



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich: Landschaftsarchitektur, Geoinformatik, Geodäsie und Bauingenieurwesen

Studiengang: Bauingenieurwesen

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Akademischen Grades

„Bachelor of Engineering“

Vergleichbarkeit der Messwerte des Elastizitätsmoduls aus der Dreipunktbiegung nach DIN EN ISO 178 / DIN EN 13566-4 und aus dem Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1228 anhand eigener Prüfungen und der statistischen Auswertung bestehender Prüfergebnisse

vorgelegt von: Steffen Dettmann

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Volker Wagner
Dipl.-Ing. Andreas Haacker

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2011-0071-8

Eingereicht am: 23. Mai 2011



Hochschule Neubrandenburg
Postfach 110121, 17041 Neubrandenburg

Bachelorthesis für Herrn Steffen Dettmann ,

„Vergleichbarkeit der Messwerte des Elastizitätsmoduls aus der 3-Punktbiegung nach DIN EN ISO 178 / DIN EN 13566-4 und aus dem Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1228 anhand eigener Prüfungen und der statistischen Auswertung bestehender Prüfergebnisse“

Ein weit verbreitetes Verfahren in der Rohrsanierung ist das Schlauchlining, bei dem harzgetränkte Schläuche unter der Erde zu Kunststoffrohren aushärten. In den Zulassungen muss für jeden eingebauten Schlauchliner Eignung, Standsicherheit und Umweltverträglichkeit nachgewiesen werden. Für den Standsicherheitsnachweis werden im Bauwesen üblicherweise Materialkennwerte herangezogen. Ein wichtiger Kennwert ist dabei das Elastizitätsmodul (E-Modul).

In Erstzulassungsprüfungen wird gemäß DIN EN 1228 der Materialkennwert als Umfangs-E-Modul ermittelt. Hierzu wird der Scheiteldruckversuch angewendet, ein Versuch, bei dem Druck auf den Rohrring ausgeübt wird.

In der Abnahmepraxis auf der Baustelle stehen aber in der Regel keine Rohrringe, sondern nur Ausschnitte zur Verfügung. Deshalb werden die zum Nachweis der Qualität erforderlichen Materialkennwerte über die 3-Punkt-Biegung gemäß DIN EN ISO 178/ DIN EN 13566-4 ermittelt. Hieraus ergibt sich dann der Biege-E-Modul.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, in wie weit sich der Umfangs-E-Modul nach DIN EN 1228 und der Biege-E-Modul nach DIN EN ISO 178/ DIN EN 13566-4 entsprechen.

Haus- und Lieferadresse
Brodaer Straße 2
17033 Neubrandenburg

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Bilder	I
Verzeichnis der Tabellen.....	III
Verzeichnis der Abkürzungen	IV
1. Einleitung.....	1
2. Aufgabenstellung.....	3
3. Grundlagen der Mechanik	4
3.1. Statisch relevante Materialkennwerte.....	4
3.1.1. Elastizitätsmodul.....	4
3.1.2. Biegespannung.....	5
3.1.3. Ringsteifigkeit	6
4. Normen für die Materialprüfung an Schlauchlinern	7
4.1. Dreipunkt-Biegeversuch	7
4.1.1. DIN EN ISO 178	7
4.1.2. DIN EN 13566-4	8
4.2. Scheiteldruckversuch	10
4.2.1. DIN EN 1228.....	10
4.3. ZTV - Materialprüfung.....	11
5. Prüfung der statisch relevanten Materialkennwerte von Schlauchlinern	13
5.1. Herkunft der Proben	13
5.2. Vorbereitungsarbeiten	14
5.2.1. Messen	15
5.2.2. Protokollierung.....	16
5.3. Versuchsdurchführung	16
5.3.1. Scheiteldruckversuch.....	18
5.3.2. Ermittlung der Ringspannung	19
5.3.3. Dreipunkt-Biegeversuch	21
6. Ergebnisse.....	24
6.1. Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen.....	24
6.1.1. Übersicht der Ergebnisse aus den Versuchen	24
6.2. Unterteilung der Prüfergebnisse in Gruppen	26
6.2.1. Unterteilung nach Trägermaterial	27
6.2.2. Unterteilung nach Produkt und Durchmesser	29
6.3. Ermittlung der Ringspannung	34
6.4. Bestehende Prüfergebnisse	35
7. Bewertung der Ergebnisse	37
7.1. Auswertung der durchgeführten Versuche	37
7.2. Auswertung einzelner Versuche	38
7.2.1. Auswertung des Versuches 1	38
7.2.2. Auswertung des Versuches 3	39
7.2.3. Auswertung des Versuches 4	40
7.2.4. Auswertung des Versuches 5	42
7.2.5. Auswertung des Versuches 16	43

7.2.6.	Auswertung des Versuches 17	45
7.2.7.	Auswertung des Versuches 6	47
7.2.8.	Auswertung des Versuches 19	48
7.2.9.	Auswertung des Versuches 24	49
7.2.10.	Auswertung des Versuches 11	51
7.3.	Vergleichende Betrachtung der Einzelversuche	53
7.4.	Auswertung nach Unterteilung in Gruppen	54
7.4.1.	Unterteilung nach Trägermaterial	54
7.4.2.	Unterteilung nach Produkt und Durchmesser	55
7.5.	Schmale Ringe	56
7.6.	Nahtbereiche	56
7.7.	Das Durchmesser-Wanddickenverhältnis	58
7.8.	Auswertung der Ringspannung	60
7.9.	Auswertung mit einem Quantilfaktor	60
7.10.	Auswertung bestehender Prüfergebnisse von Baustellen	61
8.	Fehlerbetrachtung	62
8.1.	Messunsicherheit	62
8.2.	Bestimmung der Messunsicherheit	62
8.2.1.	Verbundwanddicke	62
8.2.2.	Probenbreite in der Dreipunkt-Biegeversuch	63
8.2.3.	Länge eines Rohrabschnittes	64
8.2.4.	Mittlerer Durchmesser eines Rohrabschnittes	65
8.3.	Auswirkung von Messfehlern auf die Versuchsergebnisse	65
8.4.	Verwendete Formeln	66
8.5.	Einfluss der Probengröße auf die Messergebnisse	68
9.	Zusammenfassung	69
10.	Danksagung	71
	Literaturverzeichnis	V
	Eidesstattliche Erklärung	VII

Verzeichnis der Bilder

Bild 1.1. Jahresleistung von Einbaukilometerlängen von Schlauchliner in Deutschland: 2010 ca. 1180 km [21].....	1
Bild 3.1. Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Verbundwerkstoffes mit einer ausgeprägten Biegekapazität [4].....	5
Bild 4.1. Prinzipdarstellung des Dreipunkt-Biegeversuchs [6].....	7
Bild 4.2. Prinzipdarstellung der Prüfanordnung mit gebogenem Probekörper nach DIN EN 13566-4 [4].....	9
Bild 4.3. Prinzipdarstellung der Prüfanordnung mit abgeflachten Rundstangen nach DIN EN 1228 [3].....	10
Bild 4.4. Verfahren A: Last und zugehörige Verformung über die Zeit [3].....	10
Bild 4.5. Verfahren B: Verformung und zugehörige Last über die Zeit [3].....	10
Bild 5.1. Abziehen des Zugbandes.....	14
Bild 5.2. Überstehende Ränder nach dem Sägen entfernen.....	14
Bild 5.3. (links) Die 12 Messstellen eines Ringabschnittes für den Scheiteldruckversuch.....	15
Bild 5.4. (unten) Die 6 Messstellen im Drittelbereich eines gekrümmten Probekörpers für den Dreipunkt-Biegeversuch.....	15
Bild 5.5. Verwendete Messschieber (nach DIN 862), links digitaler Messschieber der Bauform A und rechts analoger Messschieber in der Bauform F, auch als Werkstattmessschieber bekannt.....	15
Bild 5.6. Wanddickenmessung an einem gebogenen Probekörper.....	16
Bild 5.7. Messung der Innenbeschichtung eines Liners.....	16
Bild 5.8. Universalprüfmaschine Zwick Z010.....	17
Bild 5.9. Bedienfenster der Prüfsoftware mit vorgesehenen Feldern für die Eingabe der Probenparameter.....	17
Bild 5.10. Anzeichnen der Referenzlinien an einem Schlauchliner-Rohrabschnitt.....	18
Bild 5.11. Eingespannte Probe für den Scheiteldruckversuch.....	18
Bild 5.12. Last- und Verformungsaufzeichnung durch die Software.....	19
Bild 5.13. Zusammenspringen des Ringes durch innere Spannungen.....	20
Bild 5.14. Prüfmaschine, mit Spannbacken und Haken ausgerüstet, für die Messung der Ringspannung.....	20
Bild 5.15. Umgerüstete Prüfmaschine mit eingespannter Probe.....	20
Bild 5.16. Kraft-Weg-Diagramm zur Ermittlung der inneren Ringspannung.....	21
Bild 5.17. Ringprobe geteilt in Probekörper.....	22
Bild 5.18. Einstellen der Auflagerdistanz mit aufliegendem Probekörper.....	22
Bild 5.19. Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Dreipunkt-Biegeversuchs.....	22
Bild 7.1. Beispiel für die grafische Darstellung der E-Module im Balkendiagramm und über dem Ring.....	37
Bild 7.2. Beispiel der grafischen Darstellung der E-Module und der Wanddicke über dem Ring.....	38
Bild 7.3. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 1.....	38
Bild 7.4. Feinschnitt der Probe 5 mit kleinen Poren.....	39
Bild 7.5. Feinschnitt der Probe 6 mit Innennaht und oben liegender Überlappung.....	39
Bild 7.6. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 3.....	39
Bild 7.7. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 5 und 7.....	40

