsog das Segelzentrum beim Segel mit starren Rändern stärker geschwächt (siehe Abb. 5.7). Das bewirkt einen Abfall der relativen Ergebnisdifferenzen beim Segel mit biegeweichen Rändern gegenüber jenen bei starrer Randausbildung.

Analog zu den Spannungen führt eine Änderung der Krümmung bzw. der Segelgröße (Segelform 1, Segelform 3 bzw. Segelform 4) bei den Verformungen im Lastfall „Schnee und Winddruck“ zu keiner signifikanten Änderung der relativen Ergebnisdifferenzen gegenüber Segelform 2, während die Krümmungsreduktion bei den Verformungen im Lastfall „Windsog“ eine wesentliche Änderung der relativen Ergebnisdifferenzen gegenüber Segelform 2 hervorruft.

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Randausbildung				
						starr		biegeweich		
						LF: s + w _D	LF: w _S	LF: s + w _D	LF: w _S	
						Verf. w _Z [mm]				
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ I	650	500	G _{mittel} = 10	2,0	237,7	-122,1	217,7	-73,7	
		800	650			200,1	-84,4	179,2	-49,4	
		Absolute Differenz Δ [mm]					37,6	37,7	38,5	24,3
		Relative Differenz [%]					15,8	30,9	17,7	33,0
		650	500	G _{mittel} = 10	3,0	225,1	-48,7	204,0	-41,9	
		800	650			188,4	-33,3	168,2	-25,1	
		Absolute Differenz Δ [mm]					36,7	15,4	35,8	16,8
		Relative Differenz [%]					16,3	31,6	17,5	40,1
		650	500	G _{mittel} = 10	4,0	213,8	-57,4	192,4	-50,0	
		800	650			177,2	-41,2	156,7	-33,7	
		Absolute Differenz Δ [mm]					36,6	16,2	35,7	16,3
		Relative Differenz [%]					17,1	28,2	18,6	32,6
	900	600	G _{mittel} = 13	2,0	253,8	-248,0	260,1	-282,0		
	1200	1050			208,2	-123,0	203,2	-177,0		
	Absolute Differenz Δ [mm]					45,6	125,0	56,9	105,0	
	Relative Differenz [%]					18,0	50,4	21,9	37,2	
	900	600	G _{mittel} = 13	3,0	245,9	-185,2	243,4	-121,4		
	1200	1050			200,0	-65,9	185,0	-46,6		
	Absolute Differenz Δ [mm]					45,9	119,3	58,4	74,8	
	Relative Differenz [%]					18,7	64,4	24,0	61,6	
	900	600	G _{mittel} = 13	4,0	238,6	-96,0	231,8	-53,8		
	1200	1050			191,8	-28,7	171,9	-17,6		
	Absolute Differenz Δ [mm]					46,8	67,3	59,9	36,2	
	Relative Differenz [%]					19,6	70,1	25,8	67,3	
	900	550	G _{mittel} = 14,5	2,0	332,7	-382,4	372,1	-463,3		
	1500	1150			227,6	-197,9	260,5	-321,1		
	Absolute Differenz Δ [mm]					105,1	184,5	111,6	142,2	
	Relative Differenz [%]					31,6	48,2	30,0	30,7	
	900	550	G _{mittel} = 14,5	3,0	326,2	-330,6	351,0	-333,1		
	1500	1150			221,7	-162,1	238,4	-209,7		
	Absolute Differenz Δ [mm]					104,5	168,5	112,6	123,4	
	Relative Differenz [%]					32,0	51,0	32,1	37,0	
	900	550	G _{mittel} = 14,5	4,0	320,1	-271,4	335,2	-198,9		
	1500	1150			215,8	-118,9	218,7	-92,0		
	Absolute Differenz Δ [mm]					104,3	152,5	116,5	106,9	
	Relative Differenz [%]					32,6	56,2	34,8	53,7	
1450	1000	G _{mittel} = 15	2,0	286,2	-311,2	354,1	-473,9			
1750	1300			248,0	-241,9	316,3	-416,1			
Absolute Differenz Δ [mm]					38,2	69,3	37,8	57,8		
Relative Differenz [%]					13,3	22,3	10,7	12,2		
1450	1000	G _{mittel} = 15	3,0	281,0	-276,9	331,6	-369,3			
1750	1300			243,2	-215,8	292,1	-323,4			
Absolute Differenz Δ [mm]					37,8	61,1	39,5	45,9		
Relative Differenz [%]					13,5	22,1	11,9	12,4		
1450	1000	G _{mittel} = 15	4,0	275,9	-238,8	308,9	-262,1			
1750	1300			238,3	-184,6	270,6	-222,4			
Absolute Differenz Δ [mm]					37,6	54,2	38,3	39,7		
Relative Differenz [%]					13,6	22,7	12,4	15,1		

Tab. 5.34 Zusammenfassung der Ergebnisse der Verformungen für PVC-beschichtetes Polyestergerewebe

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Randausbildung				
						starr		biegeweich		
						LF: s + w _D	LF: w _S	LF: s + w _D	LF: w _S	
						Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	
Nr. 1 (Gfl. 10 x 10 m, Höhe 4 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	2,0	331,5	-272,9	358,6	-371,4	
		1200	1050			276,4	-157,9	289,7	-258,3	
		Absolute Differenz Δ [mm]					55,1	115,0	68,9	113,1
		Relative Differenz [%]					16,6	42,1	19,2	30,5
Nr. 1 (Gfl. 10 x 10 m, Höhe 4 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	3,0	323,6	-218,4	342,0	-228,9	
		1200	1050			268,2	-112,5	265,1	-143,7	
		Absolute Differenz Δ [mm]					55,4	105,9	76,9	85,2
		Relative Differenz [%]					17,1	48,5	22,5	37,2
Nr. 3 (Gfl. 10 x 10 m, Höhe 6 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	2,0	204,5	-182,7	193,2	-192,4	
		1200	1050			169,3	-78,6	149,2	-75,7	
		Absolute Differenz Δ [mm]					35,2	104,1	44,0	116,7
		Relative Differenz [%]					17,2	57,0	22,8	60,7
Nr. 3 (Gfl. 10 x 10 m, Höhe 6 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	3,0	196,4	-119,3	178,7	-13,4	
		1200	1050			161,1	-8,5	131,9	20,0	
		Absolute Differenz Δ [mm]					35,3	110,8	46,8	33,4
		Relative Differenz [%]					18,0	92,9	26,2	91,8
Nr. 4 (Gfl. 5 x 5 m, Höhe 2,5 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	2,0	120,1	-106,5	111,8	-99,8	
		1200	1050			98,7	-47,1	84,7	-49,2	
		Absolute Differenz Δ [mm]					21,4	59,4	27,1	50,6
		Relative Differenz [%]					17,8	55,8	24,2	50,7
Nr. 4 (Gfl. 5 x 5 m, Höhe 2,5 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	3,0	116,2	-72,7	107,9	-32,8	
		1200	1050			94,6	-20,2	79,8	-3,7	
		Absolute Differenz Δ [mm]					21,6	52,5	28,1	29,1
		Relative Differenz [%]					18,6	72,2	26,0	88,7
Nr. 4 (Gfl. 5 x 5 m, Höhe 2,5 m)	PVC/PES Typ II	900	600	G _{mittel} = 13	4,0	112,6	-29,8	104,6	-23,9	
		1200	1050			90,5	-15,3	76,3	-7,8	
		Absolute Differenz Δ [mm]					22,1	14,5	28,3	16,1
		Relative Differenz [%]					19,6	48,7	27,1	67,4

Tab. 5.35 Zusammenfassung der Ergebnisse der Verformungen für PVC-beschichtetes Polyestergerewebe (Fortsetzung)

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Randausbildung					
						starr		biegeweich			
						LF: s + w _D	LF: w _S	LF: s + w _D	LF: w _S		
						Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ II	1050	800	G _{mittel} = 30	2,0	253,8	-213,3	258,7	-280,5		
		1500	1250			189,4	-139,9	193,4	-224,9		
		Absolute Differenz Δ [mm]					64,4	73,4	65,3	55,6	
		Relative Differenz [%]					25,4	34,4	25,2	19,8	
		1050	800	G _{mittel} = 30	3,0	246,3	-165,6	241,3	-145,2		
		1500	1250			182,9	-99,9	176,1	-99,1		
		Absolute Differenz Δ [mm]					63,4	65,7	65,2	46,1	
		Relative Differenz [%]					25,7	39,7	27,0	31,7	
		1050	800	G _{mittel} = 30	4,0	238,9	-89,4	227,9	-36,9		
		1500	1250			176,6	-36,0	163,4	-7,2		
		Absolute Differenz Δ [mm]					62,3	53,4	64,5	29,7	
		Relative Differenz [%]					26,1	59,7	28,3	80,4	
	PTFE/Glas Typ III	1800 2400	1100	1600	G _{mittel} = 45	2,0	188,7	-266,6	287,4	-411,7	
							148,4	-188,5	196,5	-359,4	
			Absolute Differenz Δ [mm]					40,3	78,1	90,9	52,3
			Relative Differenz [%]					21,4	29,3	31,6	12,7
			1800 2400	1100	1600	G _{mittel} = 45	3,0	185,0	-238,2	214,1	-285,1
								144,8	-165,4	169,0	-248,8
		Absolute Differenz Δ [mm]					40,2	72,8	45,1	36,3	
		Relative Differenz [%]					21,7	30,6	21,1	12,7	
		1800 2400	1100	1600	G _{mittel} = 45	4,0	181,4	-208,0	197,6	-168,0	
							141,1	-139,5	152,9	-125,7	
		Absolute Differenz Δ [mm]					40,3	68,5	44,7	42,3	
		Relative Differenz [%]					22,2	32,9	22,6	25,2	
	PTFE/Glas Typ IV	1900 2100	1250	1850	G _{mittel} = 70	2,0	194,1	-236,1	379,7	-413,1	
							187,8	-148,2	345,0	-314,9	
		Absolute Differenz Δ [mm]					6,3	87,9	34,7	98,2	
		Relative Differenz [%]					3,2	37,2	9,1	23,8	
1900 2100		1250	1850	G _{mittel} = 70	3,0	190,4	-213,3	327,4	-291,0		
						183,4	-125,6	300,8	-215,4		
Absolute Differenz Δ [mm]					7,0	87,7	26,6	75,6			
Relative Differenz [%]					3,7	41,1	8,1	26,0			
1900 2100	1250	1850	G _{mittel} = 70	4,0	186,7	-188,5	284,7	-170,2			
					178,9	-97,9	243,4	-117,4			
Absolute Differenz Δ [mm]					7,8	90,6	41,3	52,8			
Relative Differenz [%]					4,2	48,1	14,5	31,0			

Tab. 5.36 Zusammenfassung der Ergebnisse der Verformungen für PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe

Tab. 5.37 zeigt, dass die Verformungswerte bei einer Berechnung unter Vernachlässigung des Schubmoduls bei der Variation der Dehnsteifigkeiten gegenüber jenen bei einer Berechnung mit Berücksichtigung des Schubmoduls um bis zu ca. 12 % abweichen.

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	starrer Rand								biegeweicher Rand							
					LF: Schnee + Winddruck				LF: Windsog				LF: Schnee + Winddruck				LF: Windsog			
					Verformung				Verformung				Verformung				Verformung			
					w _z [mm]				w _z [mm]				w _z [mm]				w _z [mm]			
G = 13 kN/m		G = 0,1 kN/m		abs. Differenz [mm]	Relative Differenz [%]	G = 13 kN/m		G = 0,1 kN/m		abs. Differenz [mm]	Relative Differenz [%]	G = 13 kN/m		G = 0,1 kN/m		abs. Differenz [mm]	Relative Differenz [%]			
Nr. 2 (Gf. 10 x 10 m, H= 5 m)	PVC/PES Typ II	900	600	2,0	253,8	260,2	6,4	2,5	-248,0	-240,1	7,9	3,3	260,1	286,0	25,9	9,1	-282,0	-276,6	5,4	2,0
		1000	750		237,4	243,7	6,3	2,6	-190,6	-183,3	7,3	4,0	237,6	264,2	26,6	10,1	-236,5	-227,6	8,9	3,9
		1100	900		222,0	228,1	6,1	2,7	-151,7	-144,1	7,6	5,3	218,5	244,6	26,1	10,7	-202,3	-193,8	8,5	4,4
		1200	1050		208,2	213,9	5,7	2,7	-123,0	-115,9	7,1	6,1	203,2	229,7	26,5	11,5	-177,0	-167,8	9,2	5,5
	900	600	3,0	245,9	251,7	5,8	2,3	-185,2	-175,7	9,5	5,4	243,4	259,6	16,2	6,2	-121,4	-124,0	2,6	2,1	
	1000	750		229,0	234,9	5,9	2,5	-129,8	-121,2	8,6	7,1	219,7	236,4	16,7	7,1	-85,5	-87,0	1,5	1,8	
	1100	900		213,7	219,3	5,6	2,6	-92,1	-84,9	7,2	8,5	200,7	217,4	16,7	7,7	-62,2	-63,7	1,5	2,4	
	1200	1050		200,0	205,3	5,3	2,6	-65,9	-59,0	6,9	11,7	185,0	201,6	16,6	8,2	-46,6	-47,2	0,6	1,3	

Tab. 5.37 Ergebnisdifferenzen der Verformungen bei einer Berechnung mit und ohne Berücksichtigung des Schubmoduls

5.4.2 Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit und konstanten Dehnsteifigkeiten

Zugspannungen (Kett- und Schussrichtung)

Bei den Gewebeerorientierungen 0°, 15° und 30° kann noch zwischen Spann- und Tragrichtung nach Abb. 5.5 unterschieden werden. Bei einer um 45° verdrehten Kettrichtung (randparallel) besitzen die Gewebefäden keine Krümmung, da sie den erzeugenden Geraden der Segelfläche entsprechen [12]. Unter Belastung in globaler oder lokaler z-Richtung agieren beide Geweberichtungen als Tragrichtung. Dementsprechend werden bei den folgenden Erläuterungen bei einer Gewebeerorientierung von 45° beide Geweberichtungen als Tragrichtung angesehen.

Anhand von Tab. 5.38 kann festgestellt werden, dass die Spannungen in Tragrichtung durch eine Erhöhung der Schubsteifigkeit tendenziell abfallen. Bei einer Orientierung des Gewebes in den Hauptkrümmungsrichtungen betragen die relativen Ergebnisdifferenzen der Spannungen in Tragrichtung bis zu 2,9 %, was einer absoluten Ergebnisdifferenz von 0,7 kN/m entspricht. Mit zunehmender Verdrehung der Kettrichtung steigen die absoluten und relativen Ergebnisdifferenzen deutlich an und nehmen Werte von bis zu 2,95 kN/m bzw. 10,6 % an.

Tab. 5.38 zeigt, dass eine Schubsteifigkeitserhöhung tendenziell eine Abnahme der Spannungen in Spannrichtung bewirkt. Bei den Spannungen in Spannrichtung stellen sich relative Ergebnisdifferenzen von bis zu 43 % ein, jedoch spielen die absoluten Differenzen von bis zu 0,55 kN/m in Hinblick auf die Tragwerksbemessung keine wesentliche Rolle.

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Gewebeorientierung	starre Ränder				biegeweiche Ränder				
							LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		
							Kette	Schuss	Kette	Schuss	Kette	Schuss	Kette	Schuss	
							n _x	n _y	n _x	n _y	n _x	n _y	n _x	n _y	
							[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	990	810	10,0 17,0	2,0	0°	23,52	2,36	0,00	8,80	24,55	1,82	0,00	8,82	
							23,62	2,03	0,00	8,86	23,85	1,27	0,00	8,82	
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,10	0,33	0,00	0,06	0,70	0,55	0,00	0,00
		Relative Differenz %						0,4	13,9	0,0	0,7	2,9	30,1	0,0	0,0
		990	810	10,0 17,0	2,0	15°	25,07	1,27	0,00	8,26	16,70	0,19	0,00	8,15	
							24,93	1,11	0,00	8,53	17,30	0,19	0,09	8,88	
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,13	0,16	0,00	0,27	0,60	0,00	0,00	0,74
		Relative Differenz %						0,5	12,3	0,0	3,2	3,5	2,3	0,0	8,3
		990	810	10,0 17,0	2,0	30°	28,37	3,88	1,01	13,78	16,53	1,40	1,54	8,09	
							27,93	3,61	0,92	13,20	16,00	1,77	1,46	7,84	
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,43	0,27	0,09	0,58	0,53	0,38	0,08	0,24
		Relative Differenz %						1,5	7,0	9,1	4,2	3,2	21,2	5,0	3,0
		990	810	10,0 17,0	2,0	45°	28,18	22,77	14,60	11,98	11,60	10,15	6,39	4,98	
							27,17	21,92	13,65	11,25	10,90	9,28	6,00	4,45	
Absolute Differenz Δ [kN/m]						1,02	0,85	0,95	0,73	0,71	0,87	0,40	0,52		
Relative Differenz %						3,6	3,7	6,5	6,1	6,1	8,6	6,2	10,6		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ III	2130	1310	40,0 60,0	2,0	0°	38,02	3,71	0,00	10,17					
							38,03	3,36	0,00	10,31					
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,02	0,35	0,00	0,14				
		Relative Differenz %						0,0	9,4	0,0	1,4				
		2130	1310	40,0 60,0	2,0	15°	40,25	2,17	0,00	14,27					
							39,95	1,99	0,00	12,91					
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,30	0,18	0,00	1,36				
		Relative Differenz %						0,7	8,2	0,0	9,5				
		2130	1310	40,0 60,0	2,0	30°	46,62	6,80	0,52	18,03					
							45,30	6,48	0,90	16,35					
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						1,32	0,32	0,39	1,68				
		Relative Differenz %						2,8	4,8	43,0	9,3				
		2130	1310	40,0 60,0	2,0	45°	46,25	31,65	22,13	15,68					
							43,30	29,73	20,03	14,08					
Absolute Differenz Δ [kN/m]						2,95	1,92	2,10	1,60						
Relative Differenz %						6,4	6,1	9,5	10,2						

Tab. 5.38 Zusammenfassung der Ergebnisse der Spannungen (Kett- und Schussrichtung)

Eine Vernachlässigung des Schubmoduls führt bei der Spannungsberechnung tendenziell zu einer Überschätzung der Spannungen gegenüber einer Berechnung mit Berücksichtigung des Schubmoduls (siehe Tab. 5.39). Entspricht die Gewebeerorientierung den Hauptkrümmungsrichtungen treten bei den Spannungen in Tragrichtung absolute Ergebnisdifferenzen von bis zu 0,82 kN/m und relative Ergebnisdifferenzen von bis zu 3,5 % auf. Wird das Gewebe ungleich den Hauptkrümmungsrichtungen orientiert, steigen die absoluten und relativen Ergebnisdifferenzen deutlich an. Es ergeben sich Werte von bis zu 7,60 kN/m bei der absoluten Ergebnisdifferenz und bis zu 27,8 % bei den relativen Ergebnisdifferenzen. Wie zuvor beschrieben, spielen bei den Spannungen in Spannrichtung die absoluten und relativen Ergebnisdifferenzen zwischen den Berechnungen mit und ohne Berücksichtigung eines Schubmoduls aus Sicht der Tragwerksberechnung eine untergeordnete Rolle.

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Gewebeorientierung	starre Ränder				biegeweiche Ränder					
							LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog		LF: Schnee + Winddruck		LF: Windsog			
							Kette	Schuss	Kette	Schuss	Kette	Schuss	Kette	Schuss		
							n _x	n _y	n _x	n _y	n _x	n _y	n _x	n _y		
							[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	990	810	0,1 17,0	2,0	0°	23,00	2,85	0,00	8,64	24,68	2,84	0,00	8,94		
							23,62	2,03	0,00	8,86	23,85	1,27	0,00	8,82		
		Absolute Differenz Δ [kN/m]							0,62	0,82	0,00	0,22	0,82	1,57	0,00	0,12
		Relative Differenz %							2,6	28,7	0,0	2,4	3,3	55,2	0,0	1,3
		990	810	0,1 17,0	2,0	15°	26,55	3,43	0,00	9,86	16,08	0,93	0,00	8,06		
							24,93	1,11	0,00	8,53	17,30	0,19	0,09	8,88		
		Absolute Differenz Δ [kN/m]							1,62	2,32	0,00	1,33	1,23	0,74	0,09	0,82
		Relative Differenz %							6,1	67,6	0,0	13,5	7,1	79,2	100,0	9,2
		990	810	0,1 17,0	2,0	30°	29,10	4,68	1,35	14,60	17,38	1,23	1,30	8,95		
							27,93	3,61	0,92	13,20	16,00	1,77	1,46	7,84		
		Absolute Differenz Δ [kN/m]							1,17	1,07	0,44	1,40	1,38	0,54	0,16	1,11
		Relative Differenz %							4,0	22,8	32,3	9,6	7,9	30,7	11,2	12,3
		990	810	0,1 17,0	2,0	45°	29,57	23,97	16,02	13,10	12,03	11,70	7,27	6,00		
							27,17	21,92	13,65	11,25	10,90	9,28	6,00	4,45		
Absolute Differenz Δ [kN/m]							2,40	2,05	2,37	1,85	1,13	2,42	1,27	1,55		
Relative Differenz %							8,1	8,6	14,8	14,1	9,4	20,7	17,4	25,8		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ III	2130	1310	0,1 60,0	2,0	0°	37,82	4,88	0,00	10,68						
							38,02	3,36	0,00	10,31						
		Absolute Differenz Δ [kN/m]							0,20	1,52	0,00	0,37				
		Relative Differenz %							0,5	31,1	0,0	3,5				
		2130	1310	0,1 60,0	2,0	15°	40,98	2,62	0,00	13,64						
							39,95	1,99	0,00	12,91						
		Absolute Differenz Δ [kN/m]							1,03	0,63	0,00	0,73				
		Relative Differenz %							2,5	24,0	0,0	5,4				
		2130	1310	0,1 60,0	2,0	30°	49,22	7,80	1,93	21,40						
							45,30	6,48	0,90	16,35						
		Absolute Differenz Δ [kN/m]							3,92	1,32	1,02	5,05				
		Relative Differenz %							8,0	16,9	53,1	23,6				
		2130	1310	0,1 60,0	2,0	45°	49,78	35,88	27,63	19,50						
							43,30	29,73	20,03	14,08						
Absolute Differenz Δ [kN/m]							6,48	6,15	7,60	5,42						
Relative Differenz %							13,0	17,1	27,5	27,8						

Tab. 5.39 Ergebnisdifferenzen der Spannungen (Kett- und Schussrichtung) bei einer Berechnung mit und ohne Berücksichtigung des Schubmoduls

Schubspannungen

Tab. 5.40 zeigt, dass eine Erhöhung der Schubsteifigkeit zu einem Anstieg der Schubspannungen führt. Bei einer den Hauptkrümmungsrichtungen entsprechenden Gewebeorientierung (Winkel 0°) ergeben sich im Auslesebereich Schubspannungen von bis zu ca. 0,8 % der maximalen Zugspannung des jeweiligen Lastfalls. Bei einem Winkel der Kettrichtung von 0° stellt sich eine relative Ergebnisdifferenz der Schubspannungen von bis zu 25 % ein, jedoch haben die absoluten Ergebnisdifferenzen von bis zu 0,03 kN/m keine Relevanz für die Tragwerksberechnung.

Je weiter die Gewebeorientierung von den Hauptkrümmungsrichtungen abweicht, desto größer werden die Schubspannungen und erreichen bei einer um 45° verdrehten Kettrichtung bis zu ca. 20 % (PVC/PES) und bis zu ca. 26 % (PTFE/Glas) der maximalen Zugspannung.

Sobald die Gewebeerorientierung nicht den Hauptkrümmungsrichtungen entspricht, nehmen die Ergebnisdifferenzen der Schubspannungen deutlich zu. Für die absolute Ergebnisdifferenz ergeben sich Werte von bis zu ca. 2 kN/m und die relativen Ergebnisdifferenzen können bis zu 60 % betragen.

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Gewebeerorientierung	Randausbildung				
							starr		biegeweich		
							LF: s + w _D	LF: w _S	LF: s + w _D	LF: w _S	
							Schub n _{xy} [kN/m]	Schub n _{xy} [kN/m]	Schub n _{xy} [kN/m]	Schub n _{xy} [kN/m]	
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	990	810	10,0 17,0	2,0	0°	0,06	0,03	0,21	0,00	
							0,08	0,04	0,24	0,00	
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,02	0,01	0,03	0,00
		Relative Differenz %						25,0	25,0	12,5	0,0
		990	810	10,0 17,0	2,0	15°	0,21	0,06	1,26	0,18	
							0,40	0,10	1,86	0,39	
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,19	0,04	0,60	0,21
		Relative Differenz %						47,5	40,0	32,3	53,8
		990	810	10,0 17,0	2,0	30°	0,84	0,59	1,60	1,57	
							1,42	0,95	2,55	2,21	
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,58	0,36	0,95	0,64
		Relative Differenz %						40,8	37,9	37,3	29,0
990	810	10,0 17,0	2,0	45°	1,38	0,99	2,19	1,59			
					2,28	1,58	3,53	2,37			
Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,90	0,59	1,34	0,78		
Relative Differenz %						39,5	37,3	38,0	32,9		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ III	2130	1310	40,0 60,0	2,0	0°	0,11	0,08			
							0,12	0,09			
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,01	0,01		
		Relative Differenz %						8,3	11,1		
		2130	1310	40,0 60,0	2,0	15°	0,83	0,10			
							1,28	0,25			
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						0,45	0,15		
		Relative Differenz %						35,2	60,0		
		2130	1310	40,0 60,0	2,0	30°	2,73	1,83			
							3,92	2,13			
		Absolute Differenz Δ [kN/m]						1,19	0,30		
		Relative Differenz %						30,4	14,1		
2130	1310	40,0 60,0	2,0	45°	4,65	3,16					
					6,62	4,27					
Absolute Differenz Δ [kN/m]						1,97	1,11				
Relative Differenz %						29,8	26,0				

Tab. 5.40 Zusammenfassung der Ergebnisse der Schubspannungen

Weiters kann beobachtet werden, dass die Schubspannungen beim Segel mit biegeweichen Rändern höher sind als bei jenem mit starren Rändern. Dieser Effekt lässt sich durch die unterschiedlich starke Veränderung der Hauptspannungsrichtungen bei Erhöhung des Schubmoduls zwischen starrer und biegeweicher Randausbildung erklären.