Bild 7.8. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 4.....	40
Bild 7.9. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 3, 4 und 7.....	41
Bild 7.10. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 5.....	42
Bild 7.11. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 3, 5 und 7.....	42
Bild 7.12. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 16.....	43
Bild 7.13. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 2 und 4.....	44
Bild 7.14. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 7 und 9.....	44
Bild 7.15. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 17.....	45
Bild 7.16. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 3 und 8.....	45
Bild 7.17. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 4 und 10.....	46
Bild 7.18. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 6.....	47
Bild 7.19. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 2, 3 und 7.....	47
Bild 7.20. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 19.....	48
Bild 7.21. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 4, 5 und 8.....	48
Bild 7.22. Aufnahme des Feinschnittes der Probe 3.....	49
Bild 7.23. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 24.....	49
Bild 7.24. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 2, 8, 11 und 12.....	50
Bild 7.25. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 11.....	51
Bild 7.26. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 2, 4 und 9.....	52
Bild 7.27. Vergleich E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch.....	53
Bild 7.28. Vergleich normierte E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt- Biegeversuch.....	53
Bild 7.29. Häufigkeit der Abweichung des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch.....	54
Bild 7.30. Schematische Darstellung der Berücksichtigung von Nahtbereichen bei der Probenentnahme.....	57
Bild 7.31. Abweichung des E-Moduls in Abhängigkeit des Durchmesser-Wanddicken- Verhältnisses.....	58
Bild 7.32. Abweichung des E-Moduls von Glasfaser und Synthefaserlinern in Abhängigkeit des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisses.....	59
Bild 7.32. Häufigkeit der Abweichung des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch von Baustellenproben.....	61
Bild 8.1. Schematische Darstellung einer Verteilung der Verbundwanddicke über eine Probe.....	62
Bild 8.2. Schematische Darstellung der geometrischen Abweichungen der Probebreite.....	63
Bild 8.3. Schematische Darstellung der geometrischen Abweichungen eines Rohrabschnittes.....	64
Bild 8.4. Schematische Darstellung einer eventuellen Abweichung im Kreisprofil.....	65
Bild 8.5. Abweichung der veränderten Verbundwanddicke und des errechneten E- Moduls, zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch.....	67

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 4.1. Werte für die Breite der Probekörper in Längsrichtung b , in Beziehung zur mittleren Verbunddicke e_m , [4].....	9
Tabelle 4.2. Darstellung der Ergebnisse, Auszug Tabelle ZTV – Materialprüfung [22].....	12
Tabelle 6.1. Vergleich der ermittelten E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch.....	25
Tabelle 6.2. Vergleich von breiten mit schmalen Rohrabschnitten und mit dem Dreipunkt-Biegeversuch.....	26
Tabelle 6.3. Vergleich des Scheiteldruckversuchs mit dem Dreipunkt-Biegeversuch von „Synthesefaserlinern“.....	27
Tabelle 6.4. Vergleich des Scheiteldruckversuchs mit der Dreipunkt-Biegeversuch von „Glasfaserlinern“.....	28
Tabelle 6.5. Vergleich „schmale Ringe“ mit dem Dreipunkt-Biegeversuch „Synthesefaserliner“.....	28
Tabelle 6.6. Vergleich „schmale Ringe“ mit dem Dreipunkt-Biegeversuch „Glasfaserliner“.....	29
Tabelle 6.7. Produkt A Synthesefaserliner DN 250.....	29
Tabelle 6.8. Produkt A Synthesefaserliner DN 300.....	30
Tabelle 6.9. Produkt B Synthesefaserliner DN 300.....	30
Tabelle 6.10. Produkt B Synthesefaserliner DN 300 mit „schmalen Ringen“.....	30
Tabelle 6.11. Produkt B Synthesefaserliner DN 600.....	31
Tabelle 6.12. Produkt B Synthesefaserliner DN 600 mit „schmalen Ringen“.....	31
Tabelle 6.13. Produkt C Synthesefaserliner DN 300.....	31
Tabelle 6.14. Produkt D Synthesefaserliner DN 200.....	32
Tabelle 6.15. Produkt D Synthesefaserliner DN 600.....	32
Tabelle 6.16. Produkt D Synthesefaserliner DN 600 mit „schmalen Ringen“.....	32
Tabelle 6.17. Produkt E Glasfaserliner DN 300.....	32
Tabelle 6.18. Produkt E Glasfaserliner DN 300 mit „schmalen Ringen“.....	33
Tabelle 6.19. Produkt E Glasfaserliner DN 400.....	33
Tabelle 6.20. Produkt E Glasfaserliner DN 400 mit „schmalen Ringen“.....	34
Tabelle 6.21. Produkt F Glasfaserliner DN 300.....	34
Tabelle 6.22. Produkt F Glasfaserliner DN 300 mit „schmalen Ringen“.....	34
Tabelle 6.23. Innere Ringspannung der zusammengefallenen Ringe.....	35
Tabelle 6.24. Abweichungen der Baustellenproben, unterteilt nach Durchmesser.....	35
Tabelle 7.1. Vergleich Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch, unterteilt nach Gruppen.....	55
Tabelle 7.2. Auswirkungen der Nahtbereiche auf das E-Modul der Schlauchliner.....	57
Tabelle 8.1. Verbundwanddicken von verschiedenen Schlauchlinerproben in [mm].....	63
Tabelle 8.2. Ermittelte Messwerte der Breite von zwei Proben in [mm].....	64
Tabelle 8.3. Ermittelte Messwerte der Länge eines Rohrabschnittes in [mm].....	64
Tabelle 8.4. Ermittelte Messwerte der Durchmesser an einem Rohrabschnitt in [mm].....	65

Verzeichnis der Abkürzungen

ATV	-	Abwassertechnische Vereinigung
DIBT	-	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
DVWK	-	Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.
DWA	-	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
E-Modul	-	Elastizitätsmodul
EN	-	Europäische Norm
EP	-	Epoxidharz
EU	-	Europäische Union
GF	-	Glasfaser
GFA	-	Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik
ISO	-	Internationale Organisation für Normung
M	-	Merkblatt
PE	-	Polyethylen
PHA	-	Polyhydroxyalkanoate
PUR	-	Polyurethane
SF	-	Synthesefaser
UP	-	Ungesättigte Polyesterharze
UV	-	Ultraviolettstrahlung
UVA	-	Ultraviolettstrahlung A (langwellig)
ZTV	-	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

1. Einleitung

Die ersten geordneten Abwasserkanalisationen entstanden Mitte des 19. Jahrhunderts in den Großstädten Europas. Heute, ca. 150 Jahre später, umfasst das öffentliche Abwasserkanalnetz in Deutschland bereits eine Gesamtlänge von 540.723 km [19]. Nach der DWA-Umfrage 2009 über den Zustand der Kanalisation in Deutschland sind nach der Zustandsklassifizierung gemäß der ATV-M 149 [18] schätzungsweise 17 % des Kanalnetzes kurz- bis mittelfristig sanierungsbedürftig und weitere 18 % müssen langfristig saniert werden [9]. Eine Sanierung nach DIN EN 752-5 [5] kann als Reparatur, Renovierung oder Erneuerung erfolgen und stellt dabei eine Wiederherstellung oder Verbesserung des Kanals dar.