Die Folgen einer Vernachlässigung des Schubmoduls werden dann tragend, wenn die Gewebeerorientierung von den Hauptkrümmungsrichtungen abweicht. Denn wird bei verdrehter Ket-

trichtung ein Schubmodul berücksichtigt, nehmen die Schubspannungen durchaus signifikante Werte an, die im Zuge der Tragwerksanalyse nicht zu vernachlässigen sind.

Verformungen

Die in Tab. 5.41 dargestellten Resultate zeigen, dass eine Erhöhung der Schubsteifigkeit tendenziell eine Reduktion der Verformung zur Folge hat. Entspricht die Gewebeerorientierung den Hauptkrümmungsrichtungen (Winkel 0°) können sich relative Ergebnisdifferenzen von bis zu 2,8 % ergeben. Das entspricht einer absoluten Ergebnisdifferenz von 6,9 mm. Die relativen Ergebnisdifferenzen steigen bis zu einem Wert von 15,2 % an, sobald die Gewebeerorientierung von den Hauptkrümmungsrichtungen abweicht.

Form	Material	E_{KETTE} [kN/m]	E_{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Gewebeerorientierung	Randausbildung				
							starr		biegeweich		
							LF: s + w _D	LF: w _s	LF: s + w _D	LF: w _s	
							Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	990	810	10,0 17,0	2,0	0°	244,4	-163,2	242,3	-211,2	
							241,4	-166,4	235,4	-212,1	
		Absolute Differenz Δ [mm]						3,0	3,2	6,9	0,9
		Relative Differenz %						1,2	1,9	2,8	0,4
		990	810	10,0 17,0	2,0	15°	279,5	-167,9	586,4	-236,6	
							276,8	-174,0	531,4	-254,3	
		Absolute Differenz Δ [mm]						2,7	6,1	55,0	17,7
		Relative Differenz %						1,0	3,5	9,4	7,0
		990	810	10,0 17,0	2,0	30°	455,3	-230,9	954,8	-456,4	
							443,3	-216,2	899,7	-408,3	
		Absolute Differenz Δ [mm]						12,0	14,7	55,1	48,1
		Relative Differenz %						2,6	6,4	5,8	10,5
990	810	10,0 17,0	2,0	45°	670,0	-438,6	1226,0	-717,7			
					647,8	-408,2	1147,0	-608,9			
Absolute Differenz Δ [mm]						22,2	30,4	79,0	108,8		
Relative Differenz %						3,3	6,9	6,4	15,2		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ III	2130	1310	40,0 60,0	2,0	0°	162,6	-230,2			
							160,2	-234,4			
		Absolute Differenz Δ [mm]						2,4	4,2		
		Relative Differenz %						1,5	1,8		
		2130	1310	40,0 60,0	2,0	15°	194,3	-202,7			
							191,4	-210,4			
		Absolute Differenz Δ [mm]						2,9	7,7		
		Relative Differenz %						1,5	3,7		
		2130	1310	40,0 60,0	2,0	30°	338,3	-210,6			
							324,7	-202,7			
		Absolute Differenz Δ [mm]						13,6	7,9		
		Relative Differenz %						4,0	3,8		
2130	1310	40,0 60,0	2,0	45°	550,9	-337,9					
					519,2	-296,2					
Absolute Differenz Δ [mm]						31,7	41,7				
Relative Differenz %						5,8	12,3				

Tab. 5.41 Zusammenfassung der Ergebnisse der Verformungen

Bei der Verformungsberechnung führt eine Vernachlässigung des Schubmoduls (siehe Tab. 5.42) tendenziell zu einer Überschätzung der Verformungen gegenüber der Berechnung mit Berücksichtigung des Schubmoduls. Bei einem Winkel der Kettrichtung von 0° können bereits relative Ergebnisdifferenzen von bis zu 11,3 % erwartet werden. Weicht die Gewebeorientierung von den Hauptkrümmungsrichtungen ab, steigen die relativen Ergebnisdifferenzen deutlich an und es ergeben sich Werte von bis zu 32,3 %.

Form	Material	E _{KETTE} [kN/m]	E _{SCHUSS} [kN/m]	G [kN/m]	Vorspannung [kN/m]	Gewebeorientierung	Randausbildung				
							starr		biegeweich		
							LF: s + w _D	LF: w _s	LF: s + w _D	LF: w _s	
							Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	Verf. w _z [mm]	
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PVC/PES Typ II	990	810	0,1 17,0	2,0	0°	249,8	-157,1	265,3	-203,6	
							241,4	-166,4	235,4	-212,1	
		Absolute Differenz Δ [mm]						8,4	9,3	29,9	8,5
		Relative Differenz %						3,4	5,6	11,3	4,0
		990	810	0,1 17,0	2,0	15°	283,5	-157,8	701,3	-211,9	
							276,8	-174,0	531,4	-254,3	
		Absolute Differenz Δ [mm]						6,7	16,2	169,9	42,4
		Relative Differenz %						2,4	9,3	24,2	16,7
		990	810	0,1 17,0	2,0	30°	474,1	-254,1	1026,0	-583,4	
							443,3	-216,2	899,7	-408,3	
		Absolute Differenz Δ [mm]						30,8	37,9	126,3	175,1
		Relative Differenz %						6,5	14,9	12,3	30,0
		990	810	0,1 17,0	2,0	45°	674,9	-433,1	1346,0	-899,4	
							647,8	-408,2	1147,0	-608,9	
Absolute Differenz Δ [mm]						27,1	24,9	199,0	290,5		
Relative Differenz %						4,0	5,7	14,8	32,3		
Nr. 2 (Grundfläche 10 x 10 m, Höhe 5 m)	PTFE/Glas Typ III	2130	1310	0,1 60,0	2,0	0°	169,5	-226,3			
							160,2	-234,4			
		Absolute Differenz Δ [mm]						9,3	8,1		
		Relative Differenz %						5,5	3,5		
		2130	1310	0,1 60,0	2,0	15°	200,7	-197,7			
							191,4	-210,4			
		Absolute Differenz Δ [mm]						9,3	12,7		
		Relative Differenz %						4,6	6,0		
		2130	1310	0,1 60,0	2,0	30°	369,4	-239,9			
							324,7	-202,7			
		Absolute Differenz Δ [mm]						44,7	37,2		
		Relative Differenz %						12,1	15,5		
		2130	1310	0,1 60,0	2,0	45°	617,2	-429,9			
							519,2	-296,2			
Absolute Differenz Δ [mm]						98,0	133,7				
Relative Differenz %						15,9	31,1				

Tab. 5.42 Ergebnisdifferenzen der Verformungen bei einer Berechnung mit und ohne Berücksichtigung des Schubmoduls

6.1 Zusammenfassung

Gewebemembranen stellen flächige, biegeeweiche Werkstoffe dar, die durch das Verweben von Fasern bzw. Fäden entstehen. Zur Gewebeerstellung können Naturfasern und Synthetikfasern verwendet werden. Während natürliche Fasern in ihrer Länge beschränkt sind, handelt es sich bei Synthetikfasern um Endlosfasern. Mittels fadenbildender Technologie werden aus den Fasern Fäden für die spätere Gewebeerstellung erzeugt. Zur Flächenbildung des Gewebes bestehen verschiedene Webarten um die Fäden miteinander zu verkreuzen. Die Eigenschaften des unbeschichteten Gewebes können durch das Aufbringen einer Beschichtung verändert und verbessert werden. Die gängigsten Beschichtungsmaterialien sind Polyvinylchlorid (PVC), Polytetrafluorethylen (PTFE) und Silikon. Bei mechanisch vorgespannten Membrantragwerken werden PVC-beschichtete Polyestergewebe und PTFE-beschichtete Glasfasergewebe am häufigsten verwendet.

Für die statische Berechnung von Membrantragwerken ist das **Materialverhalten** bei Beanspruchungen unter Last, Zeit und Temperatur von wesentlicher Bedeutung. Das Materialverhalten kann nicht mit jenem konventioneller biegestarrer Werkstoffe verglichen werden. Mit Ausnahme von Holz, kann bei den klassischen Baumaterialien eine linear-elastische und isotrope Kraft-Dehnungsbeziehung angenommen werden. Beschichtete Gewebe, wie sie bei Membrankonstruktionen zum Einsatz kommen, weisen ein nichtlineares, anisotropes und nichtelastisches Materialverhalten auf, dass noch dazu multifaktoriell abhängig ist.

Dieses komplexe Materialverhaltens kann in der praktischen Tragwerksanalyse nicht vollständig exakt abgebildet werden. Zur rechnerischen Modellierung des Materialverhaltens stehen Strukturmodell und phänomenologische Modelle zu Verfügung. Aufgrund der deutlich geringeren Rechenintensität hat sich in der Tragwerksplanung die phänomenologische **Materialmodellierung** durchgesetzt. In der Literatur sind 3 verschiedene phänomenologische Ansätze zu finden: linear-elastisch, multilinear-elastisch und nichtlinear. In der derzeitigen Membranbaupraxis wird das linear-elastische Materialmodell am häufigsten verwendet.

Die für das linear-elastische Materialmodell benötigten Materialparameter, können versuchs-technisch bestimmt werden. Durch das Fehlen von einheitlichen Regelungen zur **versuchstechnischen Bestimmung von Materialkennwerten**, finden sich in der Literatur eine

Vielzahl an Versuchsdurchführungen und Auswertungsmethoden. Diese Methoden zur versuchstechnischen Bestimmung von Materialkennwerten können in einachsige bzw. zweiachsige, fadenparallele Zugversuche zur Bestimmung der Dehnsteifigkeiten und Schubversuche zur Bestimmung der Schubsteifigkeiten eingeteilt werden. Diese breite Palette an Versuchs- und Auswertungsmethoden hat zur Folge, dass sich für ein und dasselbe Membranbauprodukt unterschiedliche Steifigkeitskennwerte ergeben. Zur Bestimmung der materialspezifischen Streubreite der Steifigkeitskennwerte (Steifigkeitskennwertspektrum) wurde eine Recherche in der einschlägigen Literatur durchgeführt und Erfahrungs- bzw. Messwerte von Planungsbüros, Materialherstellern und Prüfanstalten gesammelt.

Die **Parameterstudie** hat die Aufgabe, die Auswirkungen von materialspezifischen Streuungen in den Steifigkeitskennwerten (Dehn- und Schubsteifigkeiten) verschiedener beschichteter Gewebemembranen auf die Spannung- und Verformungsberechnung zu demonstrieren. Dazu wurden einerseits Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, konstanter Schubsteifigkeit und Gewebeorientierung in den Hauptkrümmungsrichtungen und andererseits Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit, konstanten Dehnsteifigkeiten und variabler Gewebeorientierung durchgeführt. Darüber hinaus wurden weitere Parameter wie Segelform (Randausbildung, Krümmung und Größe) und Membranvorspannung variiert. Die Beurteilung der Auswirkungen erfolgt dabei über absolute und relative Ergebnisdifferenzen.

Die durchgeführten Untersuchungen mit **Variation der Dehnsteifigkeiten und konstanter Schubsteifigkeit** zeigen, dass eine Erhöhung der Dehnsteifigkeiten überwiegend zu einem Anstieg der Spannungen in Tragrichtung und einer Reduktion der Verformungen führt. Die Dimension der relativen Differenzen der Ergebniswerte (Spannung und Verformung) ist vom Material, Gewebetyp und den zugehörigen Steifigkeitskennwertspektren abhängig. Für die Kettspannungen (Tragrichtung) ergeben sich relative Ergebnisdifferenzen von bis zu ca. 9 %, Bei den Schussspannungen (Tragrichtung) beträgt die relative Ergebnisdifferenz bis zu ca. 8 %. Bei den Verformungen können sich relative Ergebnisdifferenzen von bis zu ca. 93 % einstellen.

Zusätzlich bewirkt eine Variation der Segelform (Größe und Krümmung) bei den Ergebniswerten für den Lastfall „Windsog“ - bedingt durch die Unterschiede in den „Druckausfallbereichen“ der verschiedenen Segelformen - geringfügige (Spannungen) bzw. wesentliche (Verformungen) Änderungen der relativen Ergebnisdifferenzen. Zudem konnte beobachtet werden, dass sich eine Variation der Vorspannung lediglich auf die relativen Ergebnisdifferenz der Verformung auswirkt.

Die durchgeführten Untersuchungen mit **Variation der Schubsteifigkeit und konstanten Dehnsteifigkeiten** zeigen, dass eine Erhöhung der Schubsteifigkeit tendenziell zu einem Abfall der Spannungen in Kett- und Schussrichtung, aber zu einem Anstieg der Schubspannungen führt. Bei den Verformungen führt eine Erhöhung der Schubsteifigkeit überwiegend zu einer Reduktion der Verformungswerte. Bei einer Orientierung des Gewebes in den Hauptkrümmungsrichtungen (Winkel von 0°) stellen sich relative Ergebnisdifferenzen von bis zu ca. 3 % bei den Spannungen in Tragrichtung und den Verformungen. Die relativen Ergebnisdifferenzen nehmen deutlich zu, wenn die Gewebeorientierung nicht den Hauptkrümmungsrich-

tungen entspricht und erreichen Werte von bis zu ca. 11 % bei den Spannungen in Tragrichtung und bis zu ca. 15 % bei den Verformungen.

Bei einem Winkel der Kettrichtung von 0° betragen die Schubspannungen im Auslesebereich ca. 1 % der maximalen Zugspannung des jeweiligen Lastfalls. Die Schubspannungen steigen mit zunehmender Verdrehung der Kettrichtung an und nehmen bei einem Winkel von 45° Werte von bis zu ca. 26 % der maximalen Zugspannung an. Während die relativen Ergebnisdifferenzen der Schubspannungen bei einem Winkel der Kettrichtung von 0° aus Sicht der Tragwerksberechnung keine wesentliche Rolle spielen, nehmen die relativen Ergebnisdifferenzen deutlich zu, sobald die Gewebeerorientierung von den Hauptkrümmungsrichtungen abweicht. Es können Werte von bis zu 60 % erreicht werden.

Bei einer Gewebeerorientierung in den Hauptkrümmungsrichtungen stellen sich durch eine **Vernachlässigung des Schubmoduls** relative Ergebnisdifferenzen der Spannungen in Tragrichtung gegenüber einer Berechnung mit Berücksichtigung des Schubmoduls von bis zu ca. 4 % ein. Bei den Verformungen betragen die relativen Ergebnisdifferenzen bis zu ca. 12 %. Wenn die Gewebeerorientierung nicht den Hauptkrümmungsrichtungen entspricht, nehmen die relativen Ergebnisdifferenzen deutlich zu und können bei den Spannungen in Tragrichtung Werte von bis zu ca. 28 % und bei den Verformungen bis zu ca. 32 % erreichen. Im Vergleich zu einer Berechnung unter Vernachlässigung des Schubmoduls können die Schubspannungen bei einer Berechnung mit Berücksichtigung des Schubmoduls durchaus beträchtliche Werte annehmen, die im Zuge der Tragwerksanalyse nicht vernachlässigt werden sollten. Bei der Spannungsberechnung wäre eine vereinfachende Modellierung der Membranoberfläche mit Stabelementen (Vernachlässigung des Schubmoduls) möglich, sofern aus Sicht des jeweiligen Membranbauprojekts eine Ergebnisdifferenz der Spannungen in Tragrichtung von bis zu 4 % vertretbar ist. Bei der Berechnung der Verformungen und Schubspannungen sowie bei Membrantragwerken mit einer von den Hauptkrümmungsrichtungen abweichenden Gewebeerorientierung ist in jedem Fall die Modellierung der Membranoberfläche mit Flächenelementen (Berücksichtigung des Schubmoduls) einer Modellierung mit Stabelementen vorzuziehen.

6.2 Ausblick

Bedingt durch das Fehlen umfassender Regelwerke für Membrantragwerke, findet sich eine Vielzahl an Versuchs- und Auswertungsmethoden zur Bestimmung der Materialkennwerte (Dehn- und Schubsteifigkeiten) von Membranwerkstoffen. Je nach Kombination der Versuchs- und Auswertungsmethode ergibt sich für ein und dasselbe Membranbauprodukt ein breites Spektrum an Materialkennwerten. Die Resultate der durchgeführten Parameterstudie haben gezeigt, dass sich diese Streuungen in den Materialkennwerten wesentlich auf die Ergebnisse der Spannungs- und Verformungsberechnung auswirken können. Es bestehen nun unterschiedliche Möglichkeiten um zukünftig auf die oben beschriebene Problemstellung zu reagieren.

Die Bandbreite an Materialkennwerten, aber auch die sich daraus ergebenden Ergebnisdifferenzen bei der Tragwerksberechnung von Membrankonstruktionen, könnten durch die Ent-

wicklung und Einführung einheitlicher Regelwerke zum Entwurf von Membrantragwerken sowie zur Materialprüfung von Membranwerkstoffen (Versuchs- und Auswertungsmethoden) reduziert werden. Bei der Entwicklung derartiger Regelwerke muss besonders auf das nicht-lineare Materialverhalten von Membranwerkstoffen und dessen multifaktorielle Abhängigkeit (Last, Fadeninteraktion, Gewebestruktur, etc.) Rücksicht genommen werden. Eine weitere Möglichkeit den Streuungen der Materialkennwerte zufolge der verschiedenen Versuchs- und Auswertungsmethoden in der Tragwerksberechnung zu begegnen, besteht in der Erarbeitung eines auf Membranwerkstoffe abgestimmten Bemessungskonzepts, in dem z.B. für die verschiedenen Versuchsmethoden ein entsprechender Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite vorgeschlagen wird. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit könnte auf die Streuung der Materialkennwerte mit einer Reduktion der Dehnsteifigkeiten um 20 bis 30 % bei der Verformungsberechnung reagiert werden. Aber auch die Implementierung anderer phänomenologischer Materialmodelle wie z.B. multi-elastische oder nichtlineare Ansätze in den gängigen Softwareprogrammen sowie die Weiterentwicklung von Strukturmodellen stellen weitere Lösungsansätze dar.

In der derzeitigen Membranbaupraxis werden - sofern Versuche durchgeführt werden - fast ausschließlich Versuche zur Bestimmung der Dehnsteifigkeiten durchgeführt und die Schubsteifigkeiten des Membranprodukts bleiben meist unbestimmt. Dadurch sind in der einschlägigen Literatur nur wenige Schubsteifigkeitskennwerte vorhanden. Zukünftig sollte verstärkt eine Kopplung der Schubversuche an die Zugversuche zur Bestimmung der Dehnsteifigkeiten erfolgen.

Weiters zeigen die Resultate der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit, dass die Schubspannungen bei einer von den Hauptkrümmungsrichtungen abweichenden Gewebeorientierung aus Sicht der Tragwerksberechnung nicht zu vernachlässigende Werte annehmen. Da zurzeit weder in der einschlägigen Literatur noch von den Materialherstellern selbst Angaben über den Bemessungswert der Schubfestigkeit von Membranwerkstoffen gemacht werden, besteht hier ein wesentlicher Entwicklungsbedarf.

Zusätzlich zu den in der Parameterstudie durchgeführten Berechnungen könnten noch folgende weiterführende Untersuchungen angestellt werden:

- Vorspannungsverhältnis zwischen Kett- und Schussrichtung ungleich 1:1
- zusätzliche Variation von Größe und Krümmung der Membranfläche
- andere mechanisch vorgespannte Systeme wie z.B. punkt- und bogengestützte Flächen
- pneumatisch vorgespannte Systeme
- Variation der Vorspannung und Segelform bei den Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit
- Auswirkungen von Materialkennwertstreuungen auf die Beanspruchung des Primärtragwerks

LITERATURVERZEICHNIS

Bücher und Zeitschriften

- [1] BALLHAUSE, D.; Diskrete Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Gewebemembranen. - Dissertation an der Universität Stuttgart, 2007
- [2] BAUMANN, Th.; Statisch-konstruktive Eigenschaften von PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe. - Bauingenieur 77 (2002), Heft 4, Seite 158-166
- [3] BLUM, R. und BIDMON, W.; Spannungs-Dehnungsverhalten von Bautextilien, Theorie und Experiment. - SFB 64-Mitteilungen, Heft 74 (1987), Universität Stuttgart
- [4] BLUM, R.; Zeltbaumaterialien. - in: BRINKMANN (Hrsg.); Leicht und weit - Zur Konstruktion weitgespannter Flächentragwerke. - Ergebnisse aus dem SFB 64, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1990. ISBN 3-527-27711-0
- [5] BÖGNER, H.B.; Vorgespannte Konstruktionen aus beschichteten Geweben und die Rolle des Schubverhaltens bei der Bildung von zweifach gekrümmten Flächen aus ebenen Streifen. - Dissertation an der Technischen Universität Stuttgart, 2004
- [6] BRIGENS, B. und BRICHALL, M.; Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures. - Engineering Structures 44 (2012), Seite 1-12
- [7] FORSTER, B. und MOLLAERT, M.; European Design Guide for Tensile Surface Structures. - Tensinet, 2004. ISBN 90-8086-871-X
- [8] FREI, O., et al. (Hrsg.); Lufthallenhandbuch. - Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 1983. ISBN 3-7828-2015-0
- [9] GALLIOT, C. und LUCHSINGER, R.H.; A simple model describing the non-linear biaxial tensile behavior of PVC-coated polyester fabrics for use in finite element analysis. - Composite Structures 90 (2009), Heft 4, Seite 438-447
- [10] GALLIOT, C. und LUCHSINGER, R.H.; The shear ramp: A new test method for the investigation of coated fabric shear behaviour - Part I: Theory. - Composites: Part A 41 (2010), Seite 1743-1749
- [11] GALLIOT, C. und LUCHSINGER, R.H.; The shear ramp: A new test method for the investigation of coated fabric shear behaviour - Part II: Experimental validation. - Composites: Part A 41 (2010), Seite 1750-1759
- [12] GÖPPERT, K. und BALZ, M.; Membrantragwerke, Stahlbau-Kalender, Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2009. ISBN 978-3-433-02909-1
- [13] GOSLING, P.D., et al.; Analysis and design of membrane structures: Results of a round robin exercise. - Engineering Structures 48 (2013), Seite 313-328
- [14] HOPPE, D.S.; Freigespannte textile Membrankonstruktionen. - Böhlau Verlag, 2007. ISBN 978-3-205-77328-3
- [15] KNIPPERS, J., et al.; Atlas Kunststoffe + Membranen. - München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2010. ISBN 978-3-920034-41-6
- [16] KLOFT, H. und MÄHL, F.; Seil- und Membrankonstruktionen. - Leichtbau- Seminar der Technischen Universität Kaiserslauten, 2003
- [17] MORITZ, K.; Membranwerkstoffe im Hochbau. - Detail Serie 6 (2000), Seite 643-651

-
- [18] MÜNSCH, R. und REINHARDT, H.-W.; Zur Berechnung von Membrantragwerken aus beschichteten Geweben mit Hilfe genäherter elastischer Materialparameter. - Bauingenieur 70 (1995), Seite 271-275
- [19] PAWLOWSKI, R.; Definition der Membran. - Seminar Membranbauwerke, Universität Stuttgart, Institut für Baukonstruktionen, 1994
- [20] REINHARDT, H.-W.; Ein- und zweiachsige Verformungs- und Festigkeitsuntersuchungen an einem beschichteten Gittergewebe. - Universität Stuttgart Mitteilungen 31/1975
- [21] SCHRÖDER, J., et al.; Membranstrukturen mit nicht-linearem anisotropen Materialverhalten - Aspekte der Materialprüfung und der numerischen Simulation. - Bauingenieur 86 (2011), Heft 9, Seite 381-389
- [22] SEIDEL, M.; Textile Hüllen - Bauen mit biegeweichen Tragelementen. - Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2008. ISBN 978-3-433-01865-1
- [23] SIEDER, M.; Der 5. Baustoff - Bauen mit Membranen. - Baukonstruktion 90 (2013), Heft 4, Seite 217-218
- [24] SOBEK, W. und SPETH, M.; Von der Faser zum Gewebe. - DBZ (1993), Heft 9, Seite 74-81
- [25] STRANGHÖNER, N. und UHLEMANN, J.; Möglichkeiten und Grenzen bei der Erfassung des Materialverhaltens von Gewebemembranen in der Tragwerksplanung. - in: Essener Membranbau Symposium 2012, Aachen: Shaker Verlag, 2012. ISBN 978-3-8440-1348-1
- [26] TRITTHARDT, J. und AYRLE, H.; Textile Fassadensysteme. - Baukultur (1999), Heft 2
- [27] UHLEMANN, J., et al.; Effects on Elastic Constants of Technical Membranes Applying the Evaluation Methods of MSAJ/M-02-1995. - Proceedings of the International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Barcelona, 2011
- [28] UHLEMANN, J. und STRANGHÖNER, N.; Einfluss fiktiver elastischer Konstanten von textilen Gewebemembranen in der Tragwerksanalyse von Membranstrukturen. - Stahlbau 82 (2013), Heft 9, Seite 643-651
- [29] WAKEFIELD, D.; Grundlagen und Berechnung von Membrankonstruktionen. - in: KOCH (Hrsg.); Bauen mit Membranen. - München: Prestel Verlag, 2004. ISBN 3-7913-3048-9
- [30] ZELLINGER, M.; Zur Formfindung, Berechnung und Konstruktion von Membrantragwerken. - Dissertation an der Technischen Universität Graz, 2005

Normen

- [31] DIN 4134 „Tragluftbauten. Berechnung, Ausführung und Betrieb.“, 1983
- [32] MSAJ/M-02-1995 „Testing Method for Elastic Constants of Membrane Materials“, 1995
- [33] ASCE/SEI 55-10 „Tensile Membrane Structures“, 2010
- [34] ÖNORM EN 13782 „Fliegende Bauten - Zelte - Sicherheit“, 2006

Datenblätter

- [35] Richtwerttabelle „Materialkennwerte für Membrane und Folien“ des Unternehmens formTL, vom 26.05.2014

Software und Manuels

- [36] <http://www.sofistik.de/index.php?id=682>; Version 13.01 - 27
- [37] o. V.; ASE-Handbuch - Allgemeine Statik finiter Element-Strukturen. - Version 27.01, SOFISTIK AG, Oberschleissheim, 2011
- [38] TECHNET GmbH; Easy Training Manuel.