Eine der erfolgreichsten Kanalrenovierungsmethoden ist das Schlauchlining. 1971 trat der englische Agraingenieur Eric Wood mit seiner Entwicklung dem Insituform Verfahren (lat.: Insitu = vor Ort, engl.: to form = formen, bilden) an die Öffentlichkeit und meldete dieses Verfahren, das erste Schlauchlining-Verfahren, 1975 für ein EU-Patent an. Dieser Schlauchliner bestand aus Synthefaser, wurde mit Polyesterharz imprägniert, mit einem sogenannten Inversionsverfahren unter Wasserdruck in einen Abwasserkanal gekrempelt und mit Wärme zu einem Kunststoffrohr, einem Liner, ausgehärtet [21].

1989 startete das Inpipe-Schlauchliningverfahren (Schweden), das mit einem Glasfaser-mattenliner mit PE/PUR Außen- und Innenfolie im Umstülperverfahren mittels Druckluft in den Abwasserkanal eingebracht wurde und als erstes Schlauchverfahren mit UVA-Licht ausgehärtet wurde. Der erste UV-härtende Schlauchliner für industrielle Anwendungen wurde allerdings schon 1985 in Ludwigshafen/Rhein installiert [21].

Heute ist die jährliche Einbauleistung von Schlauchlinern fast 1200km in Deutschland (siehe Bild 1.1)

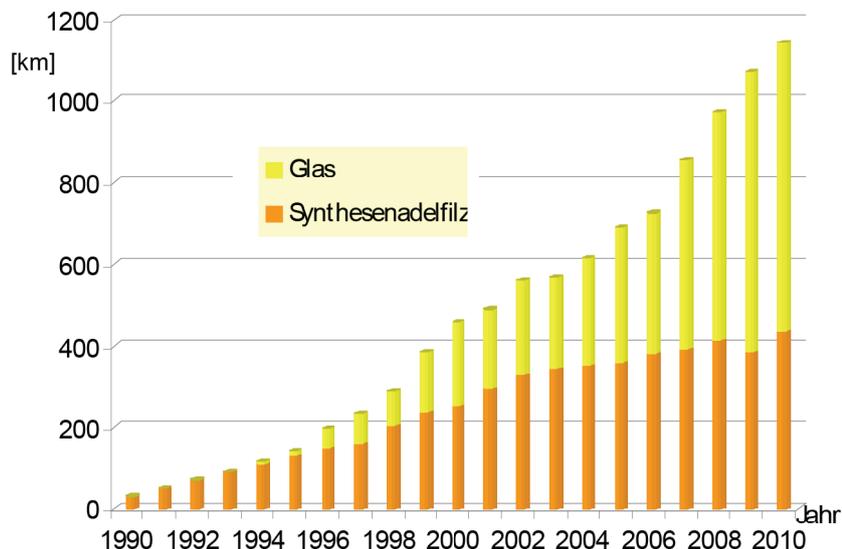


Bild 1.1. Jahresleistung von Einbaukilometerlängen von Schlauchliner in Deutschland: 2010 ca. 1180 km [21]

Grund für die stetige Zunahme der Sanierungsmethode ist der steigende Bekanntheitsgrad, die Schulung von Fachpersonal, aber auch die klaren Festlegungen von Anforderungen an den Schlauchliner. Die Sanierung ist mit einer rechnerischen Standzeit von 50 Jahren und geringeren Investitionskosten günstiger als eine Erneuerung.

Beim Schlauchliningverfahren wird ein mit Harz getränkter Schlauch in die Haltung eingeführt und vor Ort zu einem Kunststoffrohr ausgehärtet. Der Schlauchliner ist ein werkseitig vorgefertigtes Produkt. Die Herstellung des Endproduktes erfolgt erst am Einbauort. Faktoren, wie zum Beispiel Erfahrung und Fähigkeit des Einbauers, baustellenabhängige Bedingungen und Witterung haben einen großen Einfluss auf die letztendliche Qualität des Endproduktes. Daher ist nach der Herstellung des eingebauten Schlauchliners eine Qualitätsprüfung durchzuführen. Das erfolgt über das Überprüfen der statisch relevanten Materialkennwerte. Einer dieser Kennwerte ist das Elastizitätsmodul, in dieser Arbeit auch kurz E-Modul genannt, welches die Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Verformung des Materials beschreibt.

Bevor ein Schlauchliner als Bauprodukt auf dem Markt eingeführt werden soll, muss dieser auf seine Funktionalität, Umweltverträglichkeit oder auch einer Gleichwertigkeit gegenüber anderen Produkten überprüft werden und bekommt in Deutschland die Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) mit einer Erstzulassungsprüfung [12]. Bei der Zulassung sowie der Überwachung stehen ganze Rohrabschnitte zur Ermittlung der Materialkennwerte zur Verfügung. Deshalb kann die Prüfung im Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1228 erfolgen, bei der eine Kraft auf einen Rohrabschnitt ausgeübt wird, um das Umfangs-E-Modul zu ermitteln.

Da der Schlauchliner erst vor Ort auf der Baustelle zu dem Endprodukt wird, kann die Probenentnahme nur direkt aus dem Kanal oder einem Schacht heraus erfolgen. Deshalb stehen häufig keine ganzen Rohrabschnitte für die Prüfung zur Verfügung, sondern Ausschnitte aus dem Rohr. Die Qualitätsprüfung des Schlauchliners von der Baustelle erfolgt deswegen oft über die Dreipunktbiegung nach DIN EN ISO 178 / DIN EN 13566-4, bei der ein Biege-E-Modul ermittelt wird.

Da das E-Modul eine Materialkenngröße ist, sollte es an isotropen Materialien unabhängig vom der jeweiligen Prüfung zu ermitteln sein. In der Praxis hat sich aber gezeigt, dass die ermittelten E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch starken Schwankungen unterliegen können und nicht immer einander entsprechen. Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen wie es zu diesen Abweichungen kommt und in wie weit die E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch vergleichbar sind.

2. Aufgabenstellung

In dieser Arbeit soll untersucht werden, inwieweit das Umfangs-E-Modul nach DIN EN 1228 und das Biege-E-Modul nach DIN EN ISO 178 / DIN EN 13566-4 sich entspricht.

Anhand eigener Prüfungen und der statistischen Auswertung bestehender Prüfergebnisse sollen die E-Module von Schlauchlinern untersucht werden. Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, wie es zu den Abweichungen zwischen dem Biege-E-Modul und dem Umfangs-E-Modul kommt, eventuelle Fehlerquellen zu erkennen und deren Auswirkung auf die E-Modul-ermittlung abzuleiten. Die daraus gewonnenen Ergebnisse werden einer statistischen Auswertung unterzogen. Ebenso soll eine statistische Auswertung von bestehenden Prüfergebnissen aus der Praxis erfolgen.

3. Grundlagen der Mechanik

Die Mechanik ist ein Teilbereich der Physik und stellt die Grundlagen für weite Bereiche der Technik dar. Im Ingenieurwesen spricht man daher von der technischen Mechanik, die für Berechnungsverfahren auf den Gebieten der Materialwissenschaft, dem Maschinenbau und der Baustatik die theoretischen Grundlagen liefert. Im Wesentlichen beschäftigt sich die technische Mechanik mit der Ermittlung von Spannungen und Verformungen elastischer Körper. Dazu werden mechanische Materialeigenschaften des Körpers wie zum Beispiel Härte, Dichte, Festigkeit, Elastizität, Plastizität, Duktilität oder Risszähigkeit herangezogen. Die Materialeigenschaften vieler Werkstoffe sind als Materialkennwerte in Datentabellen abrufbar. Für die Sanierungsmaßnahmen mittels Schlauchliner werden im Vorfeld statische Berechnungen angestellt [16], um die Eignung und Standsicherheit zu gewährleisten [12]. Daraus werden die Anforderungen an den Schlauchliner ermittelt, die mit einem gewählten System zu einer bestimmten Wanddicke führt. Nach der Herstellung des Schlauchliners werden die mechanischen Materialkennwerte überprüft, um festzustellen, ob diese den zuvor gestellten Anforderungen entsprechen.

3.1. Statisch relevante Materialkennwerte

Der Schlauchliner ist ein Faserverbundwerkstoff und besteht im Allgemeinen aus zwei Hauptkomponenten: einer Harzmatrix und den Fasern, die als Trägermaterial oder als Verstärkung dienen können. Durch die gegenseitige Wechselwirkung der beiden Komponenten erhält das Endprodukt ein eigenes E-Modul.