Materialhersteller

- [39] <http://de.sergeferrari.com/>, 18.10.2014
- [40] <http://de.sergeferrari.com/corporate-de/die-patentrechtlich-geschutzte-technologie-precontraint-serge-ferrari/>, 18.10.2014

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2.1	Mechanische Eigenschaften einiger Synthesefasern [24]	8
Tab. 2.2	Klassifikation und Eigenschaften von den am häufigsten verwendeten beschichteten Gewebemembranen [30]	18
Tab. 4.1	Steifigkeitskennwerte, links: PVC/PES Typ I [8], [9], [11] [14], [18], [35], [38]	41
Tab. 4.2	Steifigkeitskennwerte für PVC/PES Typ II [9], [11], [18], [35], [38]	42
Tab. 4.3	Steifigkeitskennwerte für PVC/PES Typ III [9], [11], [25], [35], [38]	42
Tab. 4.4	Steifigkeitskennwerte für PVC/PES Typ IV [9], [11], [35], [38]	42
Tab. 4.5	Steifigkeitskennwerte für PTFE/Glas Typ II [35]	42
Tab. 4.6	Steifigkeitskennwerte für PTFE/Glas Typ III [11], [18], [35]	43
Tab. 4.7	Steifigkeitskennwerte für PTFE/Glas Typ IV [35]	43
Tab. 4.8	Standardabweichungen der Materialkennwerte, oben: PVC/PES, unten: PTFE/Glas	44
Tab. 5.1	Segelformen	46
Tab. 5.2	Bemessungswiderstände für Gewebemembranen	47
Tab. 5.3	Ausgewählte Steifigkeitsspektren für verschiedene Gewebemembranen	49
Tab. 5.4	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 1, PVC/PES Typ II	50
Tab. 5.5	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ I	51
Tab. 5.6	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ II	51
Tab. 5.7	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten unter Vernachlässigung des Schubmoduls bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ II	52
Tab. 5.8	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ II	52
Tab. 5.9	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ III	53
Tab. 5.10	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 2, PVC/PES Typ IV	53
Tab. 5.11	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 2, PTFE/Glas Typ II	54
Tab. 5.12	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 2, PTFE/Glas Typ III	54
Tab. 5.13	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit bei starrer Randausbildung für Segelform 2, PTFE/Glas Typ III	55
Tab. 5.14	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 2, PTFE/Glas Typ IV	55
Tab. 5.15	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 3, PVC/PES Typ II	56
Tab. 5.16	Durchgeführte Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten bei starrer und biege-weicher Randausbildung für Segelform 4, PVC/PES Typ II	56

Tab. 5.17	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ II	61
Tab. 5.18	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ I	62
Tab. 5.19	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ II	62
Tab. 5.20	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten unter Vernachlässigung des Schubmoduls ($G = 0,1 \text{ kN/m}$), PVC/PES Typ II	63
Tab. 5.21	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ III ...	63
Tab. 5.22	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ IV ..	64
Tab. 5.23	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PTFE/Glas Typ II ..	64
Tab. 5.24	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PTFE/Glas Typ III .	65
Tab. 5.25	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PTFE/Glas Typ IV	65
Tab. 5.26	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ II	66
Tab. 5.27	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten, PVC/PES Typ II	66
Tab. 5.28	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit für starre Randausbildung, PVC/PES Typ II	67
Tab. 5.29	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit für biegegewiche Randausbildung, PVC/PES Typ II	67
Tab. 5.30	Ergebnisse der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit, PTFE/Glas Typ III ...	68
Tab. 5.31	Zusammenfassung der Ergebnisse der Spannungen in Tragrichtung bei 3 kN/m Vorspannung für PVC-beschichtetes Polyester-gewebe	70
Tab. 5.32	Zusammenfassung der Ergebnisse der Spannungen in Tragrichtung bei 3 kN/m Vorspannung für PTFE-beschichtetes Glasfaser-gewebe	71
Tab. 5.33	Ergebnisdifferenzen der Spannungen in Tragrichtung bei einer Berechnung mit und ohne Berücksichtigung des Schubmoduls	73
Tab. 5.34	Zusammenfassung der Ergebnisse der Verformungen für PVC-beschichtetes Polyester-gewebe	75
Tab. 5.35	Zusammenfassung der Ergebnisse der Verformungen für PVC-beschichtetes Polyester-gewebe (Fortsetzung)	76
Tab. 5.36	Zusammenfassung der Ergebnisse der Verformungen für PTFE-beschichtetes Glasfaser-gewebe	77
Tab. 5.37	Ergebnisdifferenzen der Verformungen bei einer Berechnung mit und ohne Berücksichtigung des Schubmoduls	78
Tab. 5.38	Zusammenfassung der Ergebnisse der Spannungen (Kett- und Schussrichtung)	79
Tab. 5.39	Ergebnisdifferenzen der Spannungen (Kett- und Schussrichtung) bei einer Berechnung mit und ohne Berücksichtigung des Schubmoduls	80
Tab. 5.40	Zusammenfassung der Ergebnisse der Schubspannungen	81
Tab. 5.41	Zusammenfassung der Ergebnisse der Verformungen	82
Tab. 5.42	Ergebnisdifferenzen der Verformungen bei einer Berechnung mit und ohne Berücksichtigung des Schubmoduls	83

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1	Fasermaterialien [14]	6
Abb. 2.2	Molekulanordnung von Polyethylen, oben: normalfest, unten: hochfest [14]	7
Abb. 2.3	Spannungs-Dehnungsverhalten [16]	9
Abb. 2.4	Schematische Darstellung des Schmelzspinnverfahrens [22]	9
Abb. 2.5	Bindung, links: Leinwandbindung, rechts: Panamabindung [22]	11
Abb. 2.6	Unterschied in der Welligkeit von Kett- (blau) und Schussfaden (rot) [13]	11
Abb. 2.7	Welligkeitsunterschied verschiedener Bindungsarten, oben: Leinwandbindung, unten: Panamabindung [22]	11
Abb. 2.8	Vorspanntechnologie von Serge Ferrari, Precontraint Gewebe [40]	12
Abb. 2.9	Unbeschichtete Gewebe, links: Baumwollgewebe, mitte: Metallgewebe, rechts: PTFE-Gewebe [17]	13
Abb. 2.10	Beschichtungsvorgang im Streichverfahren [22]	15
Abb. 2.11	links: PVC-beschichtetes Polyestergewebe [17], rechts: freigelegtes Polyestergewebe durch Beschichtungsablösung [22]	16
Abb. 2.12	links: Glasfaden, Glasgewebe und beschichtetes Gewebe [22], rechts: Querschnitt durch ein beschichtetes Gewebe [24]	17
Abb. 2.13	links: silikonbeschichtetes Glasfasergewebe, mitte und rechts: Fertigung [22]	17
Abb. 3.1	Nichtlineare Spannungs-Dehnungsbeziehung von Gewebematerialien [22]	20
Abb. 3.2	Abhängigkeit des Gewebeverhaltens von der Streifenorientierung [22]	20
Abb. 3.3	Anelastizität von Gewebematerialien bei wiederholter Belastung [22]	21
Abb. 3.4	Kraft-Dehnungs-Kurven eines biaxialen Zugversuchs im Gebrauchslastbereich, links: PVC-beschichtetes Polyestergewebe Typ II, rechts: PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe [8]	22
Abb. 3.5	links: Schubverzerrung von Geweben [22], rechts: Jamming Condition [1]	23
Abb. 3.6	Elastizitätsmodul, Festigkeit und Dehnung in Abhängigkeit von Temperatur und Zustandsbereich für amorphe (oben) und teilkristalline Thermoplaste (unten) [22]	24
Abb. 3.7	links: Strukturmodell eines Gewebes, rechts: Einheitszelle [4]	25
Abb. 3.8	Drei phänomenologische Ansätze zur rechnerischen Modellierung des versuchstechnisch ermittelten Kraft-Dehnungs-Verhaltens [25]	25
Abb. 3.9	Membrankräfte bzw. -spannungen an einem repräsentativen Flächenelement, links: allgemeine Richtungen, rechts: Hauptspannungsrichtungen	27
Abb. 4.1	links: Versuchsanordnung, rechts: Kraft-Dehnungsdiagramm eines einachsigen Zugversuchs am Beispiel von PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe [2]	30
Abb. 4.2	Darstellung der Versuchsanordnung für biaxiale Zugversuche	31
Abb. 4.3	Lastgeschichte im Biax-Versuch nach MSAJ/M-02-1995 [28]	32
Abb. 4.4	Kraft-Dehnungsdiagramme einer PTFE/Glas-Membrane als Ergebnis des Biax-Versuchs nach MSAJ/M-02-1995, links: gesamter Messschrieb, rechts: zehn aus den Belastungsvorgängen extrahierte Kraft-Dehnungs-Äste [28]	33
Abb. 4.5	Lastgeschichte im Biax-Versuch nach TensiNet Design Guide [28]	34
Abb. 4.6	Kraft-Zeit-Kurven und Dehnungs-Zeit-Kurven als Ergebnis des Biax-Versuchs nach TensiNet Design Guide [5]	34

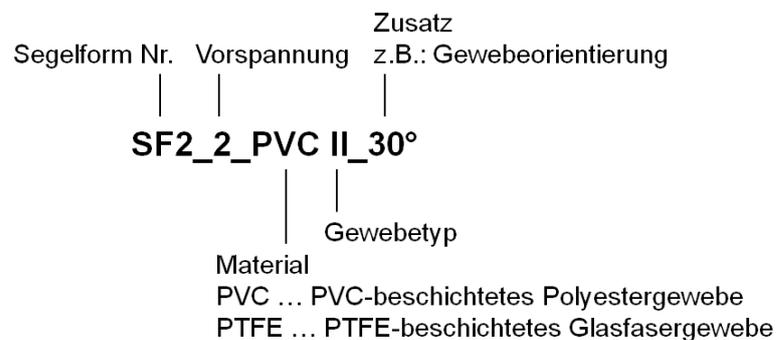
Abb. 4.7	Versuchsaufbau eines nicht-fadenparallelen, biaxialen Zugversuchs [7]	36
Abb. 4.8	Spannungen an einem Flächenelement bei nicht-fadenparalleler Zugbelastung, links: bei Kraftverhältnis 1:1, rechts: bei Kraftverhältnis ungleich 1:1	36
Abb. 4.9	Lastgeschichte für biaxialen Schubversuch [7]	36
Abb. 4.10	Zusammenhang zwischen Schubdehnung und Winkeländerung [7]	37
Abb. 4.11	Biaxiale Prüfmaschine zur Durchführung des ‚Shear ramp‘-Tests [10]	37
Abb. 4.12	Spezielle Lastaufbringung beim ‚Shear ramp‘-Test [10]	38
Abb. 4.13	links: Schematischer Versuchsaufbau [22], mitte und rechts: Versuchsaufbau im unbelasteten und belasteten Zustand [5]	38
Abb. 4.14	Versuchsdurchführung des Bias-Tests [10]	39
Abb. 4.15	Versuchsdurchführung des ‚Picture Frame‘-Tests [10]	39
Abb. 4.16	Unterschiedliche Steifigkeitsmatrizen zufolge der nicht einheitlich geregelten Versuchsdurchführungen und -auswertungen [28]	41
Abb. 5.1	Gewebeorientierungen bei den Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit	46
Abb. 5.2	Ablaufplan der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten	49
Abb. 5.3	Ablaufplan der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit	50
Abb. 5.4	Auslesebereich für die Ergebnisse	60
Abb. 5.5	Definition der Trag- und Spannrichtung in Abhängigkeit von der Lastrichtung, links: nach unten gerichtete Last, rechts: nach oben gerichtete Last	61
Abb. 5.6	Bereiche mit Druckausfall in Spannrichtung (blau markiert) bei Belastung durch Schnee und Winddruck, links: bei starren Rändern, rechts: bei biegeweichen Rändern	72
Abb. 5.7	Bereiche mit Druckausfall in Spannrichtung (blau markiert) bei Belastung durch Windsog, links: bei starren Rändern, rechts: bei biegeweichen Rändern	72
Abb. 5.8	Darstellung der „Druckausfallbereiche“ verschiedener Segelformen am Beispiel des Segels mit starrer Randausbildung, links: Lastfall „Schnee + Winddruck“, rechts: Lastfall „Windsog“	73

ANHANG

- Grafische Ergebnisdarstellung der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten
 - A) Segelform Nr. 1
 - B) Segelform Nr. 2
 - C) Segelform Nr. 3
 - D) Segelform Nr. 4
- Grafische Ergebnisdarstellung der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit
 - A) Segelform Nr. 2
- Eingabetasks für die numerische Berechnung

Bezeichnung der Datenreihen

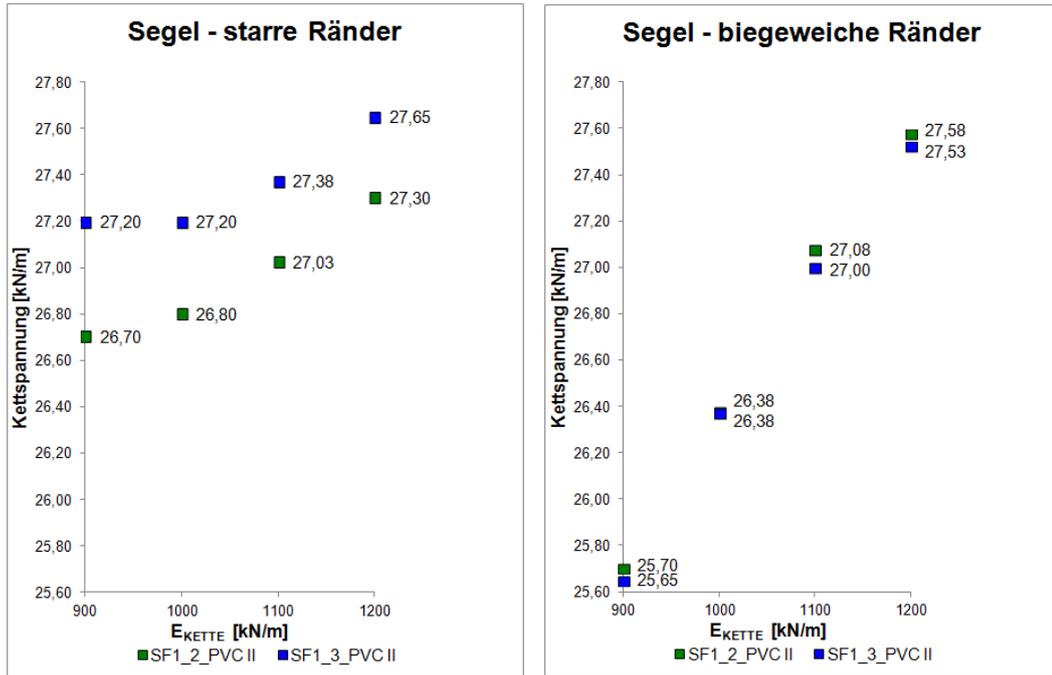
Die Datenreihen der grafischen Ergebnisdarstellung wurden nach folgenden Schlüssel bezeichnet:



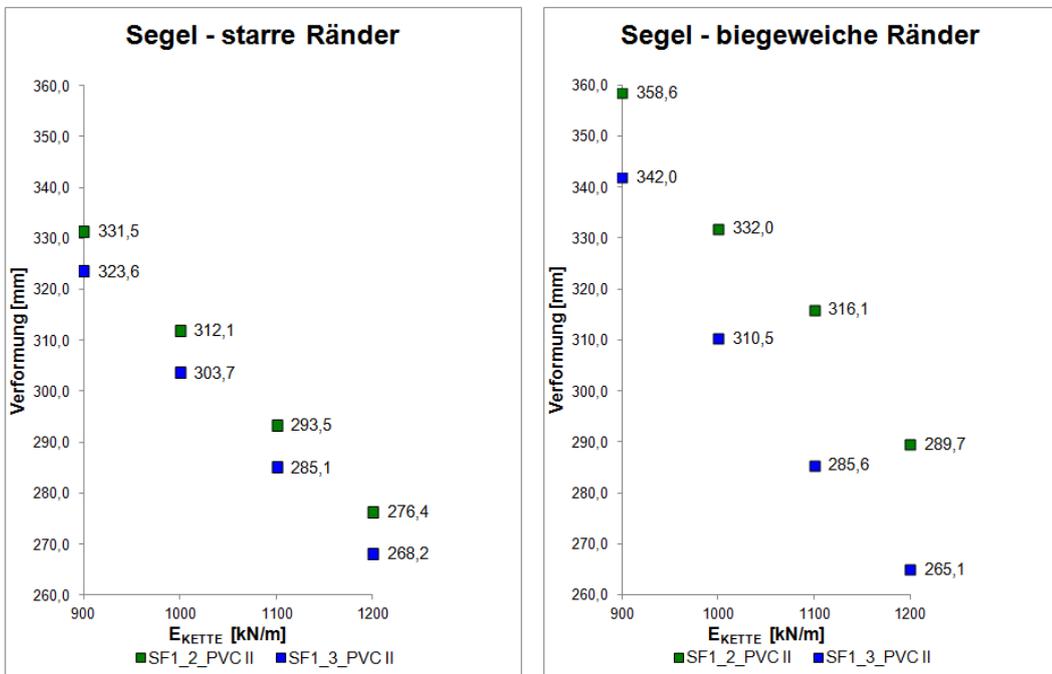
Grafische Ergebnisdarstellung der Untersuchungen mit Variation der Dehnsteifigkeiten

A) Segelform Nr. 1

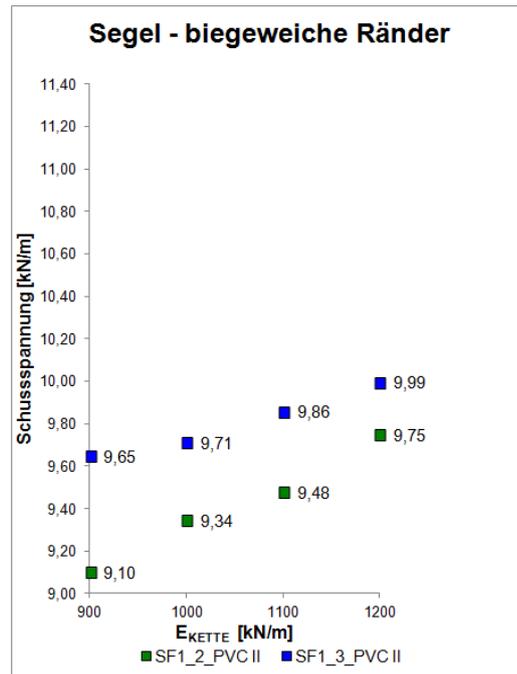
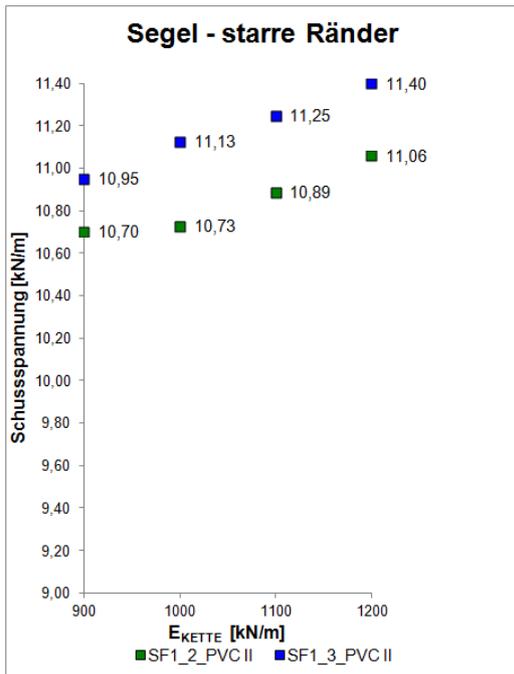
◆ PVC/PES Typ II



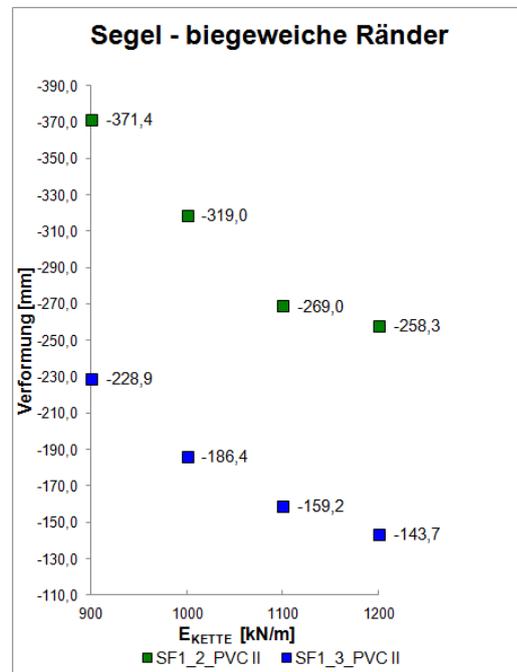
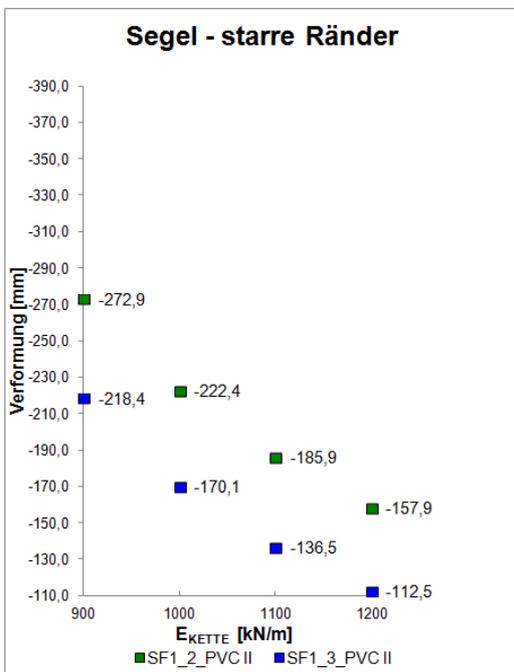
Segelform 1: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 1: Änderung der Verformungen bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



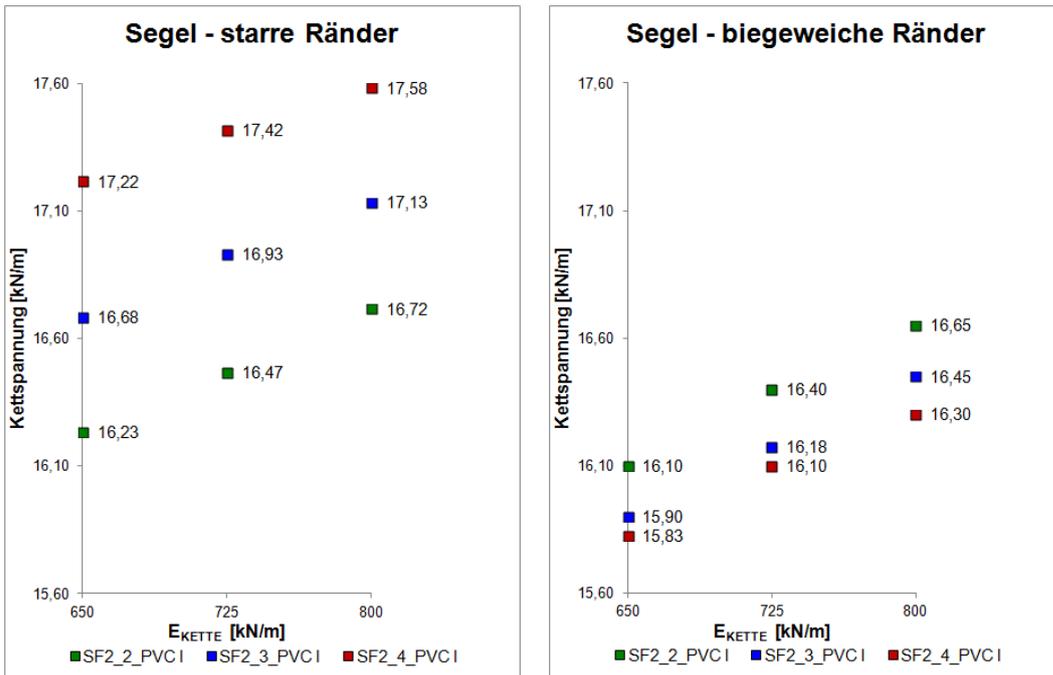
Segelform 1: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



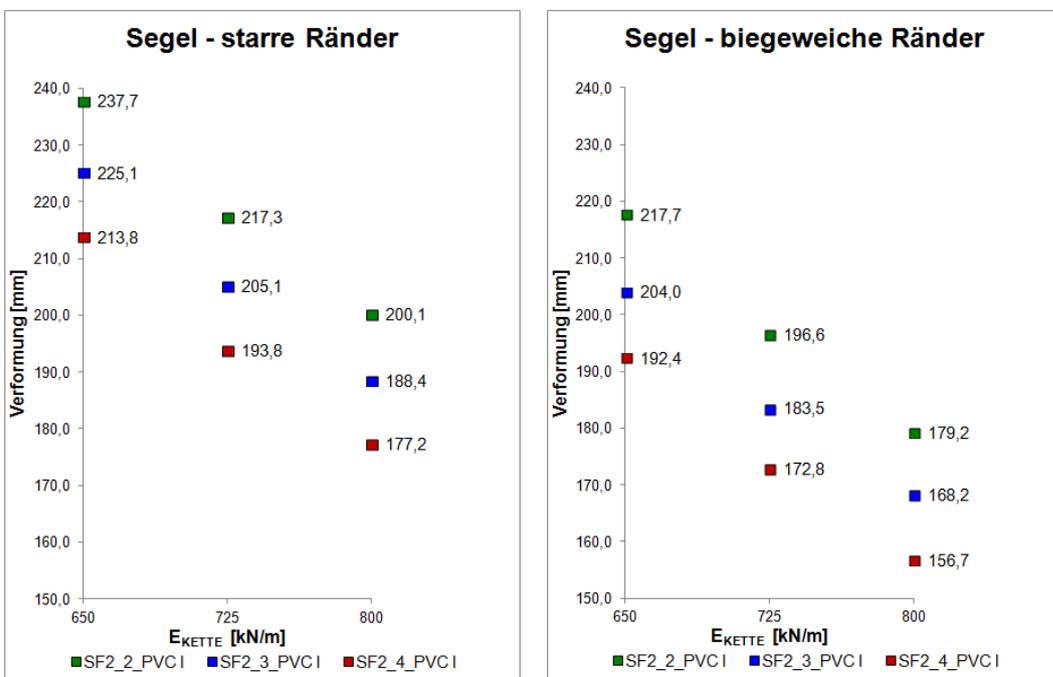
Segelform 1: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

B) Segelform Nr. 2

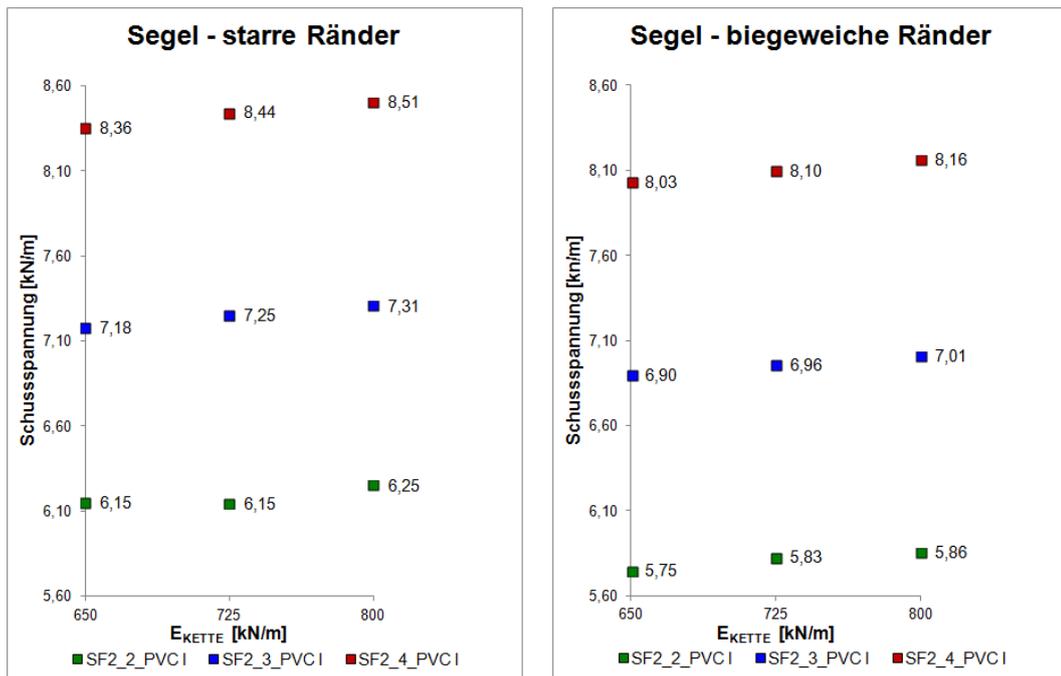
◆ PVC/PES Typ I



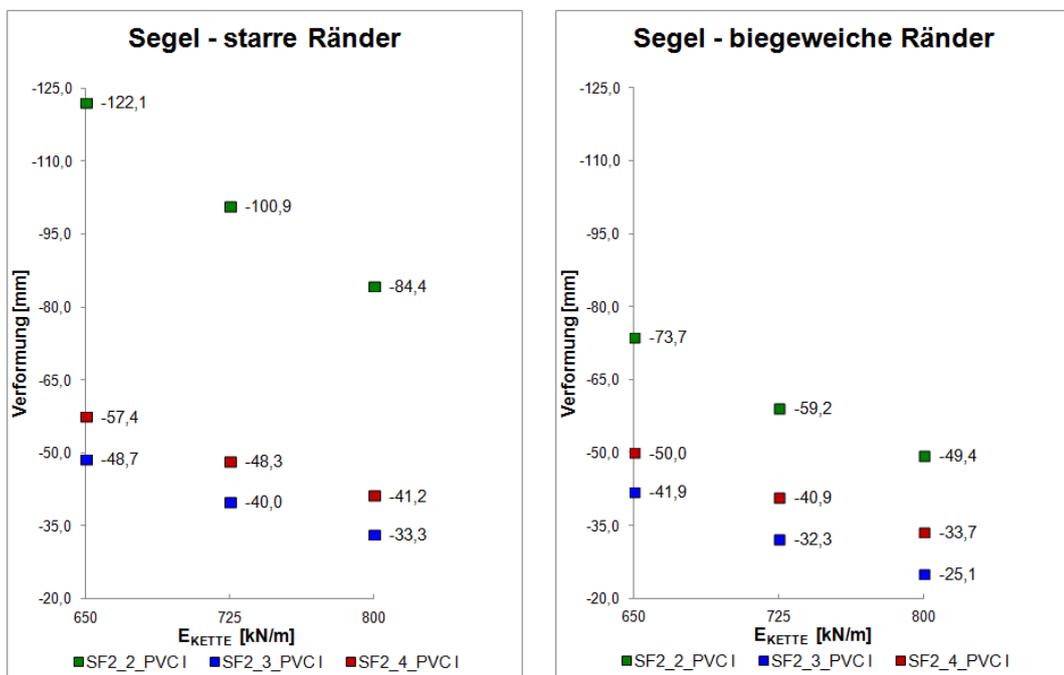
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 10$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 10$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

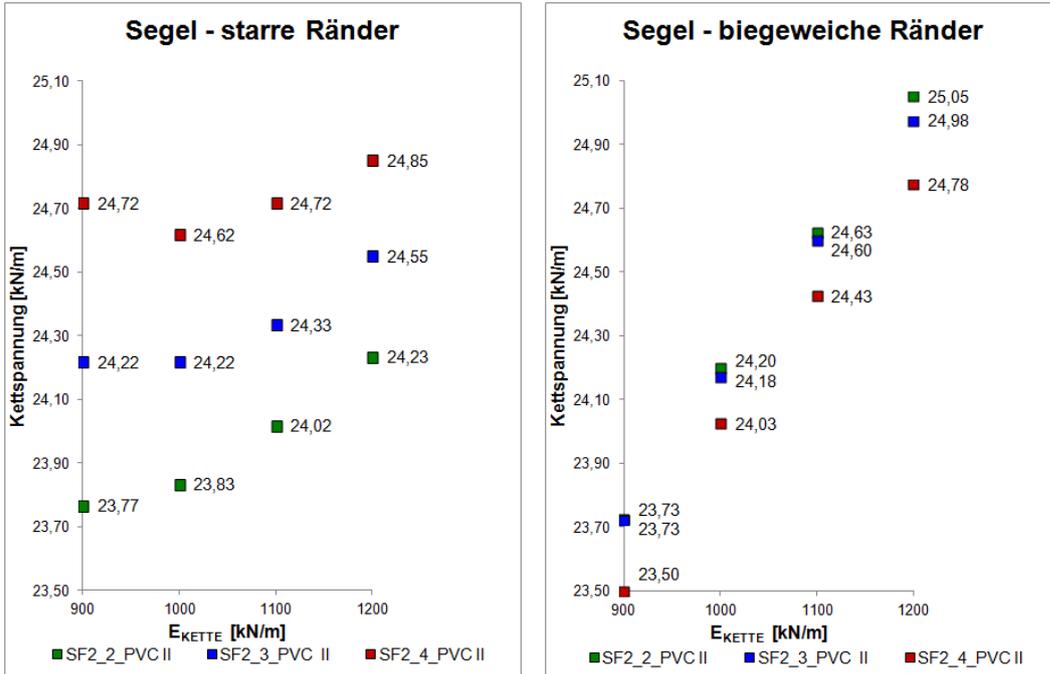


Segelform 2: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 10$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeweiche Ränder

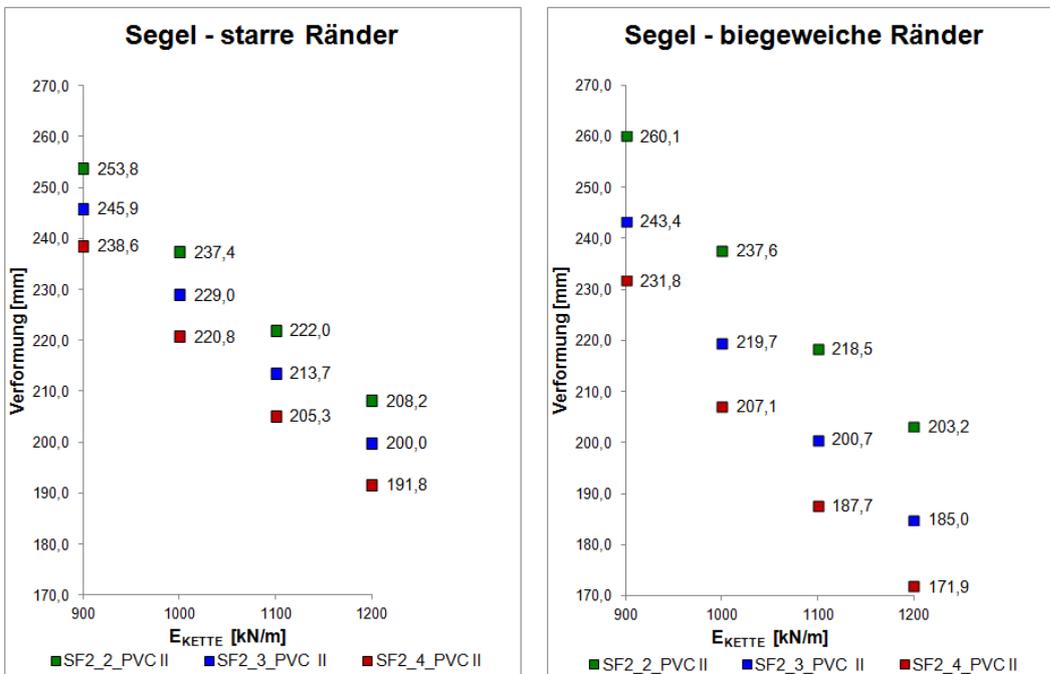


Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 10$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeweiche Ränder

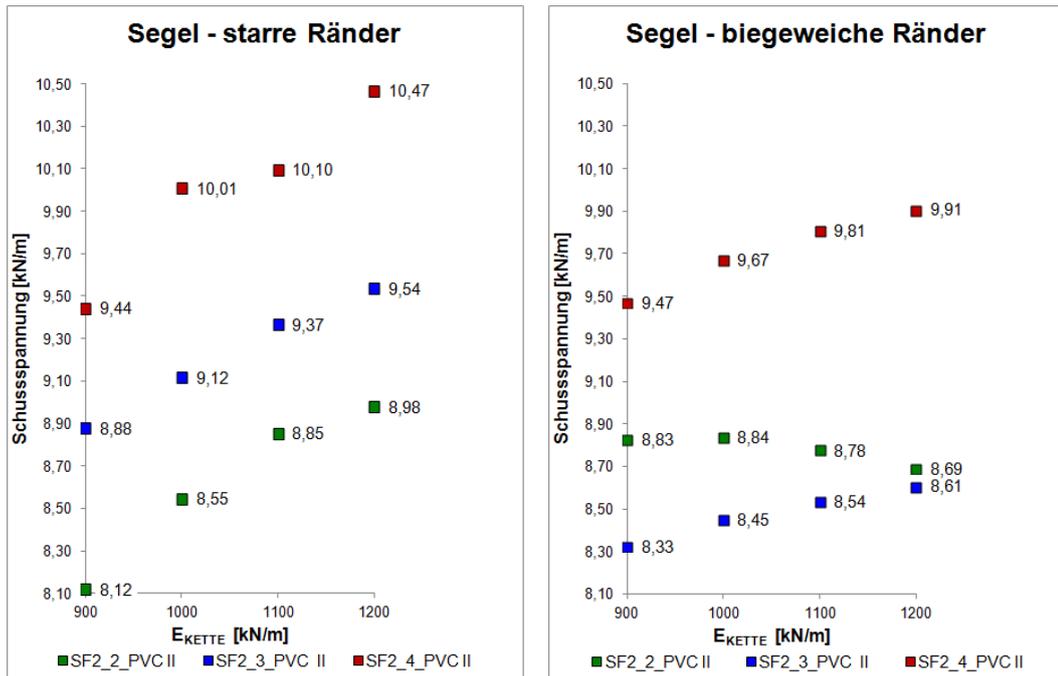
◆ PVC/PES Typ II



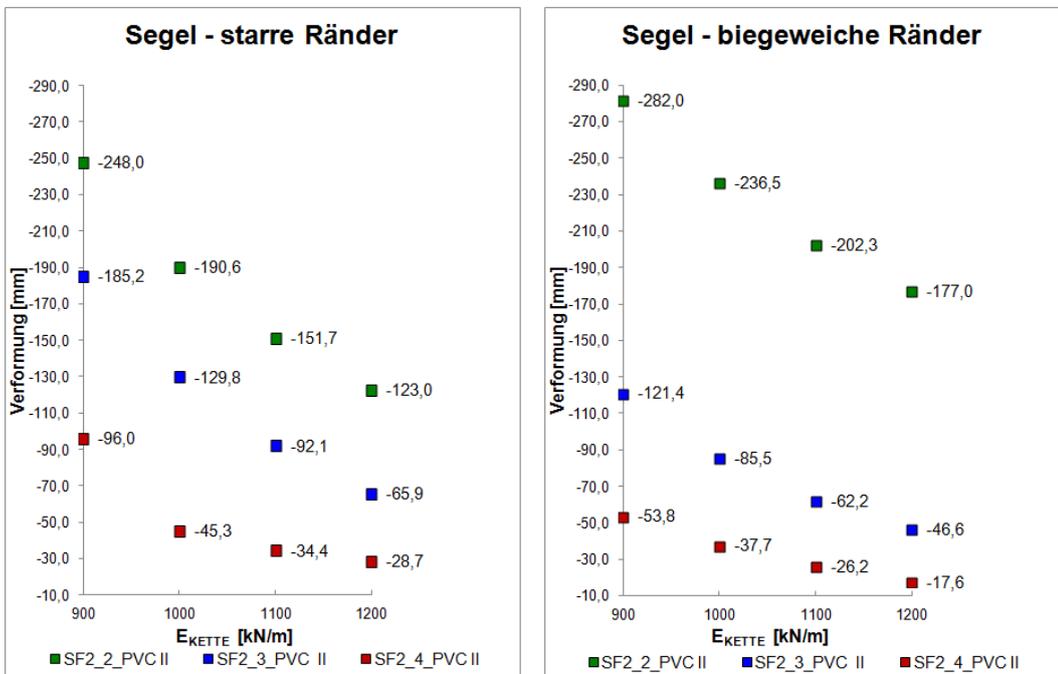
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



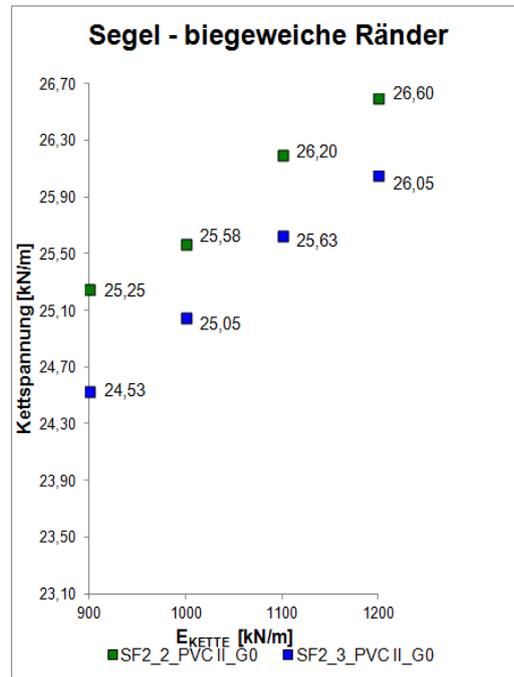
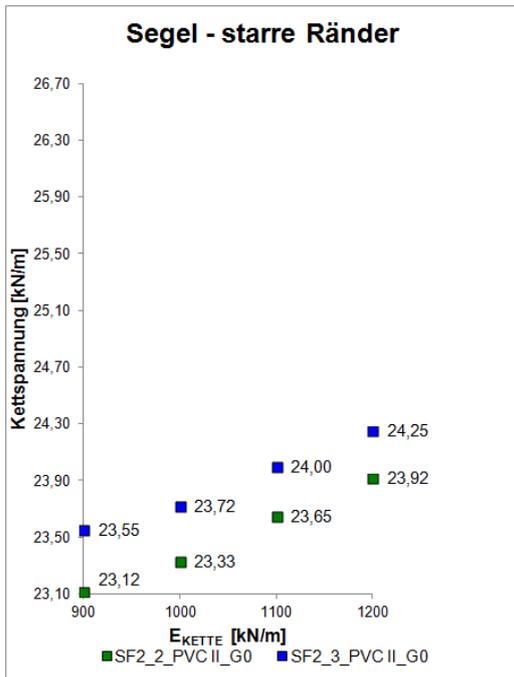
Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



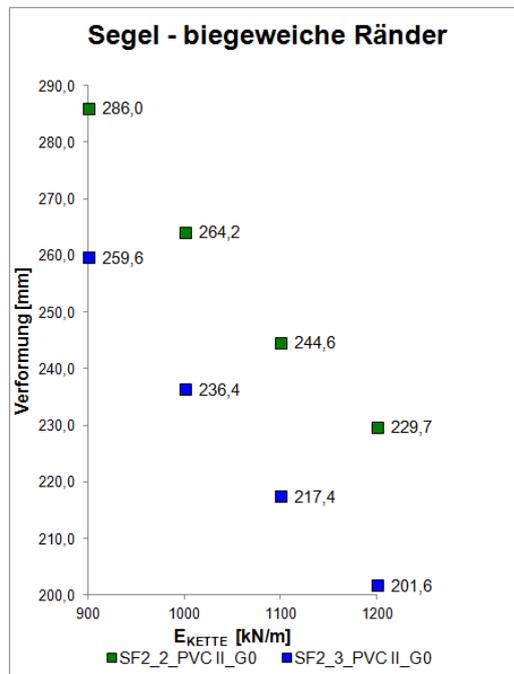
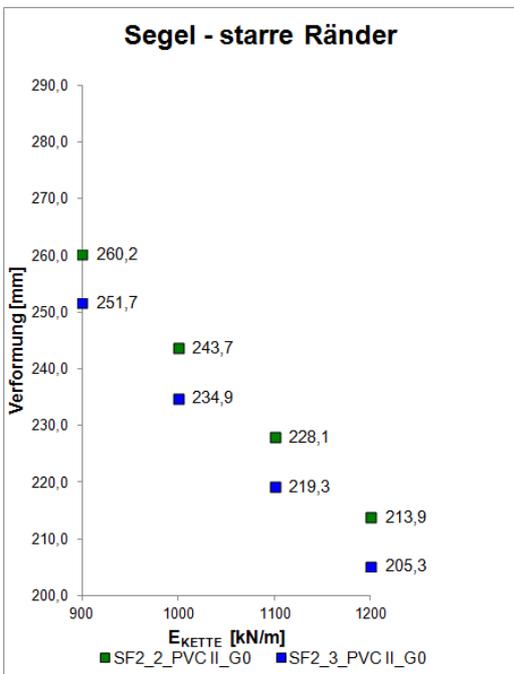
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeweiche Ränder



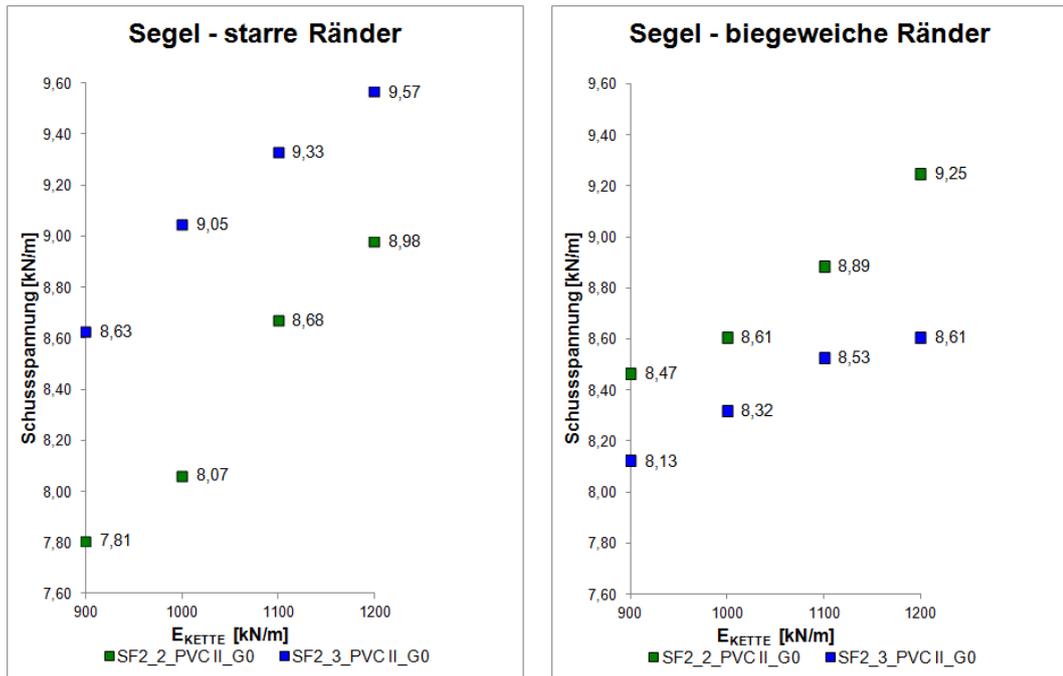
Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeweiche Ränder



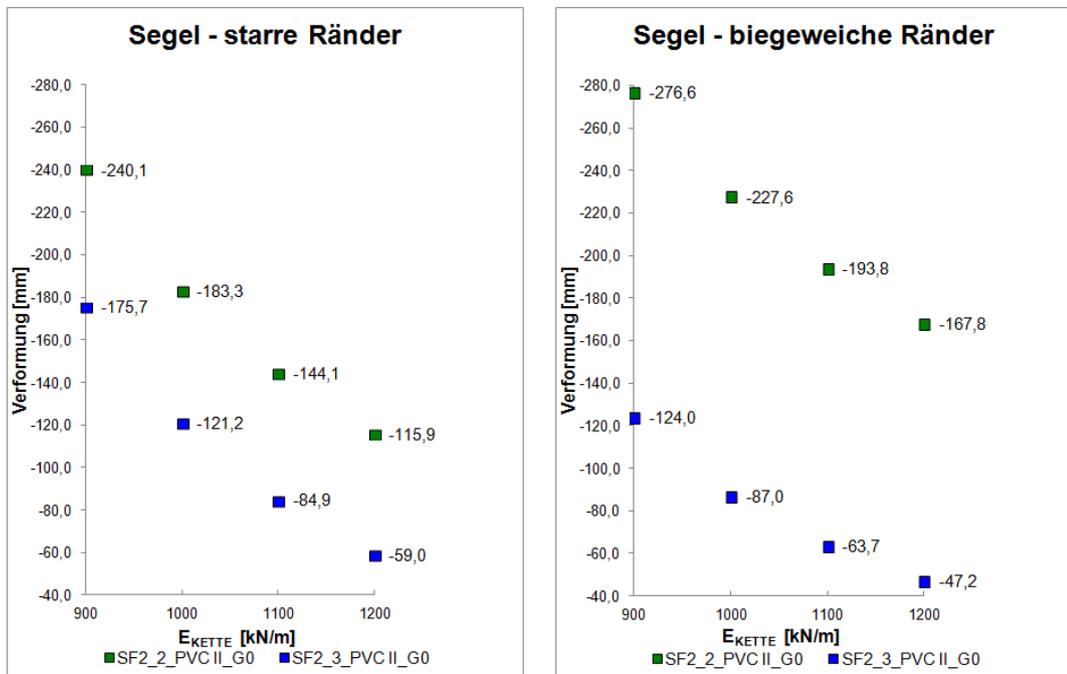
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 0,1$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 0,1$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