Das System des Schlauchliners ist abhängig von dem jeweiligen Zusammenspiel der einzelnen Komponenten und dem Erreichen der vorgeschriebenen Geometrie, um die Anforderungen aus der statischen Berechnung zu erfüllen. Die sich ergebenden Materialkennwerte geben eine Aussage über die Qualität und Eignung des Endproduktes.

3.1.1. Elastizitätsmodul

Jeder Werkstoff ist innerhalb bestimmter Grenzen elastisch. Das Elastizitätsmodul gibt Auskunft über die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegenüber einer Verformung im elastischen Bereich. Das elastische Verhalten von festen Stoffen wird durch das Hook'sche Gesetz beschrieben, in dem das E-Modul (Gleichung 1) eine Konstante ist. Es ist das Verhältnis der Längenänderung (Gleichung 3) zu einer bestimmten Belastung (Gleichung 2). Je größer das E-Modul also ist, desto kleiner ist die Dehnung des Werkstoffes bei einer bestimmten Belastung.

Die Einheit des Elastizitätsmoduls ist die der Spannung und wird in Newton pro Quadratmillimeter angegeben. Das E-Modul wird aus der Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve (Bild 3.1) berechnet.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (1)$$

mit $\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2)$

und $\varepsilon_f = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (3)$

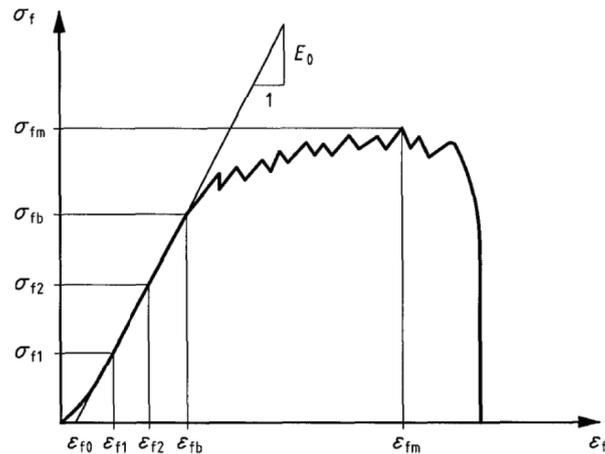


Bild 3.1. Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Verbundwerkstoffes mit einer ausgeprägten Biegekapazität [4]

Das E-Modul ist im linear-elastischen Bereich zu ermitteln. Nach Überschreiten des elastischen Bereichs wird das Material plastisch verformt bis hin zur Ausbildung eines Bruchs. Beschädigte Materialien weisen eine deutliche Minderung des E-Moduls auf.

Das E-Modul kann ebenso aus der Geometrie, Dehnung und der aufgebrachten Kraft ermittelt werden (Gleichung 4) und wird daher als das scheinbare E-Modul bezeichnet [3].

$$E = \frac{12 \cdot S_0 \cdot d_m^3}{e_m^3} \quad (4)$$

Ausgehend von der vorgefundenen spezifischen Anfangs-Ringsteifigkeit (S_0) und der ermittelten Geometrie wird das E-Modul berechnet.

3.1.2. Biegespannung

Die Spannung (σ) ist ein Begriff aus der Festigkeitslehre und wird in Kraft pro Flächeneinheit also in Newton pro Quadratmillimeter angegeben.

Erfolgt eine Lasteinwirkung auf einen Körper, der auf zwei Punkten gelagert ist, entstehen im Inneren des Körpers Spannungen. Infolge der Beanspruchung eines Körpers auf Biegung wird diese Biegespannung genannt. Aus ihr resultiert eine Verformung, die als Durchbiegung bezeichnet wird. Die Biegespannung (Gleichung 5) ergibt sich aus dem einwirkenden Moment, geteilt durch das zugehörige Widerstandsmoment des Körpers.

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (5)$$

Das Moment (Gleichung 6) wird in der Dreipunktbiegung wie bei einem Balken auf zwei Stützen mit mittiger Belastung errechnet. Das Widerstandsmoment (Gleichung 7) ist abhängig von der Geometrie des Körpers, das bei den Probekörpern in der Schnittfläche einem Rechteck bei einer Biegung um die y-Achse entspricht.

$$M = \frac{F \cdot L}{4} \quad \text{und} \quad W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (6) \text{ und } (7)$$

Zusammengesetzt ergibt sich die Formel (Gleichung 8) für die Biegespannung der Dreipunktbiegung.

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (8)$$

Durch eine softwaregesteuerte Universalprüfmaschine wird die Biegespannung und die dazugehörige Verformung aufgezeichnet und als eine Spannungs-Dehnungs-Kurve wiedergegeben. Die Steigung dieser Kurve ergibt das E-Modul.

3.1.3. Ringsteifigkeit

Die Steifigkeit ist die Widerstandsfähigkeit eines Körpers gegenüber einer Verformung in Abhängigkeit der verwendeten Geometrie und ist das Produkt aus dem Elastizitätsmodul (E) und dem Flächenträgheitsmoment (I) des Körpers (Gleichung 9).

$$S = E \cdot I \quad (9)$$

Die spezifische Ringsteifigkeit (Gleichung 10) eines Schlauchliners ist die Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Ringverformung durch einen aufgetragenen Scheiteldruck verursacht wird. Die Ringsteifigkeit wird in Newton pro Quadratmeter angegeben [3].

$$S = \frac{E \cdot I}{d_m^3} \quad \text{mit} \quad I = \frac{e_m^3}{12} \quad (10)$$

Aus dem Scheiteldruckversuch soll das Umfangs-E-Modul ermittelt werden. Dafür wird die spezifische Anfangs-Ringsteifigkeit S_0 (Gleichung 11) ermittelt. Der Verformungsbeiwert (f) ist abhängig von der Verformung und dem mittleren Durchmesser des Schlauchliners (Gleichung 12).

$$S_0 = \frac{f \cdot F}{L \cdot y} \quad (11)$$

$$f = (1860 + 2500 \cdot y/d_m) \cdot 10^{-5} \quad (12)$$

Die Gleichung der spezifischen Ringsteifigkeit (Gleichung 9) wird zur Ermittlung des E-Moduls umgestellt. An Stelle der spezifischen Ringsteifigkeit (S) wird die spezifische Anfangs-Ringsteifigkeit (S_0) eingesetzt. Das daraus gewonnene E-Modul wird als scheinbares Elastizitätsmodul [3] bezeichnet (Gleichung 4).

$$E = \frac{12 \cdot S_0 \cdot d_m^3}{e_m^3} \quad (4)$$

4. Normen für die Materialprüfung an Schlauchlinern

In fast allen Bereichen der Industrie und der Technik werden Vorgänge und Produkte normiert. Eine Normierung hat zum Ziel, Produkte und Vorgänge soweit zu standardisieren, dass diese mit anderen kompatibel sind. Dadurch kann eine Gebrauchstauglichkeit, Wirtschaftlichkeit sowie auch die Sicherheit und Qualität gewährleistet werden. Durch den Normierungsprozess entsteht eine Vereinheitlichung und Standardisierung technischer Regeln und Techniken auf nationaler und internationaler Ebene.

Durch die Normierung der Materialprüfung von Schlauchlinern werden die Prüfungen unter gleichen Bedingungen und Vorgehensweisen durchgeführt und somit eine ortsunabhängige Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

4.1. Dreipunkt-Biegeversuch

Eine einfache Methode, um das Biegeverhalten von Werkstoffen zu untersuchen, ist die Dreipunktbiegung. Die Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls erfolgt durch das Aufbringen einer Last (F) in der Mitte eines an zwei Punkten aufliegenden Probekörpers (Bild 4.1).

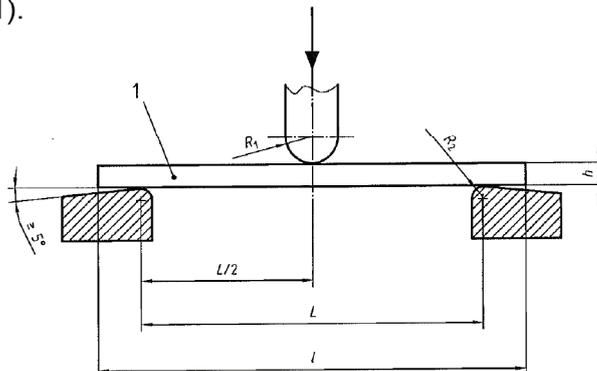


Bild 4.1. Prinzipdarstellung des Dreipunkt-Biegeversuchs [6]

Die Normen DIN EN ISO 178 und DIN EN 13566-4 regeln zusammen den Dreipunkt-Biegeversuch für vor Ort härtende Rohre (Schlauchliner). Die DIN EN ISO 178 regelt dabei die allgemeine Prüfung und Ermittlung von Biegeeigenschaften von Kunststoffen.

Die DIN EN 13566-4 Anhang C „Vor Ort härtende Rohre - Modifikationen zu EN ISO 178 zu Biegeversuchen“ modifiziert den Dreipunkt-Biegeversuch, damit die Krümmung der Materialprobe des Schlauchliners und der Einfluss von möglichen Inhomogenitäten des Faser-verbundes berücksichtigt wird.

4.1.1. DIN EN ISO 178

Die internationale Norm DIN EN ISO 178 „Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften“ vom April 2006 legt die Bedingungen und das Verfahren zur Ermittlung der Biegeeigenschaften von steifen und halbsteifen Kunststoffen fest. Hierbei handelt es sich jedoch um ausschließlich flache Proben.

Durch die Norm werden Begriffe, die bei dem Biegeversuch zur Anwendung kommen, wie zum Beispiel Biegespannung, Biegefestigkeit, Biegedehnung, Biege-Elastizitätsmodul, Prüfgeschwindigkeit sowie Durchbiegung definiert. Die Untersuchung erfolgt an

Probekörpern, die wie Träger auf zwei Stützen in der Mitte mit einer Kraft belastet und dabei die dazu-gehörigen Verformungen (Durchbiegungen) aufgezeichnet wird.

Für die Vergleichbarkeit wurden bevorzugte Formen und Maße für den Probekörper festgelegt. Die bevorzugten Maße gelten jedoch nur für Flachproben und nicht für gekrümmte Probekörper, die aus einem Rohr gewonnenen werden, wie es bei einem Schlauchliner der Fall ist.

Weiterhin legt die Norm fest, dass jeder Probensatz aus mindestens 5 Probekörpern bestehen sollte, um eine Präzisierung des Mittelwertes der Ergebnisse zu erreichen. Die Prüfungen sind nach ISO 291 bei Raumklimaverhältnissen 23/50 (°C / rF) durchzuführen. Vor jeder Prüfung ist die Dicke und Breite für jeden Probekörper zu bestimmen. Aus dem 16-fachen der gemittelten Dicke des Probensatzes ergibt sich die Auflagerdistanz (L).

Der Prüfkörper wird symmetrisch auf die beiden Auflager gelegt und durch die Druckfinne in der Mitte belastet. Während der Prüfung wird die Kraft und die dazugehörige Durchbiegung aufgezeichnet und in einer Spannungs-Dehnungs-Kurve wiedergegeben (siehe Bild 3.1).

Es werden die Formeln zur Berechnung der Biegespannung (σ_f), der Biegedehnung (ϵ_f) und des Biege-E-Moduls (E_f) benutzt (siehe Gleichungen aus Abschnitt 3.1.1).

Die Prüfung wird in einem Prüfbericht zusammengefasst, in dem wichtige Angaben enthalten sind, wie zum Beispiel verwendete Norm, Probenidentifikation, Maße, Datum, Prüfergebnisse, Mittelwerte und Abweichungen.

4.1.2. DIN EN 13566-4

Die DIN EN 13566-4 „Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining“ legt Anforderungen und Prüfverfahren für die vor Ort härtenden Schlauch-Lining-Rohre und Formstücke fest. Die Norm legt damit Anforderungen an das Schlauchliner-material im M-Zustand (im nicht gehärteten Zustand) und dem I-Zustand (nach Aushärtung) fest. Ebenso regelt diese Norm die Verlegepraxis und die anschließende Prüfung.

Für die Prüfung der vor Ort hergestellten Kunststoffrohre gilt der normative Anhang C „Vor Ort härtende Rohre - Modifikationen zu EN ISO 178 zu Biegeversuchen“. Der Anhang regelt das Prüfverfahren an Rohrausschnitten. Es werden Modifikationen an der Prüfeinrichtung sowie Probenkörperformen und -maße vorgenommen, um die Biegeeigenschaften von gekrümmten Schlauchlinerproben feststellen zu können (Bild 4.2).

- G - Druckfinne
- H - gekrümmter Probekörper
- S - Auflager
- L - Stützweite
- e - Verbundwanddicke
- F - Kraft

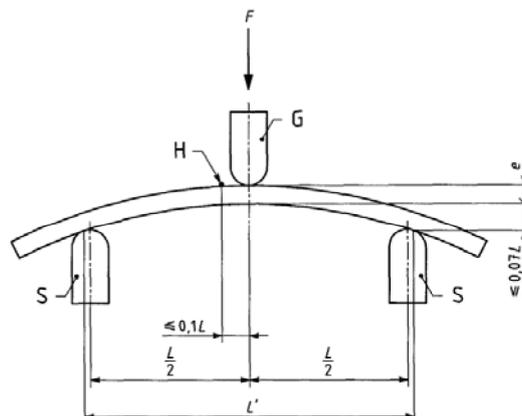


Bild 4.2. Prinzipdarstellung der Prüfanordnung mit gebogenem Probekörper nach DIN EN 13566-4 [4]

In dem Anhang C der DIN EN 13566-4 wird festgelegt, dass die Auflager und die Druckfinne eine halbzylindrische Form mit einem Radius von 5 mm besitzen müssen. Dadurch wird ein ordentliches Aufliegen des gekrümmten Probekörpers ermöglicht. Um Torsionskräfte zu reduzieren, ist die Druckfinne in einer Ebene rotierend gelagert. Hierdurch wird ein vollständiges Aufliegen der Druckfinne auf einer unebenen Probenoberfläche ermöglicht. Der Probekörper ist aus der gebogenen Richtung zu entnehmen. Der in die Prüfmaschine eingelegte Probekörper muss in der Mitte am höchsten sein.

Die Verbundwanddicke eines jeden einzelnen Probekörpers darf an keinem seiner Messpunkte mehr als 10% von dem Mittelwert abweichen. Die Breite des gebogenen Probekörpers soll 50 (± 1) mm betragen. Wenn die Hauptorientierung der Verstärkung nicht in der gebogenen Richtung liegt oder die Probe in Längsrichtung geprüft werden soll, sind die Breiten für die Probekörper aus der Tabelle 4.1 zu verwenden.

Tabelle 4.1. Werte für die Breite der Probekörper in Längsrichtung b , in Beziehung zur mittleren Verbunddicke e_m , [4]

Mittlere Verbunddicke e_m	Breite b
$e_m \leq 15$	15,0 \pm 1
$15 < e_m \leq 25$	25,0 \pm 1
$25 < e_m \leq 35$	35,0 \pm 1
$e_m > 35$	50,0 \pm 1

Die Probelänge (l) ist um das 4-fache der Verbundwanddicke (e_m) länger als die errechnete Auflagerdistanz (L). Die Gesamtwanddicke (e) wird an sechs Punkten innerhalb des mittleren Drittels der Probelänge gemessen. Die Verbundwanddicke (e_m) ergibt sich aus der Gesamtwanddicke (e), von der alle nicht tragenden Schichten, wie zum Beispiel Innen- und Außenfolien sowie eventuell nicht strukturierten Harzschichten abgezogen werden. Die Auflagerdistanz wird aus der Verbundwanddicke errechnet ($L = 16 \cdot e_m$), darf aber dabei nicht die Überhöhung von 0,07 der Stützweite überschreiten. Damit die Überhöhung nicht überschritten wird, kann das Stützweiten/Dicken-Verhältnis weniger als 16:1 betragen, aber nicht unterhalb von 10:1 liegen. Die Stützweite ist so einzustellen, dass die Berührungspunkte des unbelasteten Probekörpers mit den Auflagern die gewünschte Distanz erreichen. Die Druckfinne soll bei der Prüfung die zuvor angezeichnete Mittellinie treffen.

Es werden die Berechnungen und die Darstellungen leicht modifiziert, indem die Anforderungen angehoben werden. Der Prüfbericht wird um die Aufnahme der Prüfrichtung (axial oder radial) und der Verbundwanddicke, sowie deren prozentualen Abweichung erweitert.