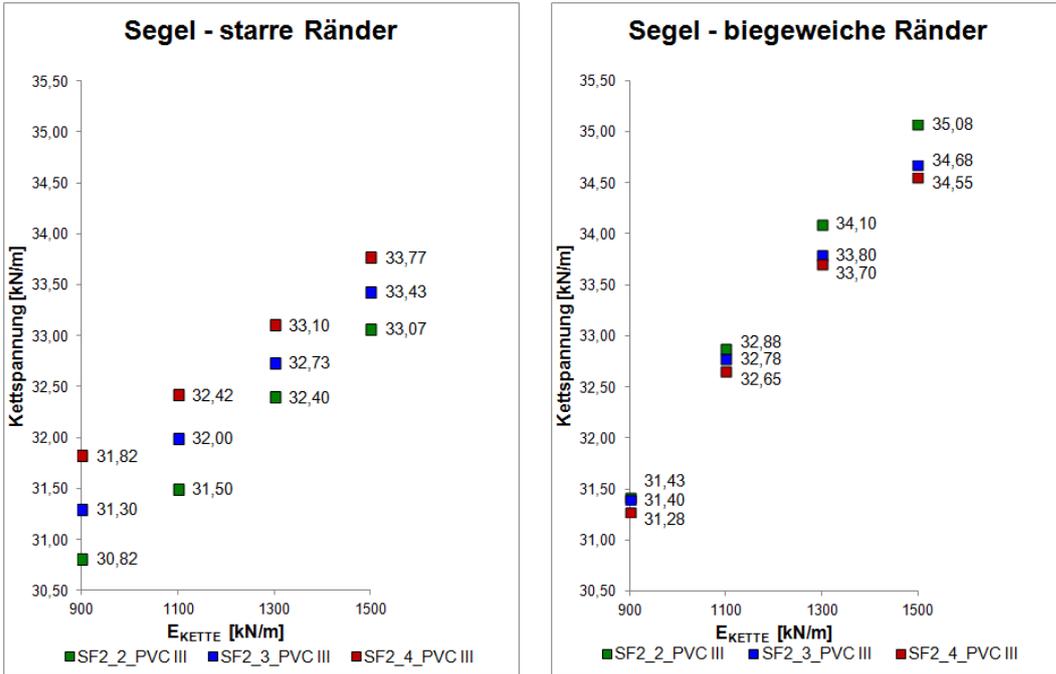


Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 0,1$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

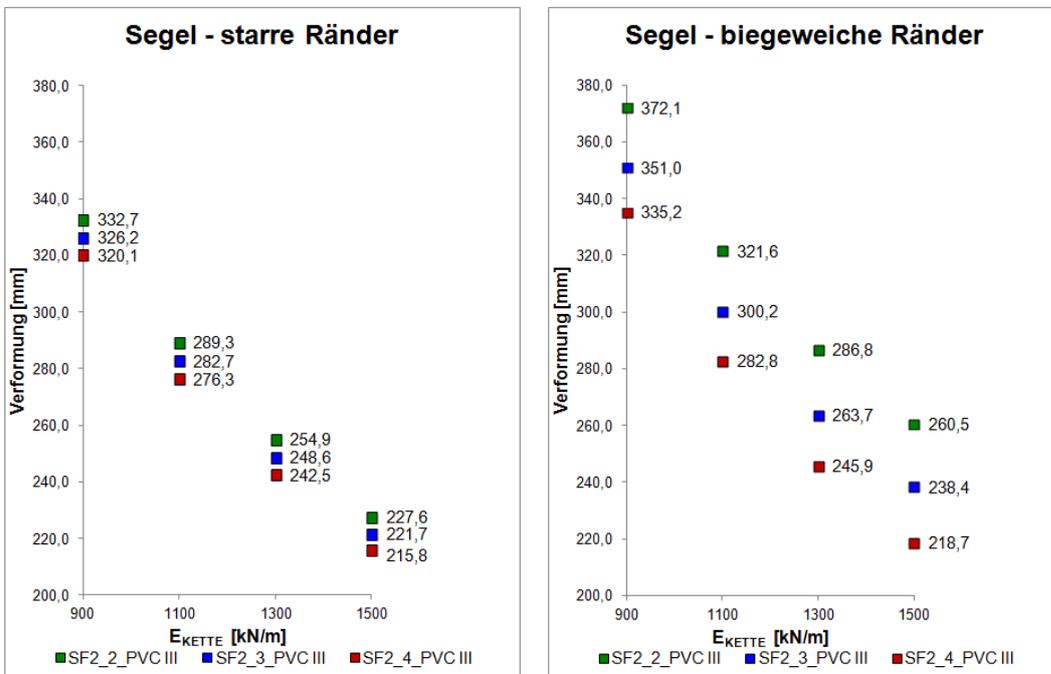


Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 0,1$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

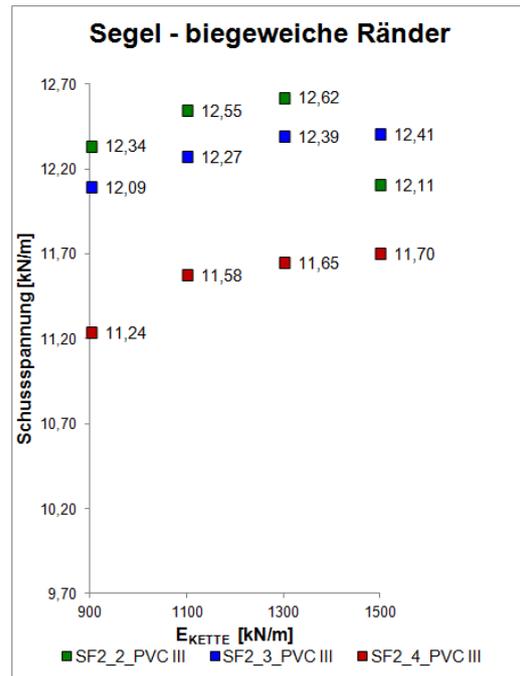
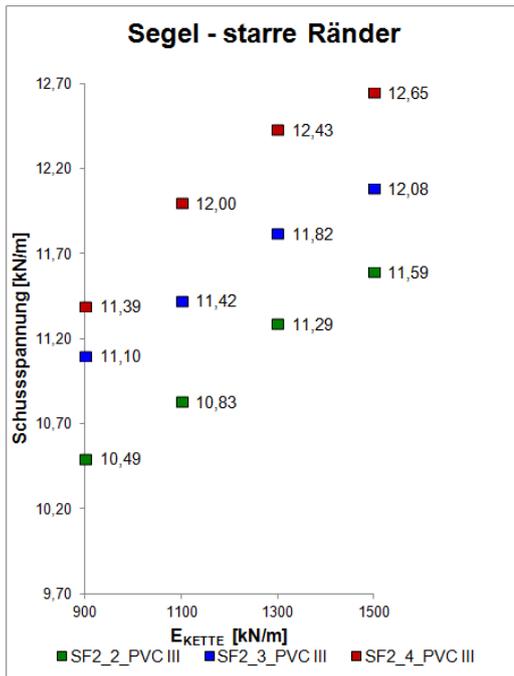
◆ PVC/PES Typ III



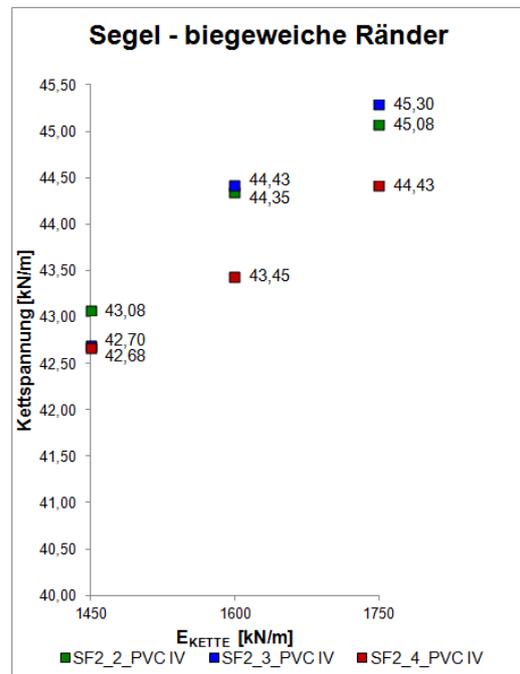
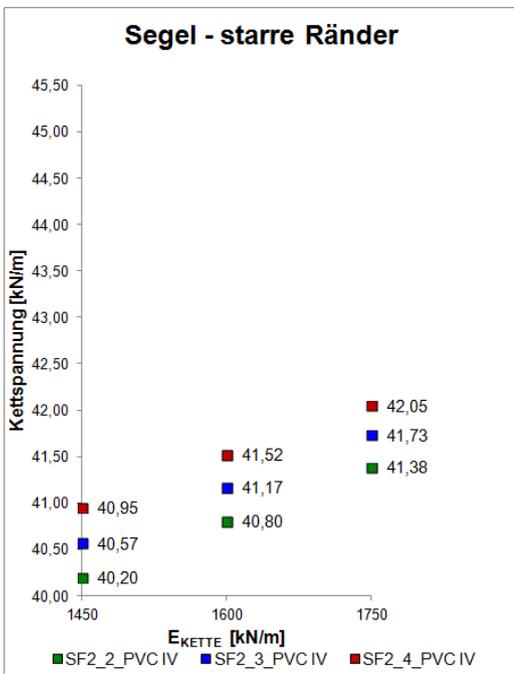
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 14,5$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 14,5$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

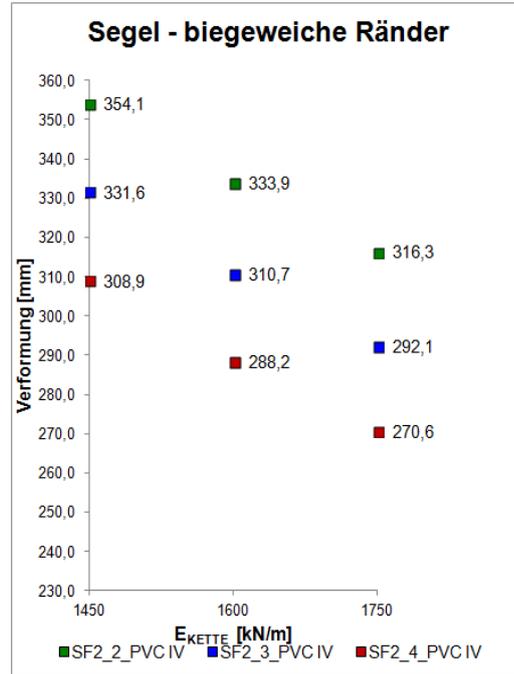
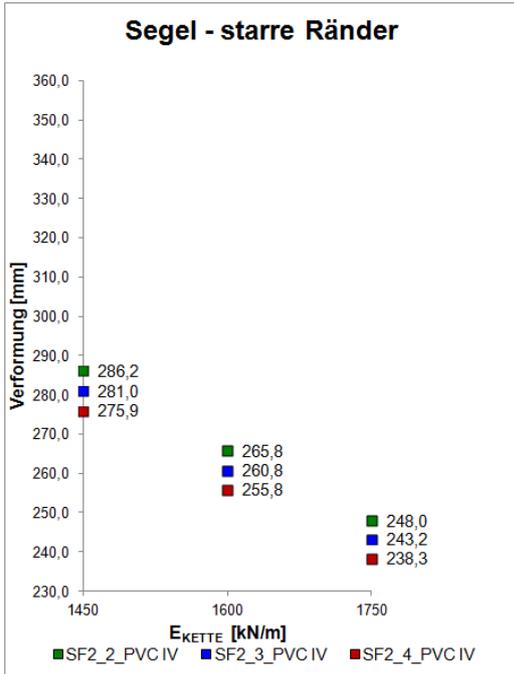


Segelform 2: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 14,5 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

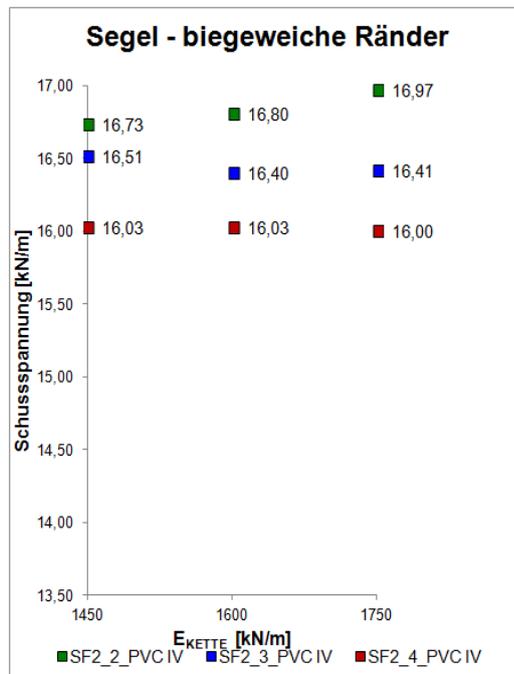
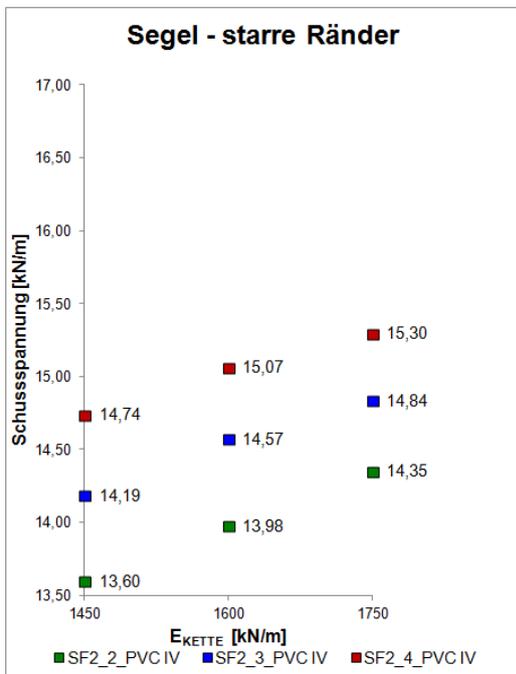


Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 15 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

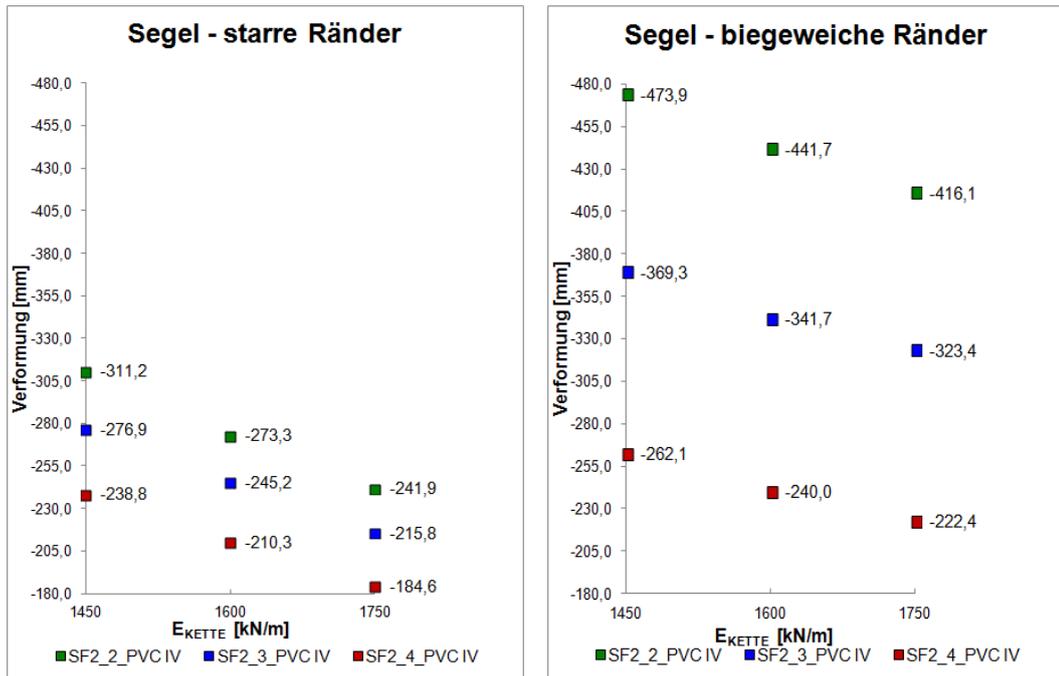
◆ PVC/PES Typ IV



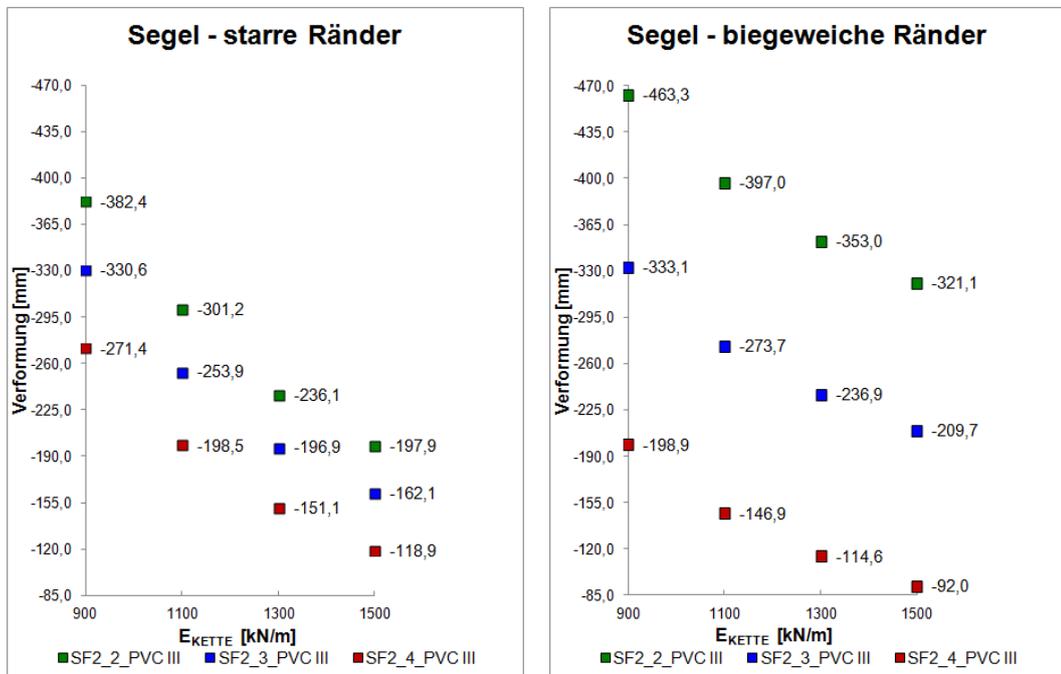
Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 15 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 2: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 15 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

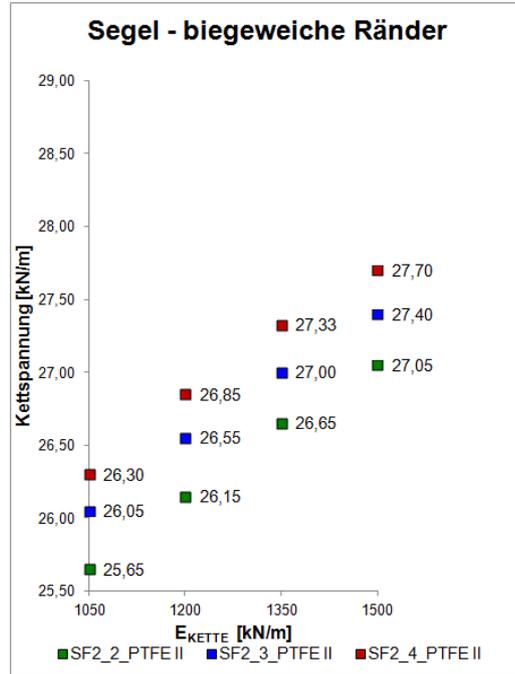
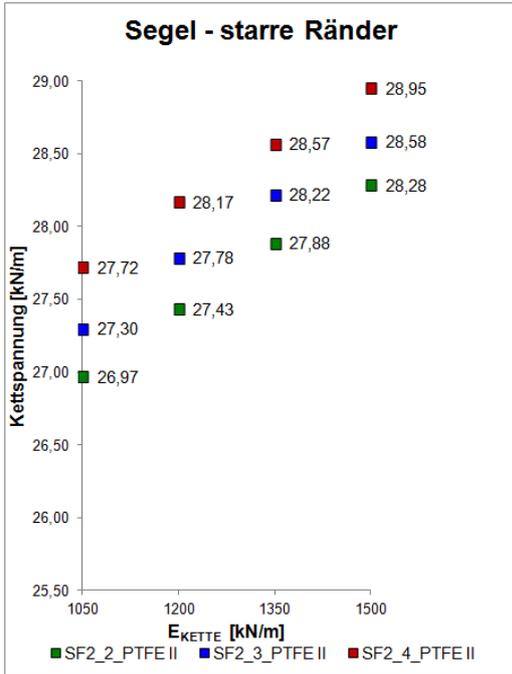


Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 15 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

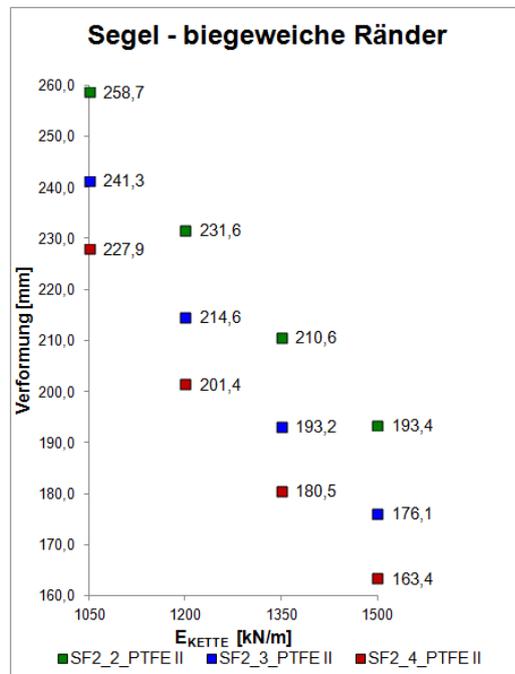
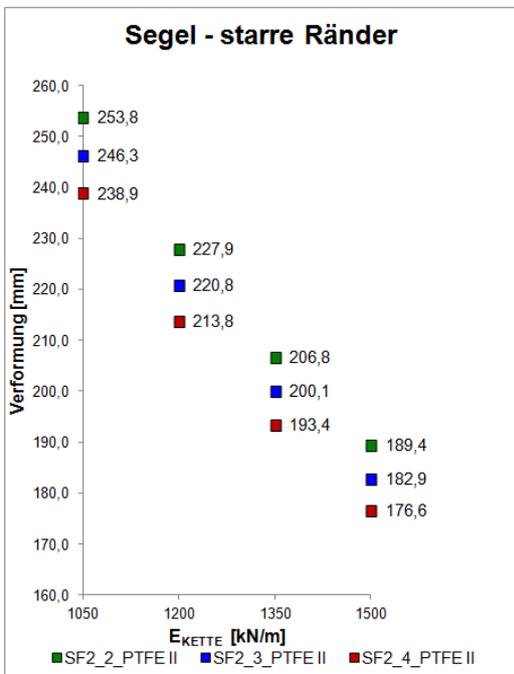


Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 14,5 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

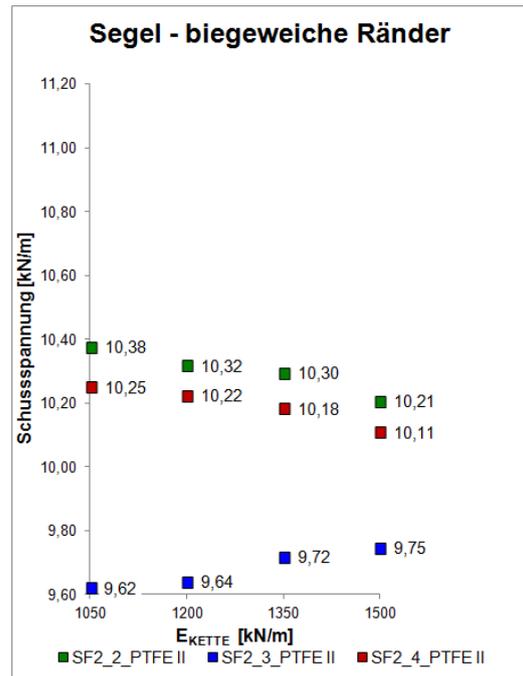
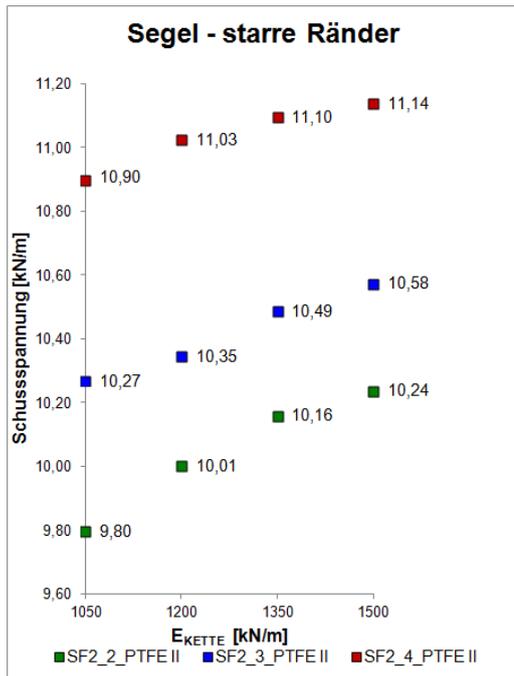
◆ PTFE/Glas Typ II