In naher Zukunft soll die DIN EN13566-4 durch eine internationale Norm ersetzt werden, die sich zur Zeit im Schlusssentwurf befindet: FprEN ISO 11296 „Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispiegelleitungen) - Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauch-Lining (ISO 11296-4:2009)“ - Deutsche Fassung vom Oktober 2010. Die Bestimmung des Biege-E-Moduls wird darin nicht geändert und ist deshalb als gleichwertig zu betrachten.

4.2. Scheiteldruckversuch

Ein Rohrabschnitt wird, wie in Bild 4.3, horizontal in die Prüfeinrichtung eingelegt und in der Prüfung längs zum Rohr durch eine vertikale Kraft verformt. Das simuliert die Belastung, die das Rohr später im eingebauten Zustand erfahren würde. Die Kennwerte werden aus dem linear-elastischen Bereich ermittelt. Die Norm DIN EN 1228 regelt einen zerstörungsfreien Scheiteldruckversuch, der bei der Zulassung und Überwachung von Schlauchlinern zur Anwendung kommt.

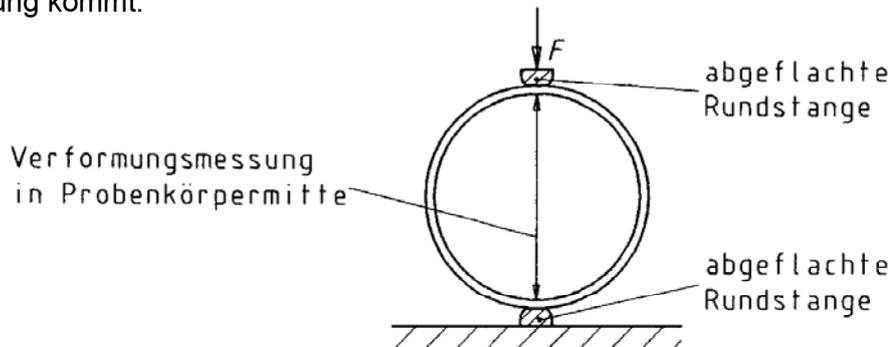


Bild 4.3. Prinzipdarstellung der Prüfanordnung mit abgeflachten Rundstangen nach DIN EN 1228 [3]

4.2.1. DIN EN 1228

Die Norm DIN EN 1228 „Kunststoff-Rohrleitungssysteme, Rohre aus glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) – Ermittlung der spezifischen Anfangs-Ringsteifigkeit“ basiert auf dem internationalen Norm-Entwurf ISO/DIS 7685 und behandelt die mechanische Prüfung und Messung der Materialkennwerte von Kunststoffrohren. Es werden die Begriffe Scheiteldrucklast, Verformung, spezifische Anfangs-Ringsteifigkeit und das scheinbare Elastizitätsmodul definiert. Das Verfahren, Aufbau der Prüfeinrichtung, Probengrößen und die Versuchsdurchführung werden durch diese Norm festgelegt.

Die Länge der Probekörper richtet sich nach deren Durchmesser. Alle Rohre kleiner als DN 300 sollen die gleiche Probenlänge analog ihres Durchmessers besitzen. Ab DN 300 und größer beträgt die Probenlänge 300 mm. Es gibt zwei gleichwertige Verfahren:

Verfahren A: Nach dem Aufbringen der Last, die erforderlich ist, um eine relative Verformung von $(3 \pm 0,5)\%$ zu erreichen, wird diese Last für eine bestimmte Zeit konstant gehalten und danach die Endverformung ermittelt (Bild 4.4.) [3].

Verfahren B: Hier wird, anders als im Verfahren A, die Anfangsverformung für die gesamte Prüfzeit konstant gehalten und die sich einstellende Endlast ermittelt (Bild 4.5) [3].

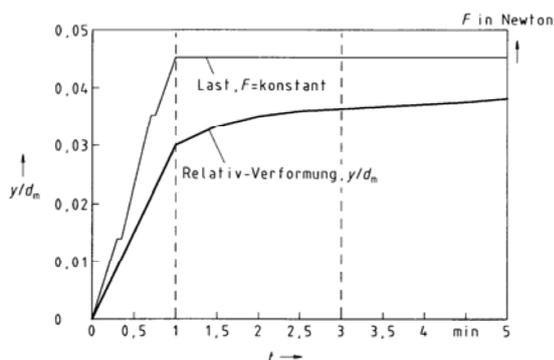


Bild 4.4. Verfahren A: Last und zugehörige Verformung über die Zeit [3]

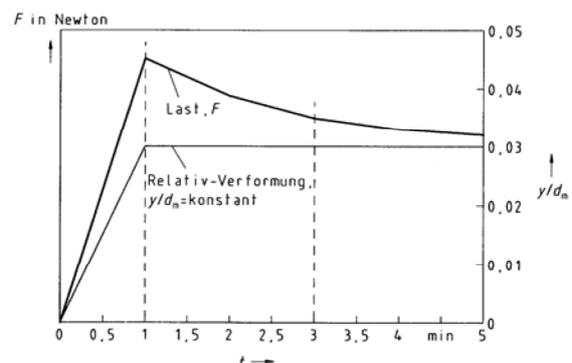


Bild 4.5. Verfahren B: Verformung und zugehörige Last über die Zeit [3]

Auf den Probekörper sind sechs längs verlaufende Referenzlinien in 60° Teilungen anzuzeichnen. Die Verbundwanddicke wird an den 12 Enden der Referenzlinien gemessen. Der Durchmesser ist ebenfalls an den Enden der Referenzlinien an beiden Seiten zu messen. Die Länge ist entlang der Linien zu ermitteln.

Zur Lasteinleitung werden zwei parallel zueinander stehende Platten oder abgeflachte Rundstangen oder die Kombination beider verwendet. Der Probekörper ist zwischen den beiden Lasteinleitungselementen so einzusetzen, dass die zwei gegenüberliegenden Referenzlinien die Auflager berühren. Es ist eine Verdrehung der Lasteinleitung zu vermeiden.

Der Probekörper wird mit einem Scheiteldruck belastet und unter einer konstanten Steigerungsrate bis auf 3%-Verformung gegenüber seiner Ursprungsgröße verformt. Nach dem jeweiligen Verfahren (A oder B), wird die Last oder die Verformung für 2 Minuten gehalten. Nach Ende dieser Zeitspanne wird dann der jeweilige Wert festgehalten und die Probe wieder entlastet. Für jedes Referenzlinienpaar ist die Prüfung durchzuführen. Zwischen den Prüfungen muss dem Probekörper Zeit zum Zurückstellen gegeben werden (relaxieren).

Zur Auswertung der gewonnenen Ergebnisse ist die Formel (Gleichung 4) für die E-Modulermittlung zu verwenden. Das E-Modul für den Probekörper ergibt sich aus dem Mittelwert der Ergebnisse der drei Referenzlinienpaare. Die Auswertung ist in einem Prüfbericht festzuhalten, der Angaben wie z.B. verwendete Norm, Probenbezeichnung, Maße, Prüfdatum zusätzlich enthalten soll.

4.3. ZTV - Materialprüfung

Die Zusätzliche Technische Vertragsbedingung „Für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner“ (ZTV - Materialprüfung) [22] soll Interpretationsspielräume der allgemeingültigen Normen für die Prüfung von Schlauchlinern ausschließen. Alle hier geregelten Materialprüfungen sollen sicherstellen, dass die gelieferte Qualität auch der bestellten Qualität des Schlauchliners entspricht.

Dafür werden verbindliche Anforderungen im Bereich des Versuchsaufbaus, der Probestücke und der Versuchsdurchführung gestellt, die eine Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse innerhalb der verbleibenden Versuchstoleranzen gewährleistet. Es werden Vertragsgrundlagen geschaffen, in denen das Verhältnis zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer beschrieben ist und in welchen Zeiträumen die verschiedenen Prüfungen stattzufinden haben. Die Fachkunde des Prüflabors besteht erst durch die Erfüllung der Mindestanforderung, die auch die Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 [8] sämtlicher beauftragten Materialprüfungen und alle damit zusammenhängenden nationalen und internationalen Normen beinhaltet. Das Prüflabor muss eine durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) anerkannte Überwachungsstelle sein.

Die ZTV - Materialprüfung regelt die Prüfungen für vor Ort härtende Schlauchliner nicht nur für den Dreipunktbiegeversuch und den Scheiteldruckversuch, sondern auch für die 24h - Kriechneigung, die Bestimmung des Restsyrolgehaltes, die Dynamische Differenz Kalorimetrie (engl. DSC), die Spektralanalyse (IR), die Bestimmung von Füllstoff- und Glasgehalt und die Dichtheitsprüfung für Schlauchliner.