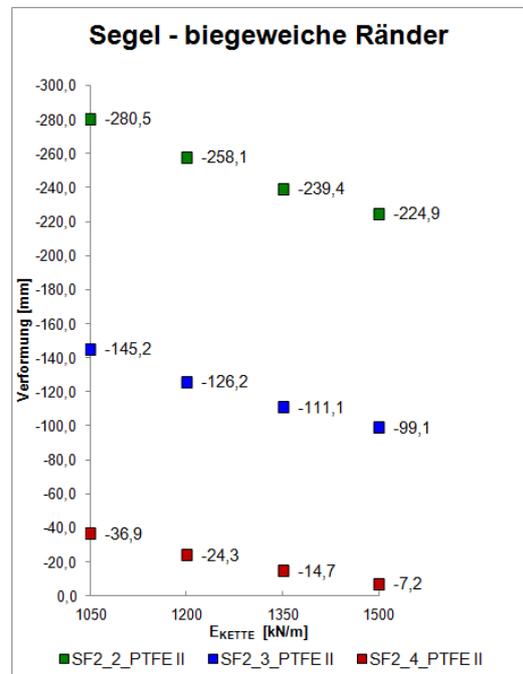
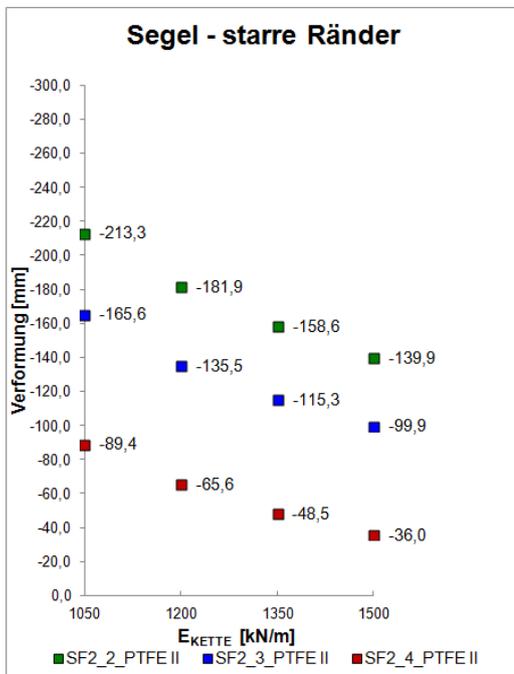
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 30 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 30 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

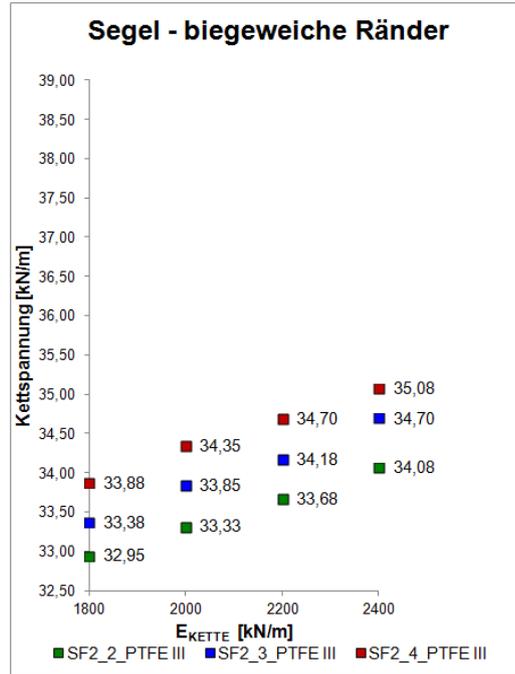
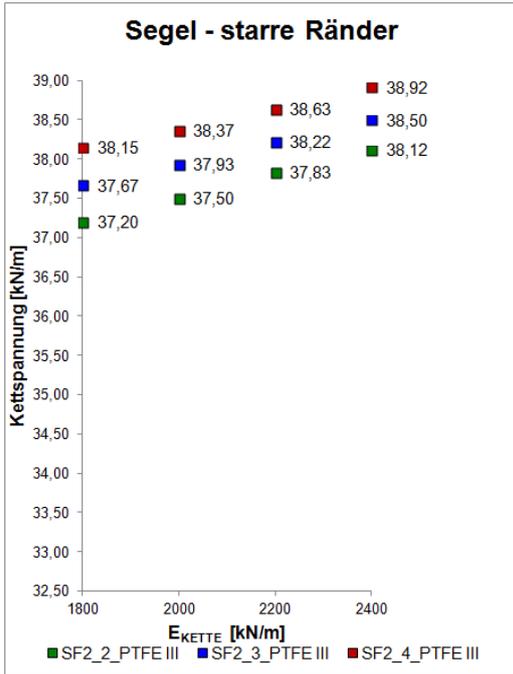


Segelform 2: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 30 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

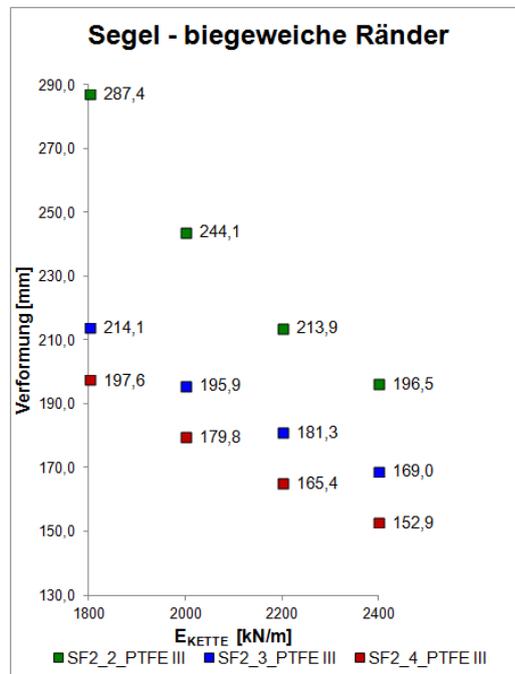
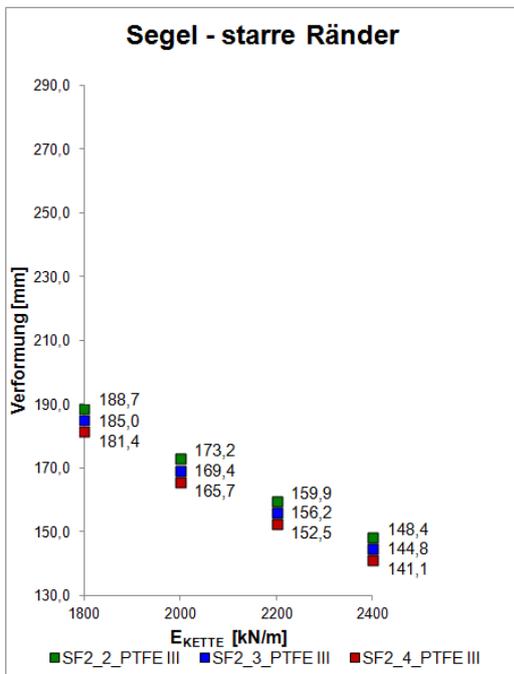


Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 30 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

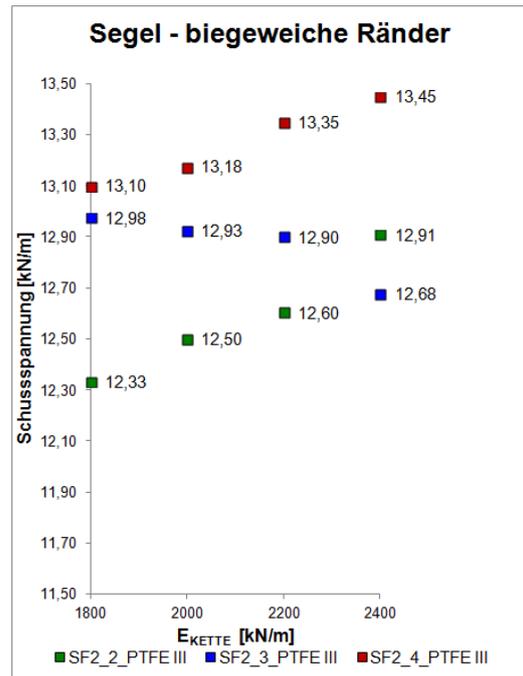
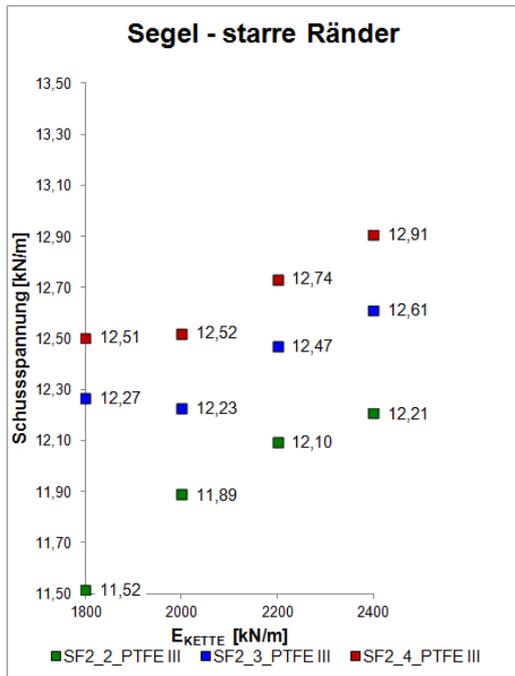
◆ PTFE/Glas Typ III



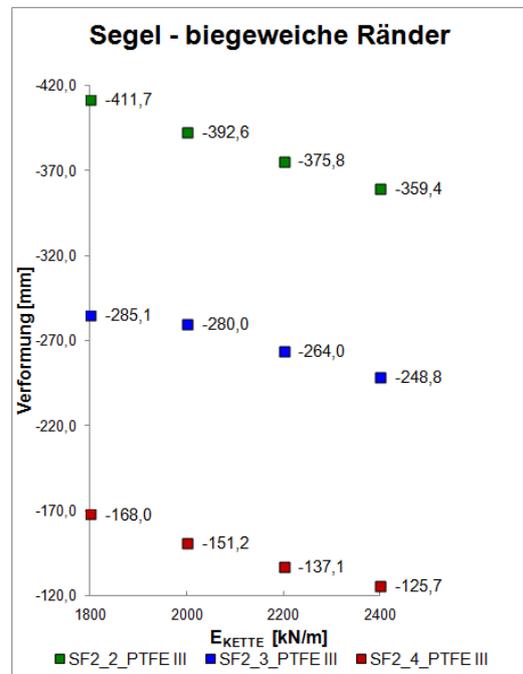
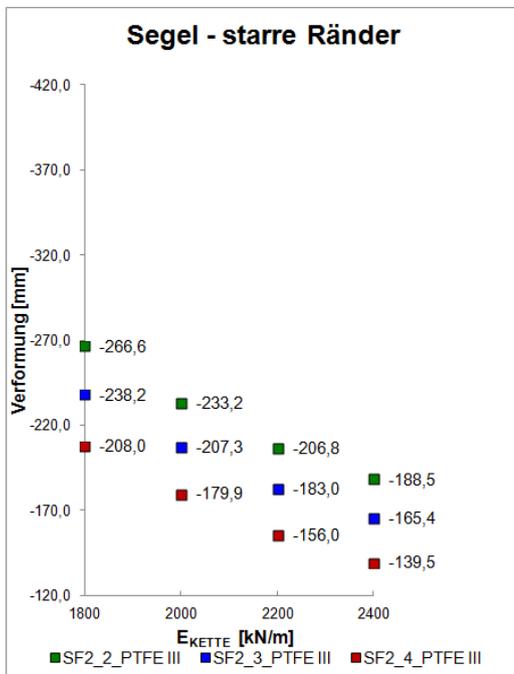
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 45 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 45 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

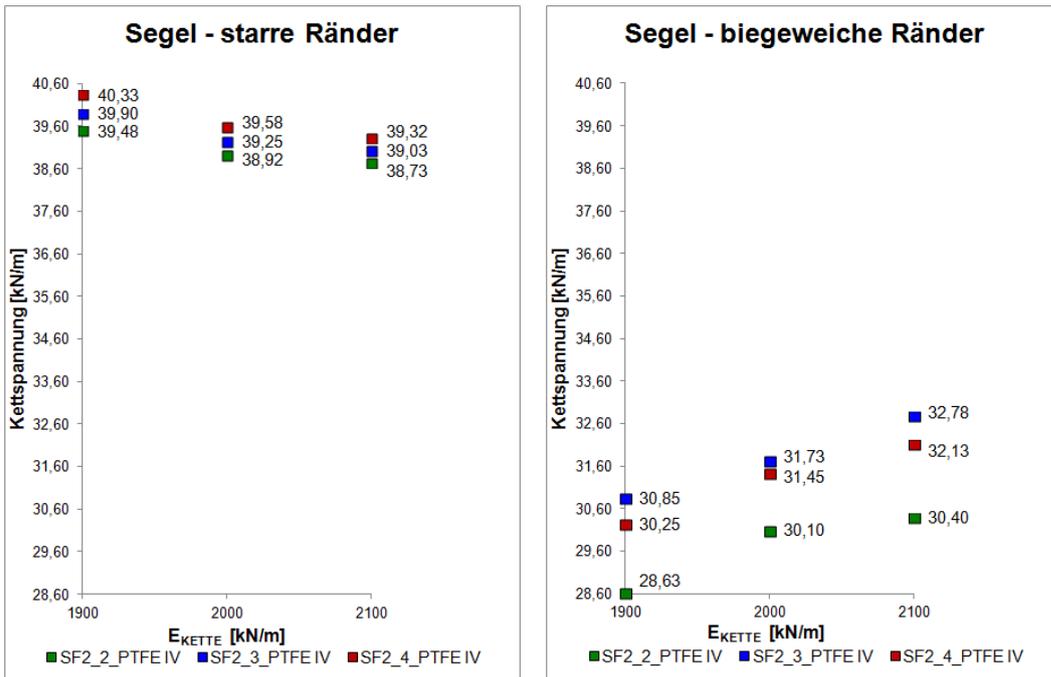


Segelform 2: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 45 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

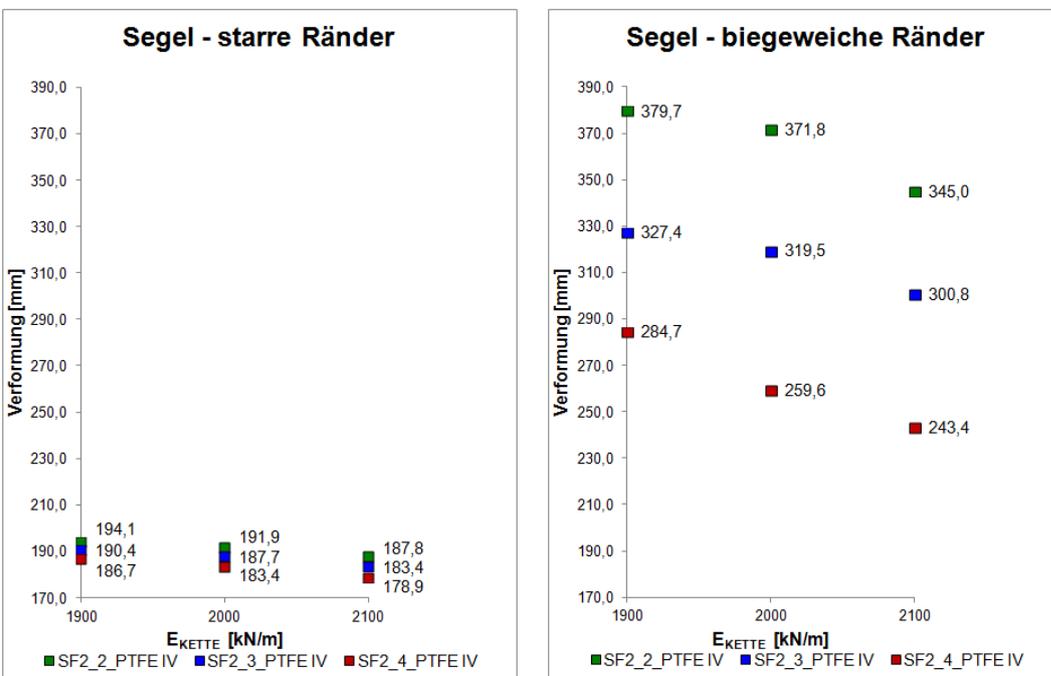


Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 45 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

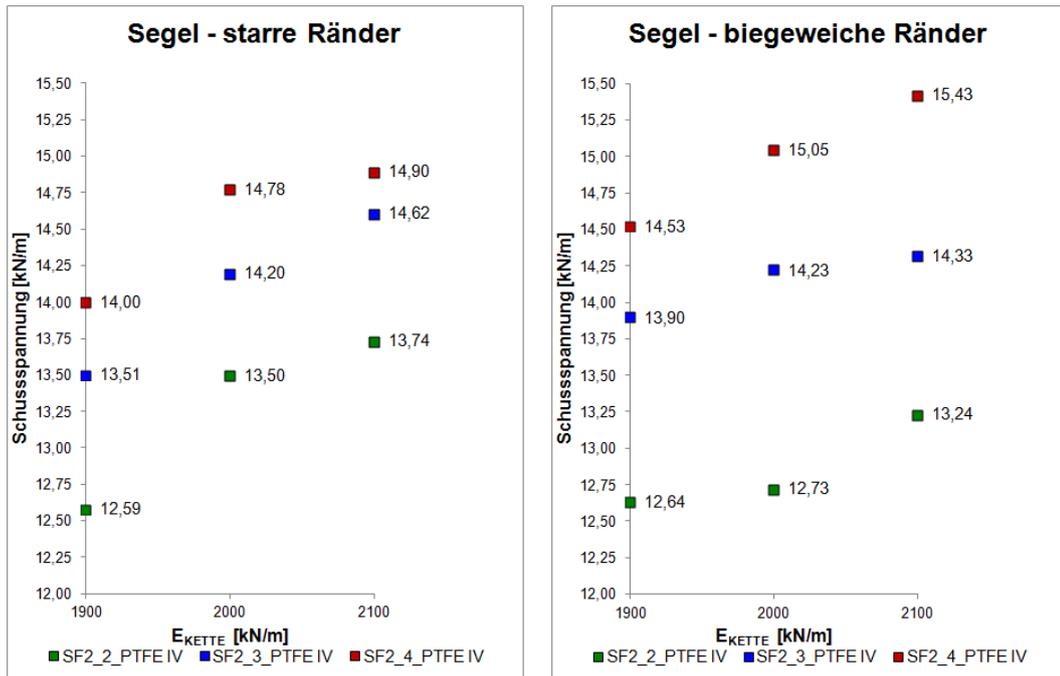
◆ PTFE/Glas Typ IV



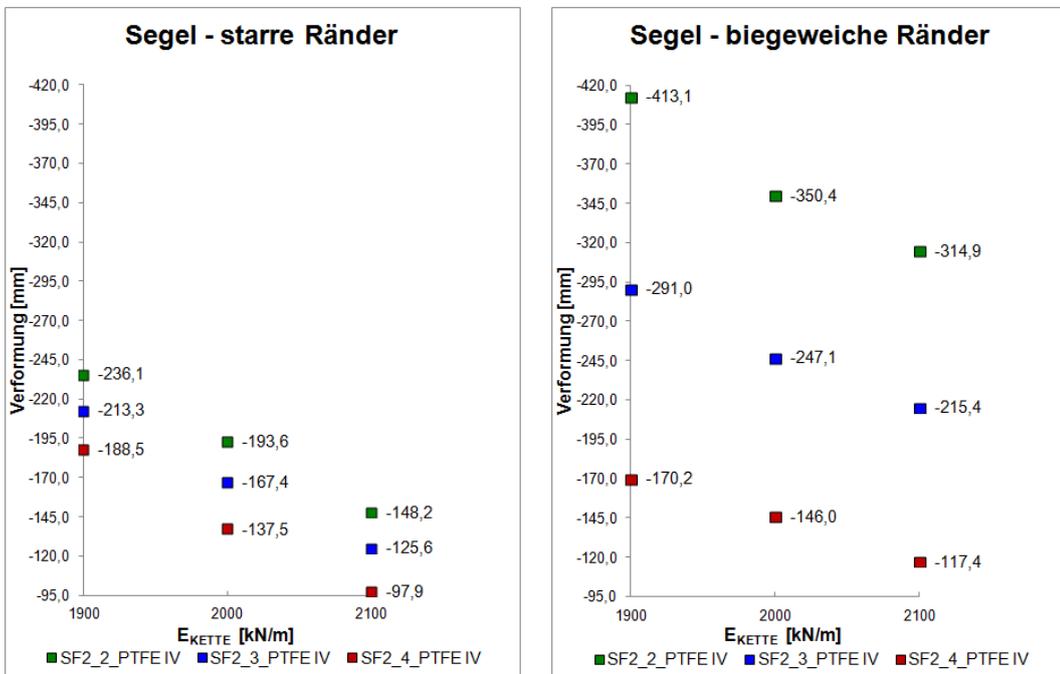
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 70$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 70$ kN/m; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



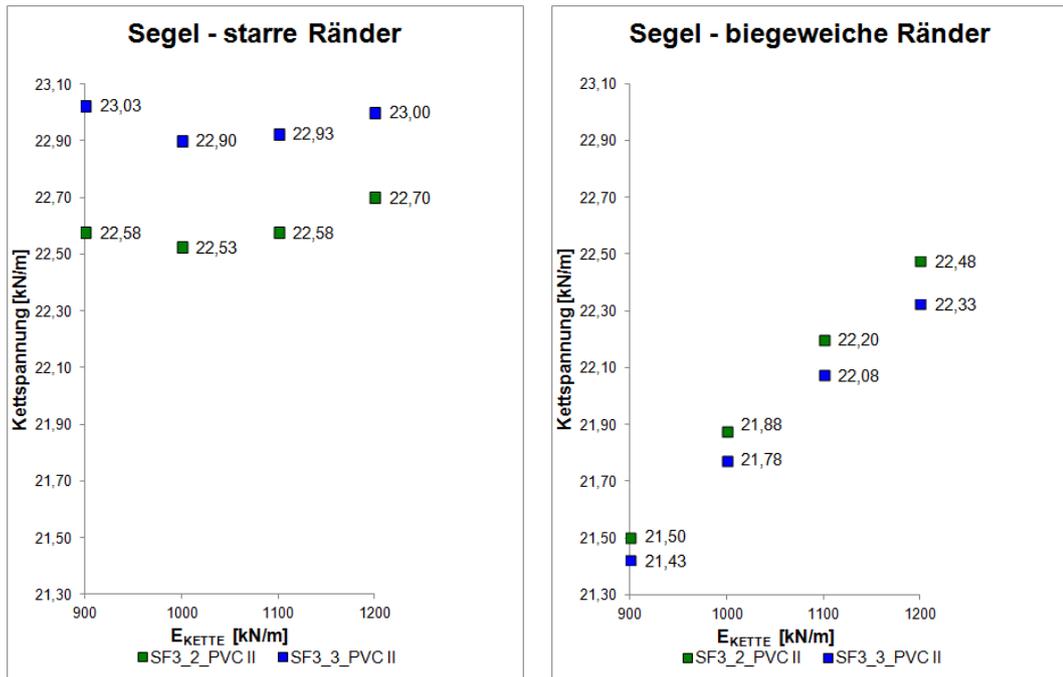
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 70 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