Die Prüfergebnisse sind in einer festgelegten Form (Einheit und Angabengenauigkeit) darzustellen. Hier wird ein Auszug aus einer Tabelle der ZTV-Materialprüfung (Tabelle 4.2) gezeigt, der die zwei in dieser Arbeit verwendeten Versuche zeigt.

Tabelle 4.2. Darstellung der Ergebnisse, Auszug Tabelle ZTV – Materialprüfung [22]

Prüfung	Norm	Wert	Einheit	Ergebnisangabe
Drei-Punkt-Biegung	DIN EN ISO 178, DIN EN 13566-4	Verbunddicke e_m	mm	1 Nachkommastelle
		Biege-E-Modul E	N/mm ²	3 bedeutsame Ziffern ¹⁾
		Biegebruchspannung σ_B	N/mm ²	3 bedeutsame Ziffern ¹⁾
Scheiteldruckversuch	DIN EN 1228	Verbunddicke e_m	mm	1 Nachkommastelle
		Ringsteifigkeit S_0	N/m ²	ganzzahlig
		Umfangs-E-Modul	N/mm ²	3 bedeutsame Ziffern

Die ZTV-Materialprüfung legt die beiden Normen DIN EN ISO 178 und die DIN EN 13566-4 als Grundlage für den Dreipunktbiegeversuch fest.

Somit sollen die grundsätzliche Beschaffenheit der Geräte und die Anzeige von Kraft und Durchbiegung nach DIN EN ISO 178 geregelt werden. Die Auflager und die Druckfinne müssen nach DIN EN 13566-4 ausgeführt sein. Die Anforderungen an die Probenkörperformen und –maße werden nach der DIN EN 13566-4 geregelt. Wird die Überhöhung überschritten, ist die Probe in der Längsrichtung zu prüfen und die Werte aus der Tabelle 4.1 (Abschnitt 4.1.2) zu benutzen oder es ist der Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1228 vorzunehmen. Bei der Durchführung werden Anforderungen an die Prüfsoftware gestellt, in der die Messwertaufzeichnung im Abstand von 0,02 sek oder 1 μ m erfolgt. Ebenso wird die Empfindlichkeit der Brucherkenkung auf eine Änderung der Dehnung von 0,05 mm oder ein Kraftabfall von 0,05 % F_{max} für die Software festgelegt. Verläuft jedoch die Spannungs-Dehnungs-Linie nach dem kurzen Abfall weiterhin parallel, also weiterhin im linear-elastischen Bereich (Hook'sche Gesetz), ist dieser Abfall nicht maßgebend. Dieser Bruch deutet dann auf ein Versagen einer Reinharzschicht hin, der sich unschädlich auf das Tragverhalten des Prüfkörpers auswirkt.

Ebenso modifiziert die ZTV-Materialprüfung die Durchführung des Scheiteldruckversuchs nach DIN EN 1228. Es soll zusätzlich die Verbundwanddicke (e_m) nach der DIN EN 13566-4 ermittelt und diese in der Formel verwendet werden. Es werden aus der DIN EN 1228 die Belastungsart "A", bei der der Probekörper innerhalb 1 sek kontinuierlich bis auf 3 % seines Rohrquerschnittes verformt wird, und das Prüfverfahren "B", in dem die Anfangsverformung 2 min lang gehalten und am Ende die sich einstellende Endlast ermittelt wird, für die Prüfung nach ZTV-Richtlinien verwendet.

5. Prüfung der statisch relevanten Materialkennwerte von Schlauchlinern

Da die Herstellung unter Baustellenbedingungen abläuft und Randbedingungen, wie zum Beispiel die Erfahrung und Fähigkeit des Einbauers mit einfließen, kommt es zu Schwankungen in der Qualität der Schlauchliner. Deshalb muss nach der Herstellung das Endprodukt auf seine Qualität untersucht werden.

Im Rahmen der Qualitätssicherung zur Ermittlung der Materialkennwerte werden mechanische Prüfungen an dem Schlauchliner durchgeführt. Einer dieser Kennwerte ist das E-Modul, das den Werkstoff in seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Verformung beschreibt. Ein Schlauchliner besteht aus einem Verbund mehrerer Werkstoffe, die als ein Verbundwerkstoff einen E-Modul als Kennwert aufweisen.

Werden die Bedingungen des Systems durch eine mangelhafte oder schlechte Verarbeitung des Schlauchliners beeinflusst, kommt es zu einer Änderung des E-Moduls. Das E-Modul hat daher bei der Beurteilung des Schlauchliners eine große Aussagekraft über die Qualität des Endproduktes.

Die Qualitätsüberprüfung des Schlauchliners erfolgt in der Praxis oft über den Dreipunkt-Biegeversuch. Die Dreipunkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 / DIN EN 13566-4 ist eine zerstörende Prüfung, bei der das Bruchverhalten untersucht wird.

Bei der Überwachung und der Zulassung erfolgt eine Prüfung am Bauteil, dazu wird bei einem Schlauchliner der Scheiteldruckversuch verwendet. Der Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1228 ist eine zerstörungsfreie Prüfung, bei der die Ringsteifigkeit durch eine geringe Verformung des Rohrquerschnittes ermittelt wird.

Beide Versuche unterscheiden sich voneinander, jedoch werden beide zur Ermittlung der Materialkenngröße E-Modul herangezogen.

5.1. Herkunft der Proben

Die nötigen Proben wurden seitens der Firma SIEBERT + KNIPSCHILD GmbH und von verschiedenen Herstellern zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um Probekörper aus unterschiedlichen Baumaßnahmen oder Testlinern. Ebenso wurden von verschiedenen Herstellern Materialproben für die Prüfungen im Rahmen dieser Bachelorarbeit zur Verfügung gestellt. Diese Materialproben wurden in 1 Meter langen Schlauchlinerabschnitten zur Prüfung übergeben. Davon wurden die Rohrabschnitte für den Versuch nach DIN EN 1228 abgetrennt.

Damit aus der gleichen Proben das Umfangs-E-Modul und das Biege-E-Modul ermittelt werden kann, werden aus den zum Scheiteldruckversuch herangezogenen Rohrabschnitten nochmals Probekörper entnommen. Um jedoch nicht den Rohrabschnitt aus dem Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1228 vollständig zu zerstören, wurde davon ein „schmaler Ring“ von 50 mm Breite abgetrennt. Diese Ring-Probekörper werden im Weiteren als „schmale Ringe“ bezeichnet. Die Breite von 50 mm entspricht der Probenbreite in dem Dreipunkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 / DIN EN 13566-4. An diesem Ring wurde die innere Spannung untersucht, in dem der Ring durchtrennt wurde. Der Ring sprang dann auf oder in sich zusammen. Bei den Ringen, die zusammen sprangen, wurde die benötigte

Kraft gemessen, um den Ring wieder in die Ausgangsposition zu ziehen. Nach dieser Prüfung wurde der Ring, je nach der sich ergebenden Auflagerdistanz, in möglichst viele Probekörper zersägt. Um die Naht als mögliche Schwachstelle zu berücksichtigen, wurde darauf geachtet, dass diese im Messbereich lag.

5.2. Vorbereitungsarbeiten

Bevor die Proben für die Versuche gewonnen werden, sind Vorbereitungsarbeiten an den Schlauchlinern und an den Probekörpern vorzunehmen.

Vor dem Zurechtschneiden hat eine Vorvermessung des Schlauchliners zu erfolgen. Für den Scheiteldruckversuch ist der Durchmesser zu ermitteln, nach der sich die Probengröße richtet, siehe Länge der Probe in Abschnitt 4.2.1. In dem Dreipunkt-Biegeversuch ist für die Auflagerdistanz die Verbundwanddicke ausschlaggebend und deshalb auch entscheidend für die spätere Probenlänge, siehe Abschnitt 4.1.2.

Ist die Probengröße ermittelt, wird diese auf dem Schlauchliner angezeichnet und mit einer Probenbezeichnung versehen. Zum Sägen wird eine wassergekühlte Tischkreissäge verwendet. Ist die Probe zu groß für die Tischkreissäge, wurde diese auf einem Bock mit einem Trennschleifer gesägt.