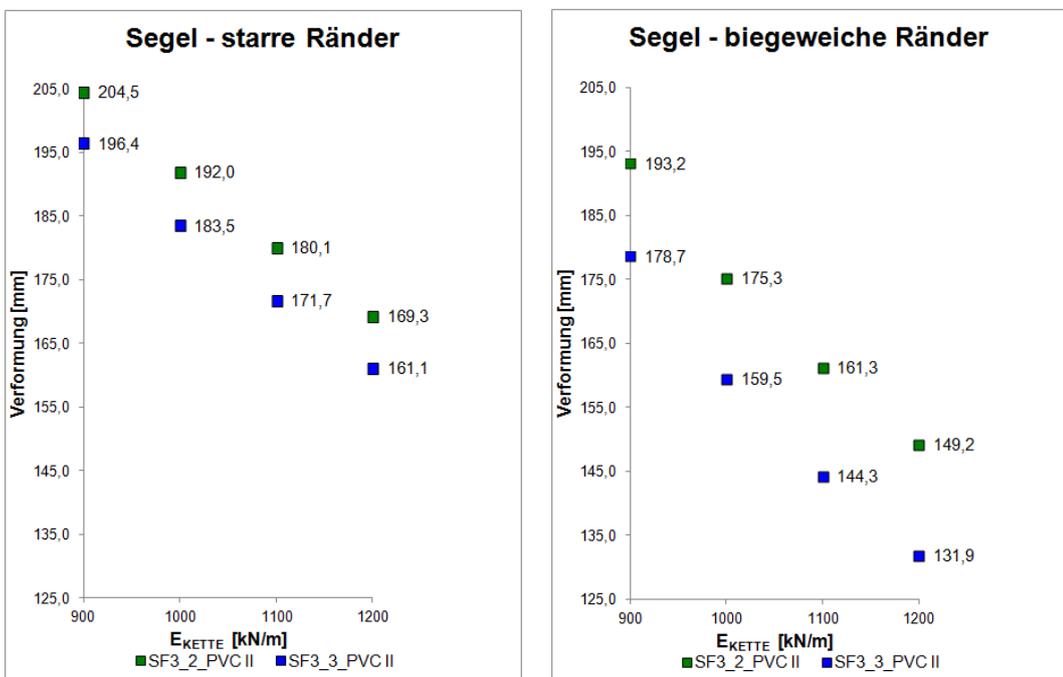
Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 70 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

C) Segelform Nr. 3

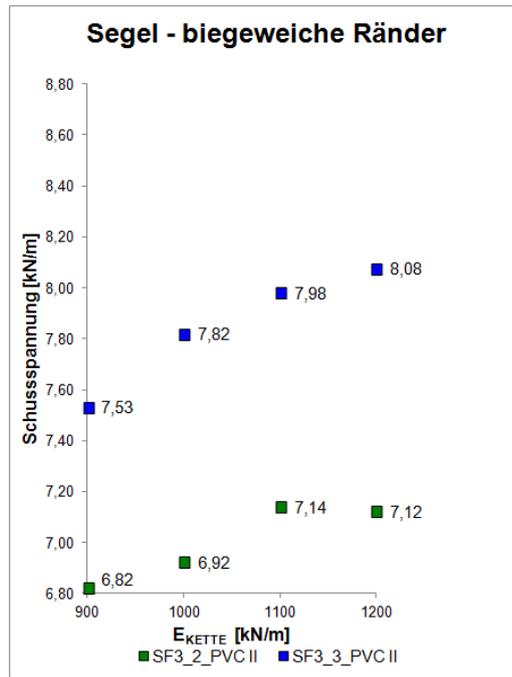
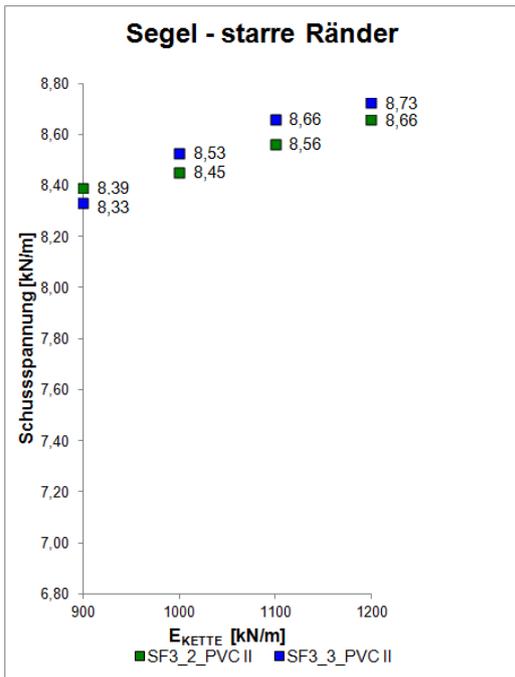
♦ PVC/PES Typ II



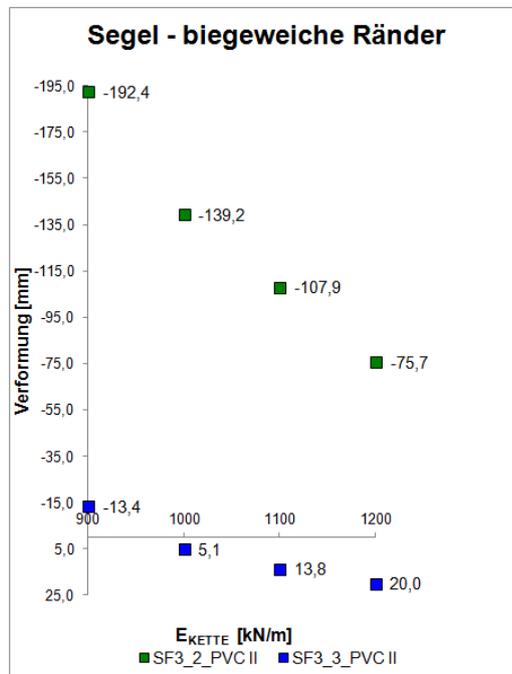
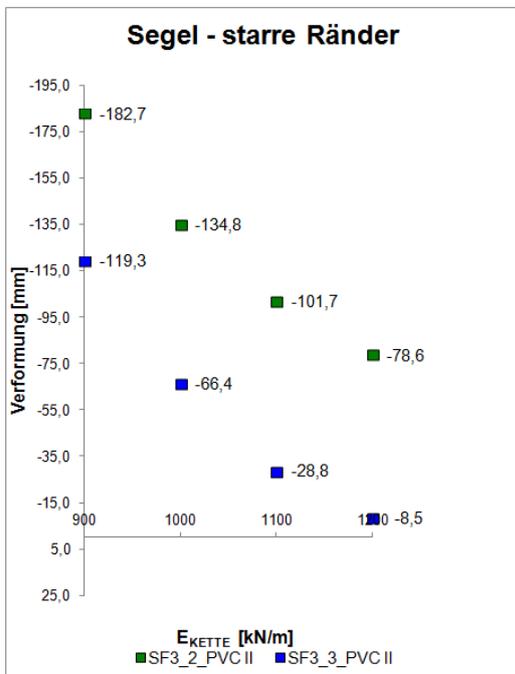
Segelform 3: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 3: Änderung der Verformungen bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



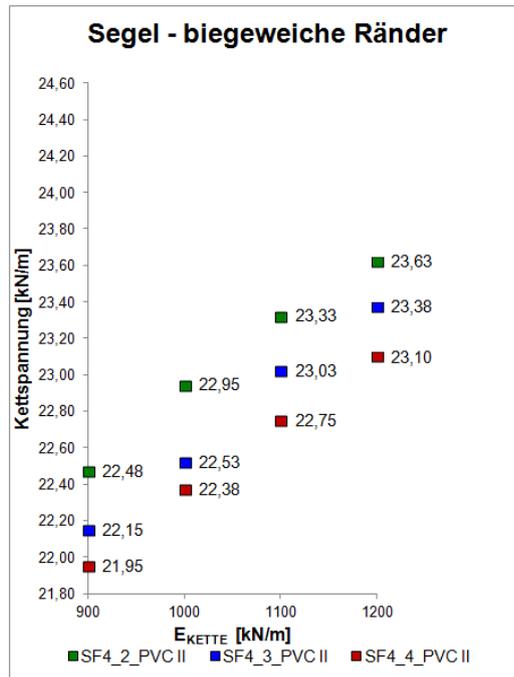
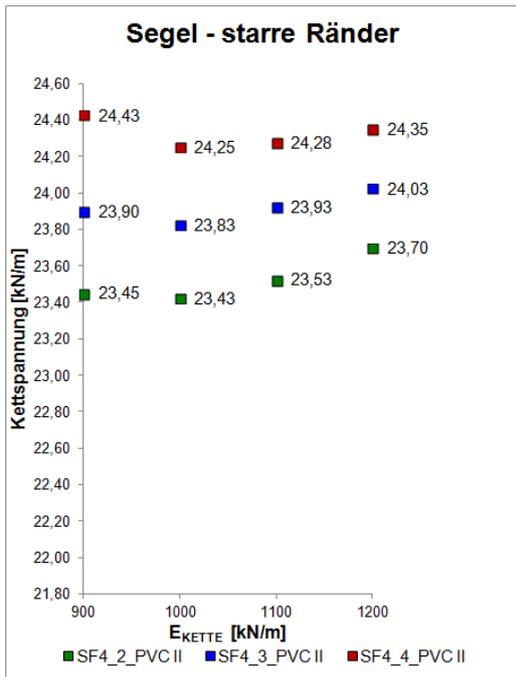
Segelform 3: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



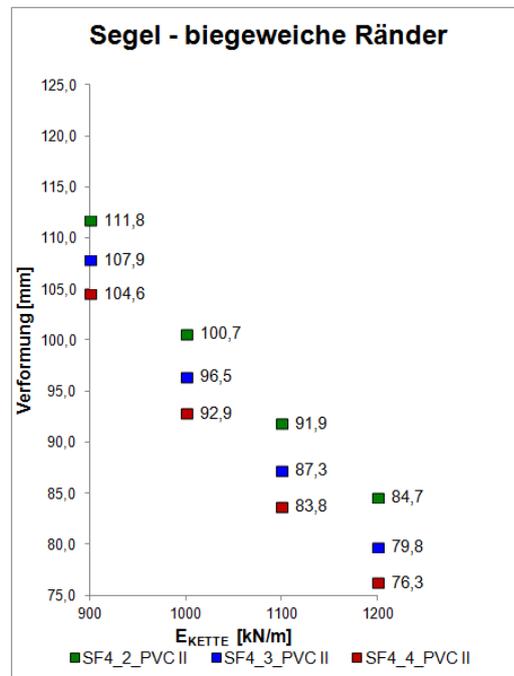
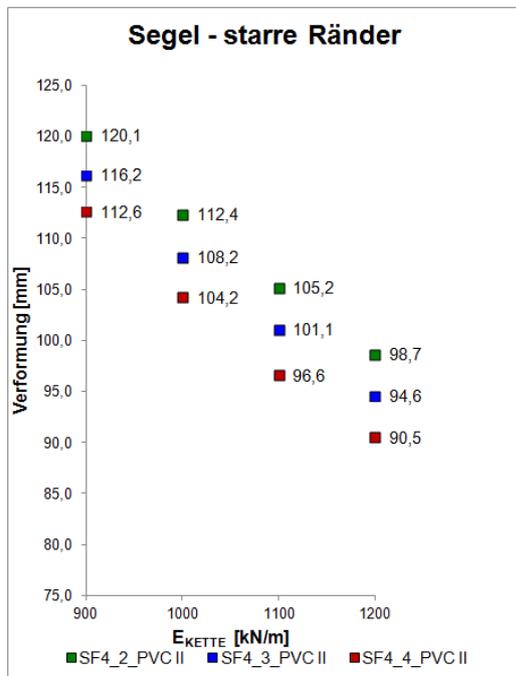
Segelform 3: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

D) Segelform Nr. 4

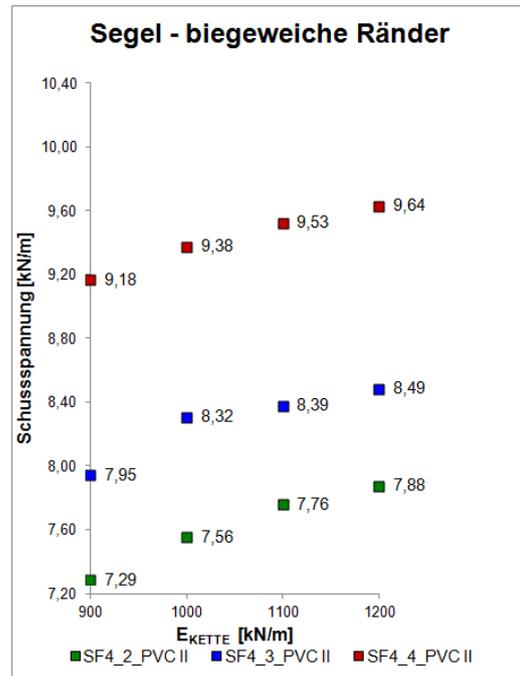
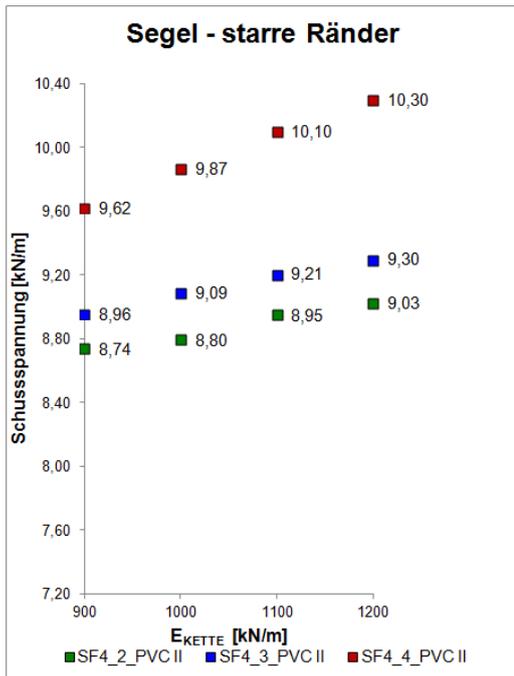
◆ PVC/PES Typ II



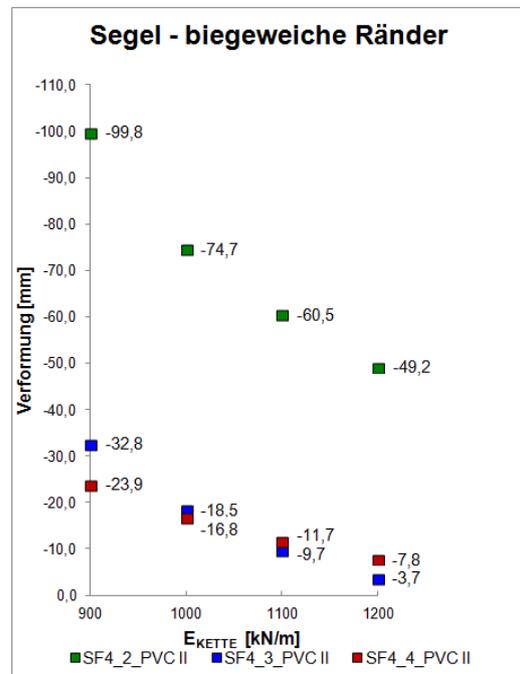
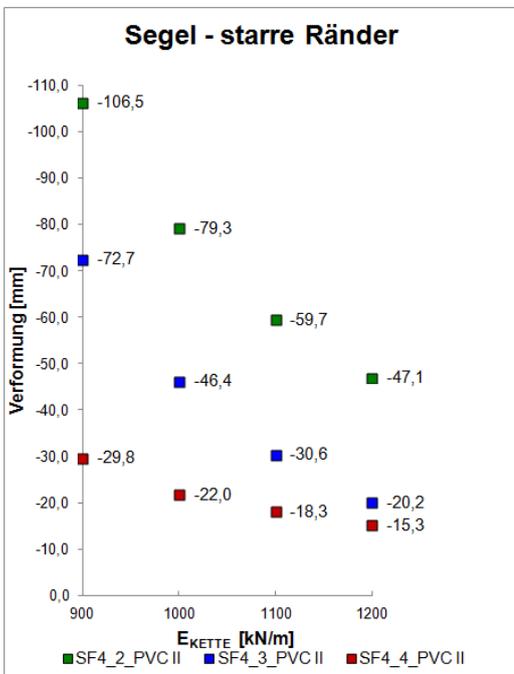
Segelform 4: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 4: Änderung der Verformungen bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 4: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

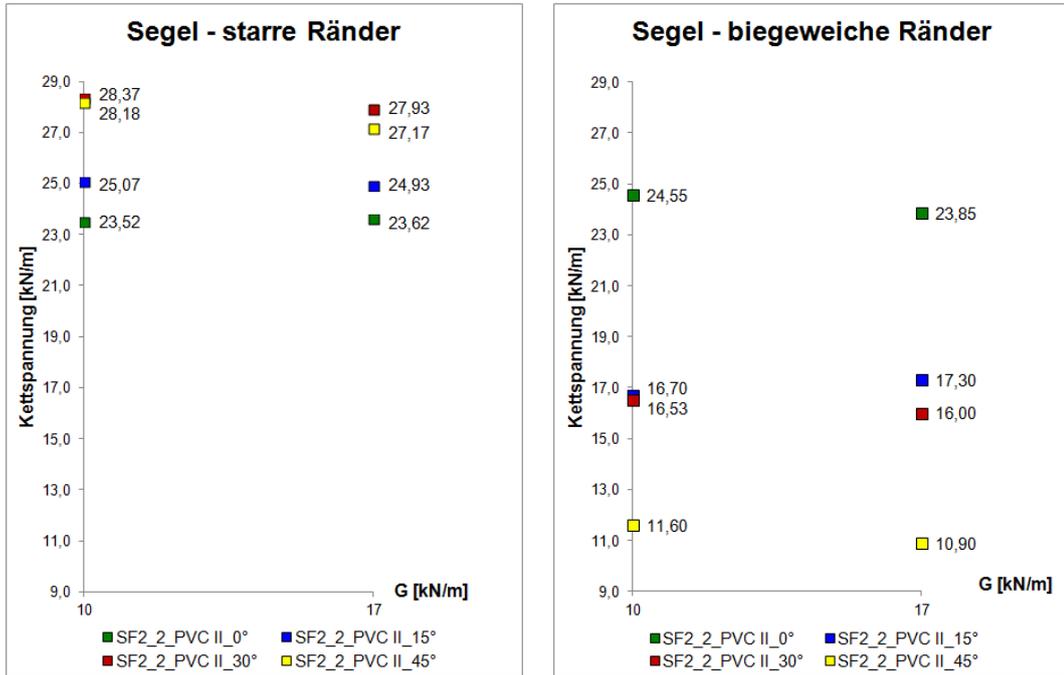


Segelform 4: Änderung der Verformung bei Variation der Dehnsteifigkeiten (E_{Kette} und E_{Schuss}) und der Membranvorspannung für Belastung durch Windsog bei konstantem Schubmodul $G = 13 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

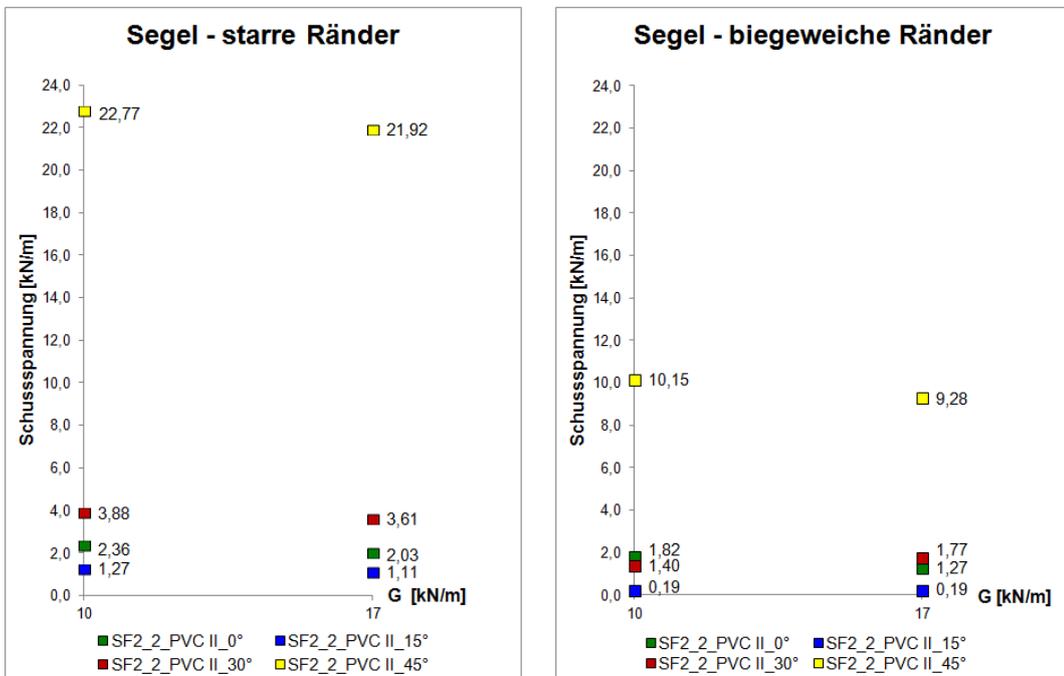
Grafische Ergebnisdarstellung der Untersuchungen mit Variation der Schubsteifigkeit

A) Segelform Nr. 2

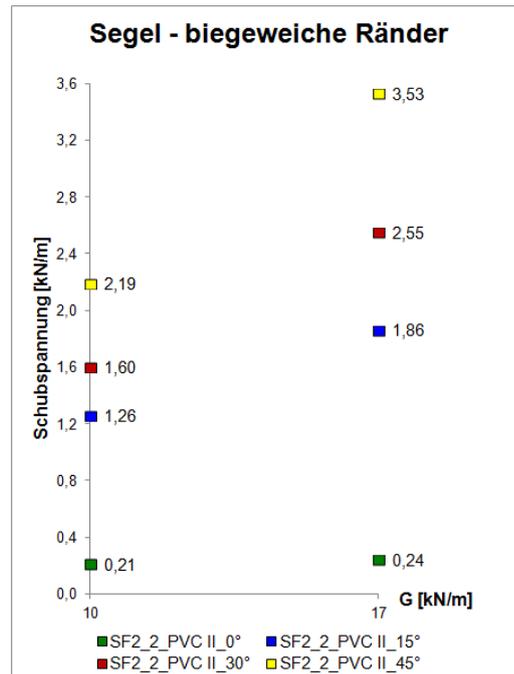
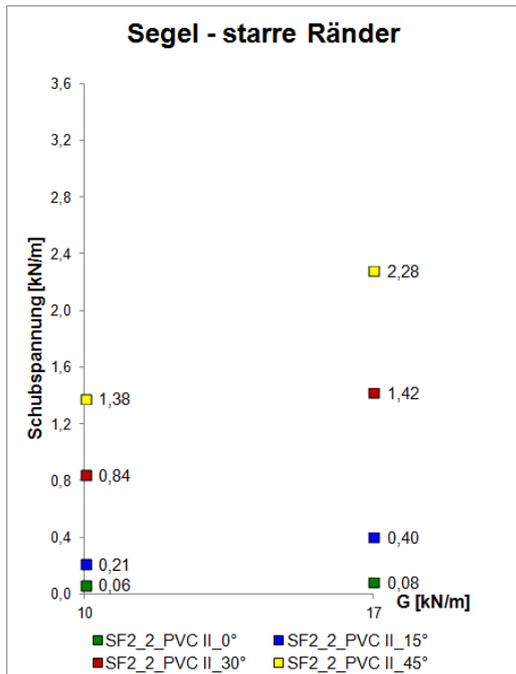
◆ PVC/PES Typ II



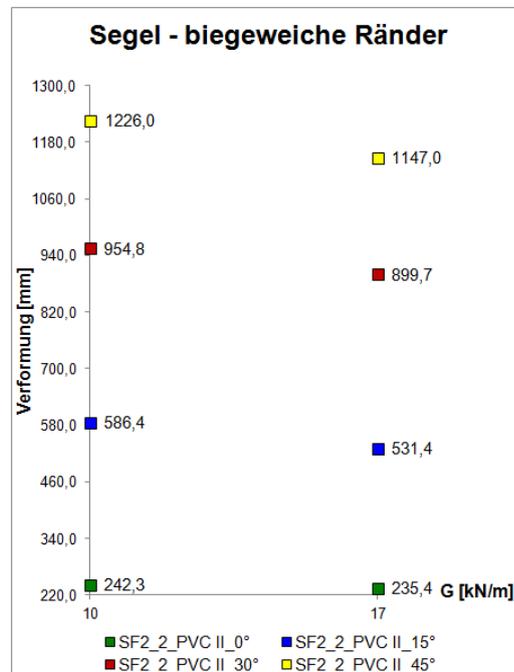
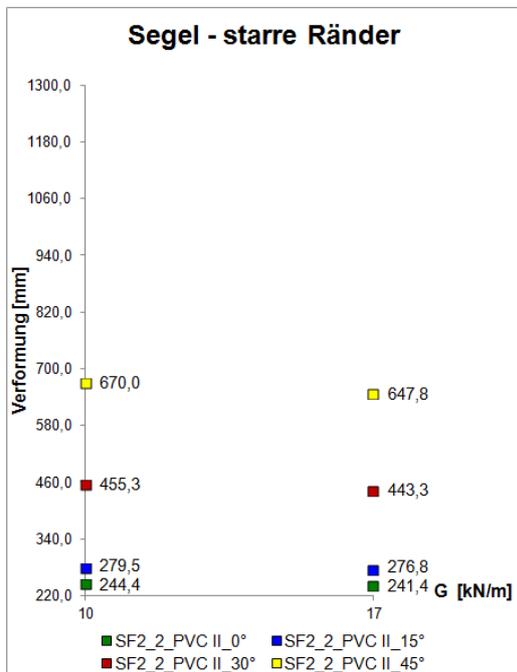
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 990 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 810 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biege weiche Ränder



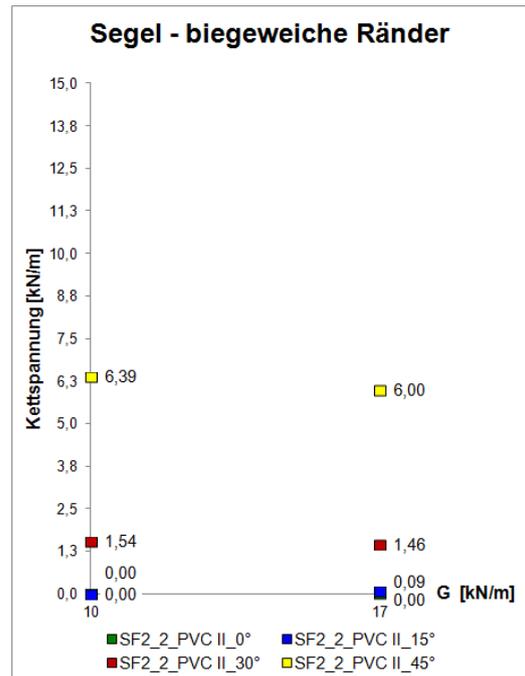
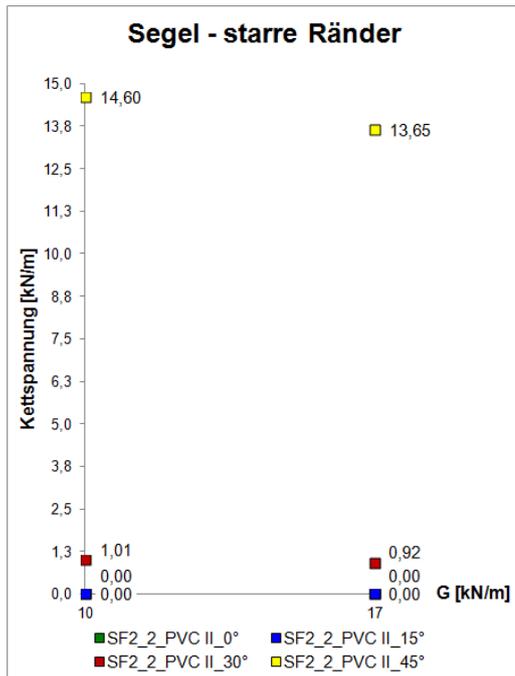
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 990 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 810 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biege weiche Ränder



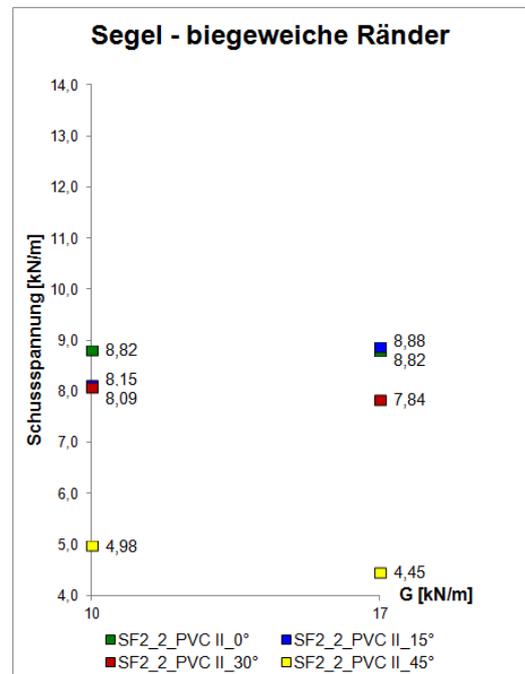
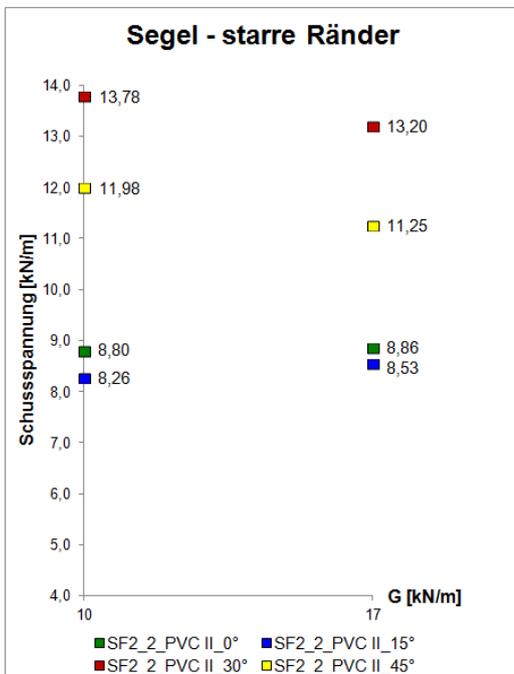
Segelform 2: Änderung der Schubspannungen bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 990 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 810 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



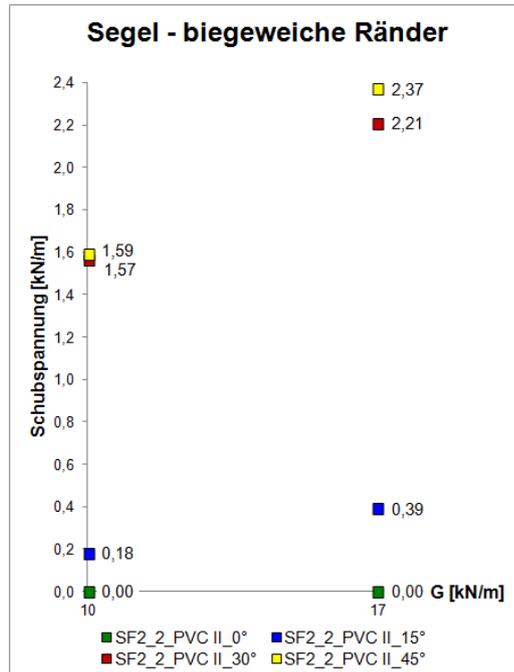
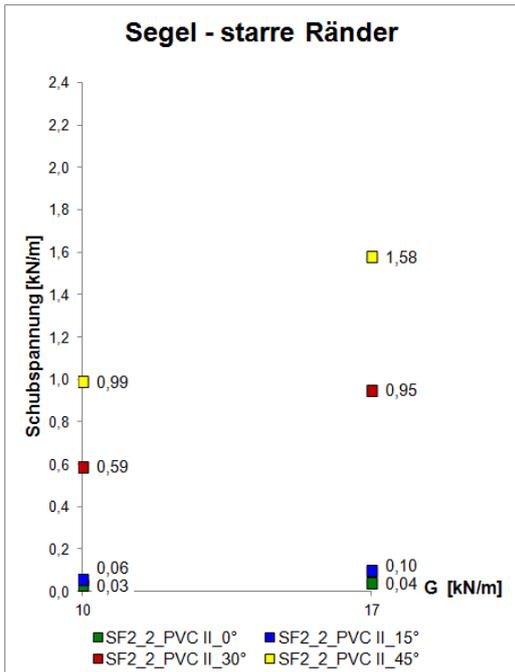
Segelform 2: Änderung der Verformungen bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 990 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 810 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



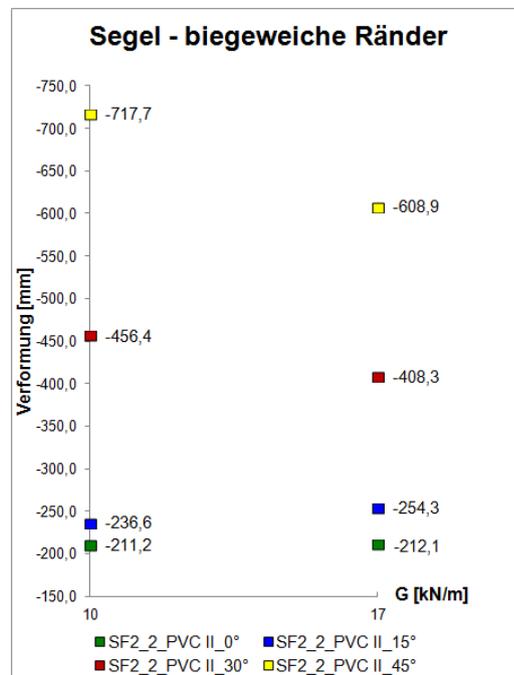
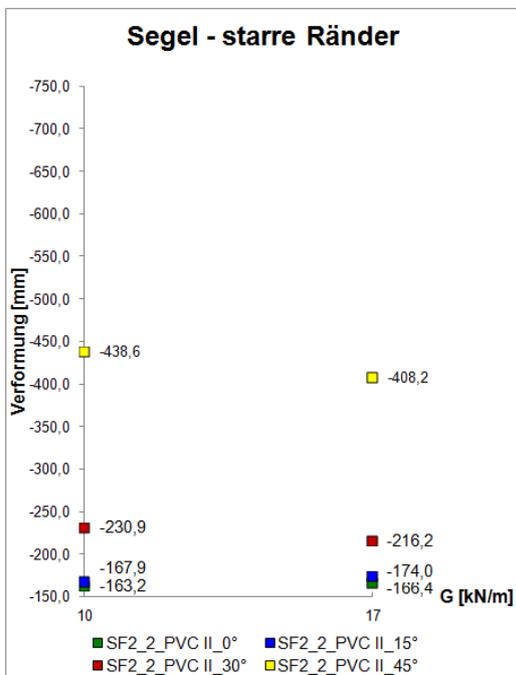
Segelform 2: Änderung der Spannungen in Kettrichtung bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Windsog bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 990 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 810 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder



Segelform 2: Änderung der Spannungen in Schussrichtung bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Windsog bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 990 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 810 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

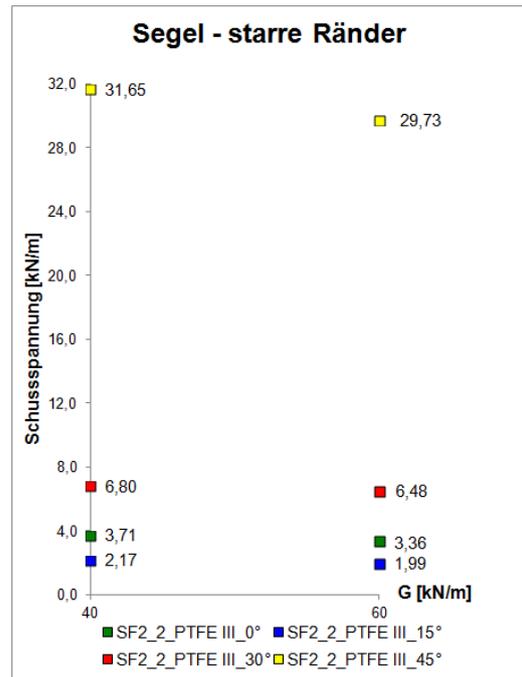
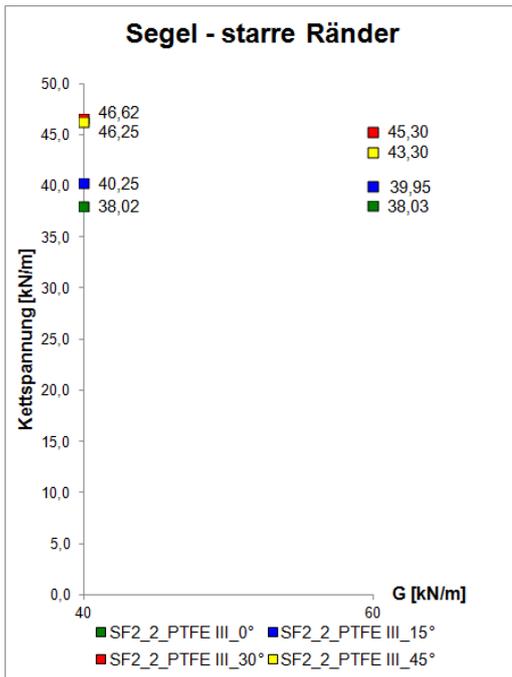


Segelform 2: Änderung der Schubspannungen bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeerorientierung für Belastung durch Windsog bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 990 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 810 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

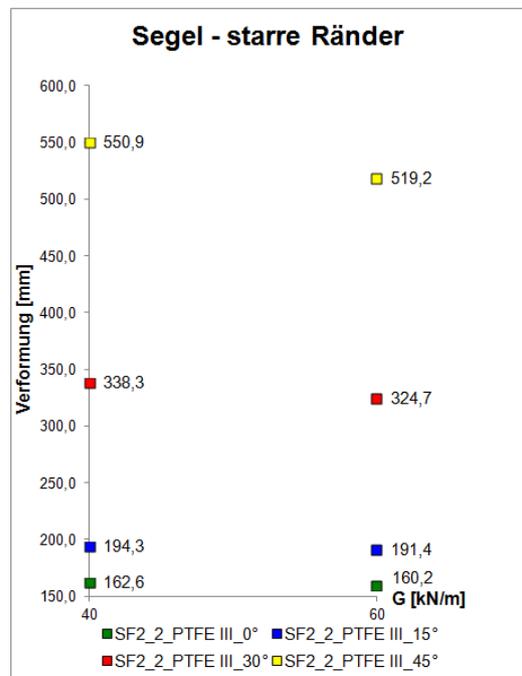
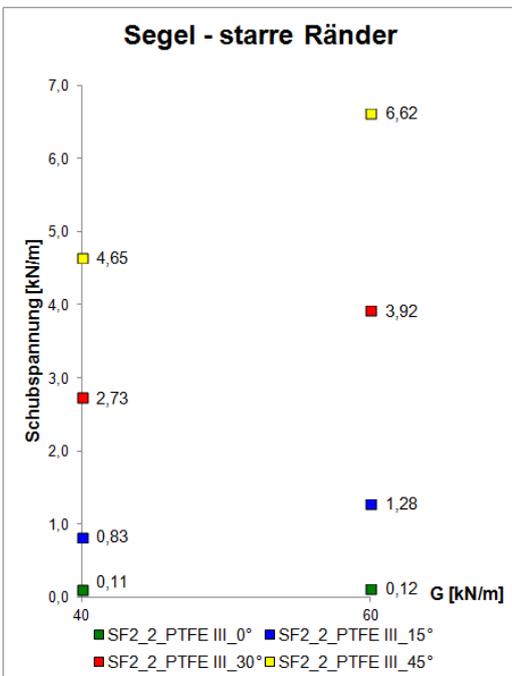


Segelform 2: Änderung der Verformung bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeerorientierung für Belastung durch Windsog bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 990 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 810 \text{ kN/m}$; links: starre Ränder, rechts: biegeeweiche Ränder

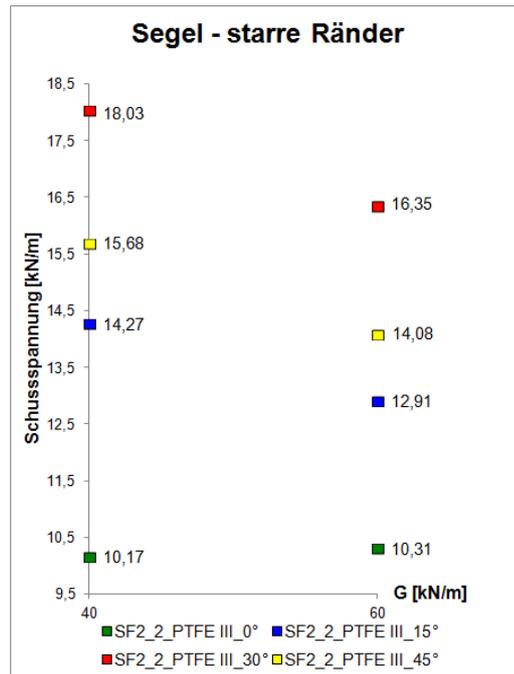
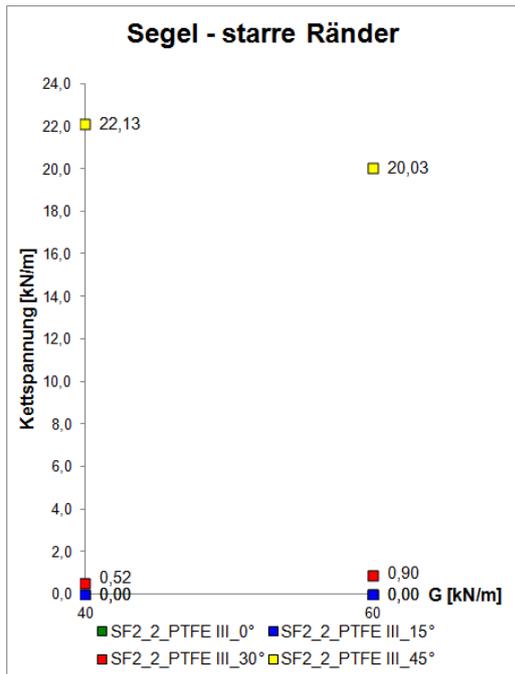
♦ PTFE/Glas Typ III



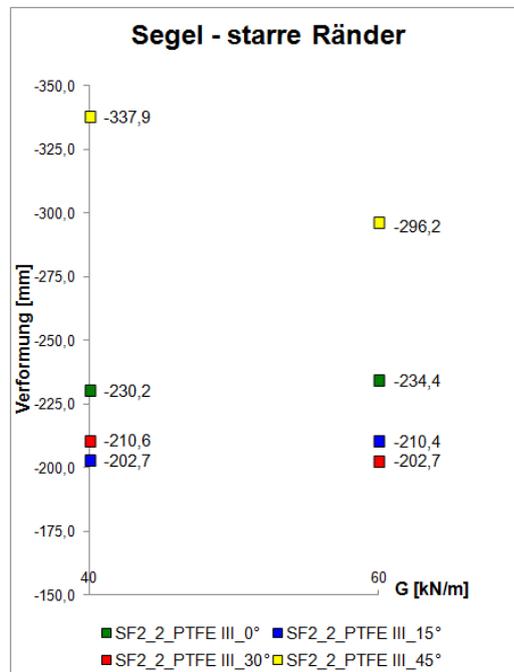
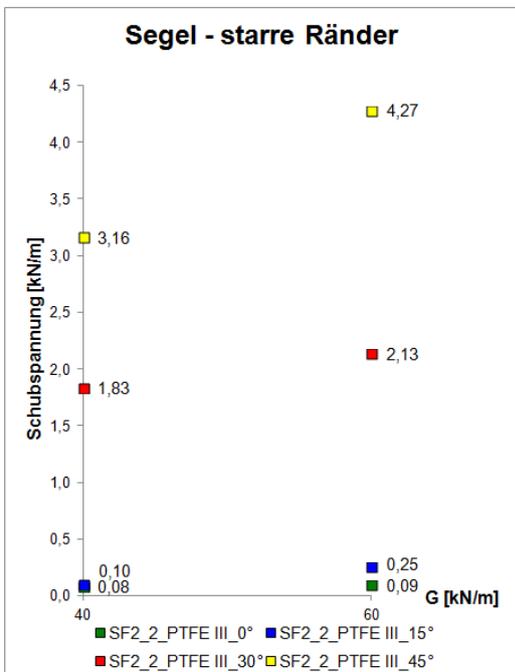
Segelform 2 (starre Ränder): Änderung der Spannung bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 2130 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 1310 \text{ kN/m}$; links: in Kettrichtung, rechts: in Schussrichtung



Segelform 2 (starre Ränder): Änderung der Spannung bzw. Verformung bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Schnee und Winddruck bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 2130 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 1310 \text{ kN/m}$; links: Schubspannungen, rechts: Verformung



Segelform 2 (starre Ränder): Änderung der Spannung bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Windsog bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 2130 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 1310 \text{ kN/m}$; links: in Kettrichtung, rechts: in Schussrichtung



Segelform 2 (starre Ränder): Änderung der Spannung bzw. Verformung bei Variation der Schubsteifigkeit und der Gewebeorientierung für Belastung durch Windsog bei konstanten Dehnsteifigkeiten $E_{Kette} = 2130 \text{ kN/m}$ und $E_{Schuss} = 1310 \text{ kN/m}$; links: Schubspannungen, rechts: Verformung

Eingabetasks für die numerische Berechnung

Im Folgenden werden die Eingabetasks für die Berechnung des Segel mit starren und biegeweichen Rändern im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) dargestellt. Die Eingabe im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) gestaltet sich analog, weswegen auf eine Darstellung im Folgenden verzichtet wird.

Die Systemeingabe (Membranfläche, Randseile, Auflager, Lasten,...) erfolgt über die grafische System- und Lasteingabe (SOFIPLUS [36]).

A) Segel mit starren Rändern

◆ Manuelle Materialeingabe

Texteingabe:

+PROG AQUA

HEAD Material manuelle Eingabe

NORM 'OEN' 'en1993-2005' COUN 43

MATE 1 E 900/1.0 E90 600/1.0 G 13/1.0 MUE 0.499 TITL 'PVC/PES Typ II 1.0 mm'

NMAT 1 MEMB

END

Erläuterungen:

Programmaufruf AQUA

Programmkopf

Definition des Membranmaterials

Definition des Materials als Membrane

◆ Formfindung

Texteingabe:

+PROG ASE

HEAD Formfindung

CTRL CABL 0

CTRL ITER 3 V2 1

SYST PROB TH3 ITER 100 NMAT YES

GRP - FACS 1

GRP 1 FACS 1e-10 PREX 2 PREY 2

LC 1 TITL 'Formfindung - SLS'

END

Erläuterungen:

Programmaufruf ASE

Programmkopf

Wahl des Iterationsverfahrens

Theorie 3. Ordnung, Anzahl der Iterationen, Berücksichtigung der materiellen Nichtlinearität

Steifigkeitsaktivierung aller Gruppen

Änderung der Membransteifigkeit, Definition der Membranvorspannung

Lastfallbezeichnung

◆ Formfindung - Ausgleichsrechnung mit voller Steifigkeit

Texteingabe:

+PROG ASE

HEAD Ausgleich Restkräfte FAKS=1.0

CTRL CABL 0

SYST PROB TH3 ITER 200 PLC 1 NMAT YES

GRP - FACS 1

LC 2 TITL 'Formfindung FASK=1.0 SLS'

END

Erläuterungen:

Programmaufruf ASE

Programmkopf

Theorie 3. Ordnung, Anzahl der Iterationen, Definition des Primärlastfalls, Berücksichtigung der materiellen Nichtlinearität

Steifigkeitsaktivierung aller Gruppen

Lastfallbezeichnung

◆ Systemupdate basierend auf der Formfindungsgeometrie

Texteingabe:

+PROG ASE

HEAD Koordinaten-Update

SYST PLC 2 STOR YES

END

Erläuterungen:

Programmaufruf ASE

Programmkopf

Systemupdate basierend auf der Formfindungsgeometrie

◆ Update der Lastrichtungen

Texteingabe:

+PROG SOFILOAD

HEAD Update Schnee + Winddruck

LC 100 REST

END

Erläuterungen:

Programmaufruf SOFILOAD

Programmkopf

Update der Belastung in der lokalen z-Richtung

Die Eingabe für den Lastupdate des Lastfalls „Windsog“ erfolgt analog dem Eingabetask für den Lastfall „Schnee + Winddruck“.

◆ Nichtlineare Berechnung

Texteingabe:

+PROG ASE

HEAD Berechnung Schnee + Winddruck

CTRL CABL 0

CTRL ITER 3 V2 1

SYST PROB TH3 ITER 1000 PLC 2 NMAT YES

GRP - FACS 1

LC 3 TITL 'SLS_Schnee + Winddruck'

LCC 100 FACT 1.7

END

Erläuterungen:

Programmaufruf ASE

Programmkopf

Wahl des Iterationsverfahrens

Theorie 3. Ordnung, Anzahl der Iterationen, Definition des Primärlastfalls, Berücksichtigung der materiellen Nichtlinearität

Steifigkeitsaktivierung aller Gruppen

Lastfallbezeichnung

Hinzufügen von Lastfällen, Lastfaktor für die Einheitslast

Die Eingabe zur nichtlinearen Berechnung des Lastfalls „Windsog“ erfolgt analog dem Eingabetask für den Lastfall „Schnee + Winddruck“.

B) Segel mit biegeweichen Rändern

◆ Manuelle Materialeingabe

Texteingabe:

+PROG AQUA

HEAD Material manuelle Eingabe

NORM 'OEN' 'en1993-2005' COUN 43

MATE 1 E 900/1.0 E90 600/1.0 G 13/1.0 MUE 0.499 TITL 'PVC/PES Typ II 1.0 mm'

NMAT 1 MEMB

STEE 2 Y 1770 ES 195000 TMAX 0

CABL 1 D 10 TYPE 1x7 MNO 2

END

Erläuterungen:

Programmaufruf AQUA

Programmkopf

Definition des Membranmaterials

Definition des Materials als Membrane

Definition des Randseilmaterials

Querschnittsdefinition und
Materialzuordnung Randseil

◆ Formfindung

Texteingabe:

+PROG ASE

HEAD Formfindung

CTRL CABL 0

CTRL ITER 3 V2 1

SYST PROB TH3 ITER 100 NMAT YES

GRP - FACS 1

GRP 1 FACS 1e-10 PREX 2 PREY 2

GRP 2 FACS 0.001 PREX 30

LC 1 TITL 'Formfindung - SLS'

END

Erläuterungen:

Programmaufruf ASE

Programmkopf

Wahl des Iterationsverfahrens

Theorie 3. Ordnung, Anzahl der Iterationen, Berücksichtigung der
materiellen Nichtlinearität

Steifigkeitsaktivierung aller Gruppen

Änderung der Membransteifigkeit, Definition der Membranvorspannung

Änderung der Randseilsteifigkeit, Definition der Randseilvorspannung

Lastfallbezeichnung

Die weiteren Eingabetasks gestalten sich analog der Eingabe des Segels mit starren Rändern.