Nach dem Zurechtschneiden wurden die Probekörper gesäubert. Dazu wurde der Sägestaub von der Oberfläche beseitigt und mit einem Messer werden die überstehenden Ränder und Fasern entfernt (Bild 5.1). Sofern es möglich ist, wurden die Außenfolien und Einzugsbänder entfernt (Bild 5.2). Diese zählen nicht zum statisch tragenden Laminat und erschweren die Ermittlung der Verbundwanddicke.

Danach werden die Messstellen auf dem Probekörper mit einem wasserfesten Stift angezeichnet und beschriftet. Das dient der späteren Protokollierung und ermöglicht ein nachträgliches Überprüfen der Messergebnisse.



Bild 5.1. Abziehen des Zugbandes

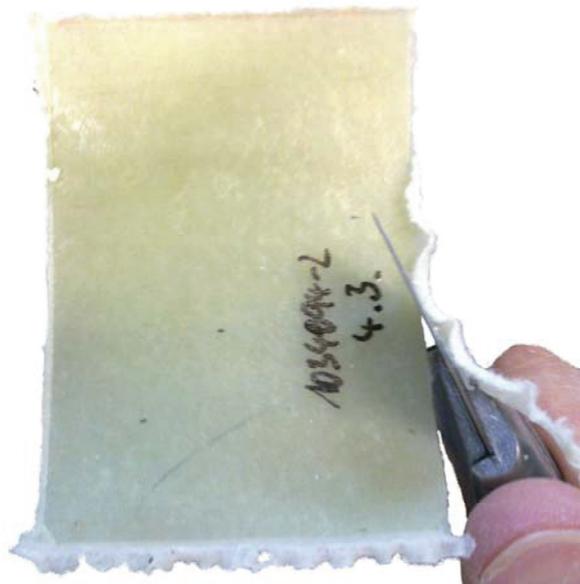


Bild 5.2. Überstehende Ränder nach dem Sägen entfernen

5.2.1. Messen

Das Messen erfolgt mittels Messschieber, der den Anforderungen nach DIN 862 entsprechen muss [1]. Es wird an den zuvor gekennzeichneten Stellen des Probekörpers gemessen. Für den Scheiteldruckversuch werden mit Hilfe einer Schablone die Referenzlinien mit Teilungen von 60 Grad aufgetragen. Die Messung für die Wanddicke erfolgt an jedem Ende der Referenzlinie, sodass sich 12 Messungen ergeben (siehe Bild 5.3). Für den Dreipunkt-Biegeversuch erfolgen 6 Messungen im mittleren Drittelbereich der Probe (siehe Bild 5.4).

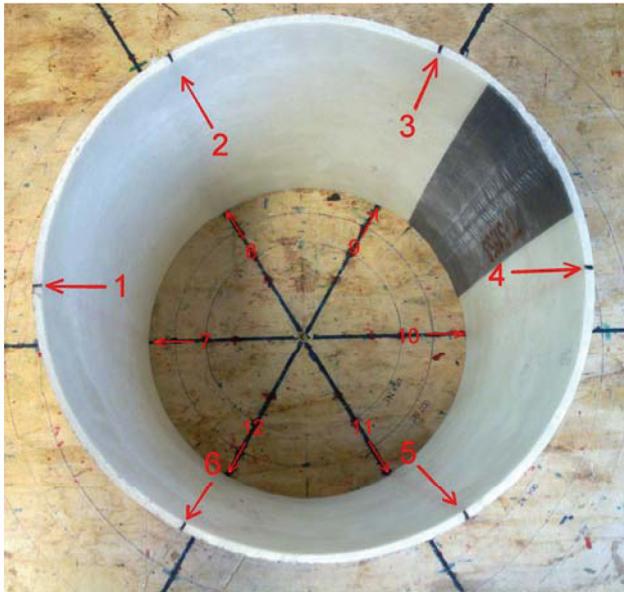
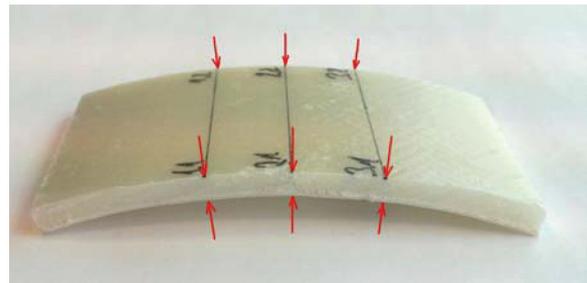


Bild 5.3. (links) Die 12 Messstellen eines Ringabschnittes für den Scheiteldruckversuch

Bild 5.4. (unten) Die 6 Messstellen im Drittelbereich eines gekrümmten Probekörpers für den Dreipunkt-Biegeversuch



Die Wanddicke und wenn möglich auch die Probenbreite werden mit einem digitalen Messschieber (Bild 5.5) ermittelt. Durch ein Datenkabel ist es möglich, die Messwerte direkt an den Computer zu senden und in die Prüfsoftware einzutragen. Durch den Datentransfer minimiert sich das Risiko einer fehlerhaften Eingabe. Größere Probekörper, die bei dem Scheiteldruckversuch verwendet werden, mussten mit einem größeren Messschieber der Bauform F (Bild 5.5), auch als Werkstattmessschieber bekannt, ermittelt werden.



Bild 5.5. Verwendete Messschieber (nach DIN 862), links digitaler Messschieber der Bauform A und rechts analoger Messschieber in der Bauform F, auch als Werkstattmessschieber bekannt

Bei der Verbundwanddickenermittlung ist immer darauf zu achten, dass senkrecht zu den Schnittflächen gemessen wird. Die Messschenkel des Messschiebers müssen dabei parallel zu den Oberflächen gehalten werden (Bild 5.6), da es sonst zu verfälschten Messergebnissen kommt. Die Messschenkel werden bis zum Erreichen eines leichten Widerstandes zusammengeschoben und das Ergebnis wird abgelesen. Jegliches Anwenden von Kraft führt zu einer proportionalen Verfälschung.

Kommt es zu Abweichungen der Dicke der innenseitigen Beschichtung von der in der Zulassung genannten Dicke, ist diese nachzumessen (Bild 5.7). Dabei ist darauf zu achten, dass sich ausreichend Fläche zum Messen bietet und sich daran keine Harzreste befinden.



Bild 5.6. Wanddickenmessung an einem gebogenen Probekörper



Bild 5.7. Messung der Innenbeschichtung eines Liners

5.2.2. Protokollierung

Die gewonnenen Daten aus der Vermessung werden in Vermessungsprotokollen festgehalten, in denen gleichzeitig die Bildung der Mittelwerte erfolgt. Die errechneten Mittelwerte werden später in die bereitgestellten Felder der Prüfsoftware eingegeben.

Für den Scheiteldruckversuch wird ein Vermessungsprotokoll (Anlage A1) angefertigt, in dem die Dicke der innenseitigen Beschichtung, der Durchmesser, die Verbundwanddicke und die Probenlänge je Probe eingetragen und die Mittelwerte errechnet werden.

Bei dem Dreipunkt-Biegeversuch werden die Prüfungsrichtung und die Auflagerdistanz ermittelt und in einem Vorprüfungsprotokoll (Anlage A2) festgehalten. Dazu genügen die Eingaben des Nenndurchmessers und der mittleren Verbundwanddicke. In dem Protokoll wird die Krümmung durch das Verhältnis der Überhöhung zur Auflagerdistanz der Probe berücksichtigt. Es ist eine Auflagerdistanz zu wählen, bei der die Überhöhung nicht größer gleich 0,07 sein darf (Abschnitt 4.1.2 – Bild 4.2).

Die gewonnenen Ergebnisse der jeweiligen Prüfung werden in Prüfprotokolle zusammengefasst. Diese Protokolle sehen im Aufbau gleich aus und enthalten die Prüfungsparameter, die gewonnenen Ergebnisse, eine Seriengrafik und die zugehörige Statistik (Anlage B).

5.3. Versuchsdurchführung

Als Prüfeinrichtung dient die Universalprüfmaschine Zwick Z010 (Bild 5.8), mit der softwaregesteuerte Prüfungen durchgeführt werden können. Diese Prüfmaschine ist ausgestattet mit einem 10 kN Kraftaufnehmer und arbeitet mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,0005 bis 2000 Millimetern pro Minute sowie einer Wegauflösung des Antriebes von 0,0272 Mikro-metern. Als Prüfsoftware wird das Programm TestXpert benutzt, welches vom Hersteller der Prüfmaschine entwickelt wurde.

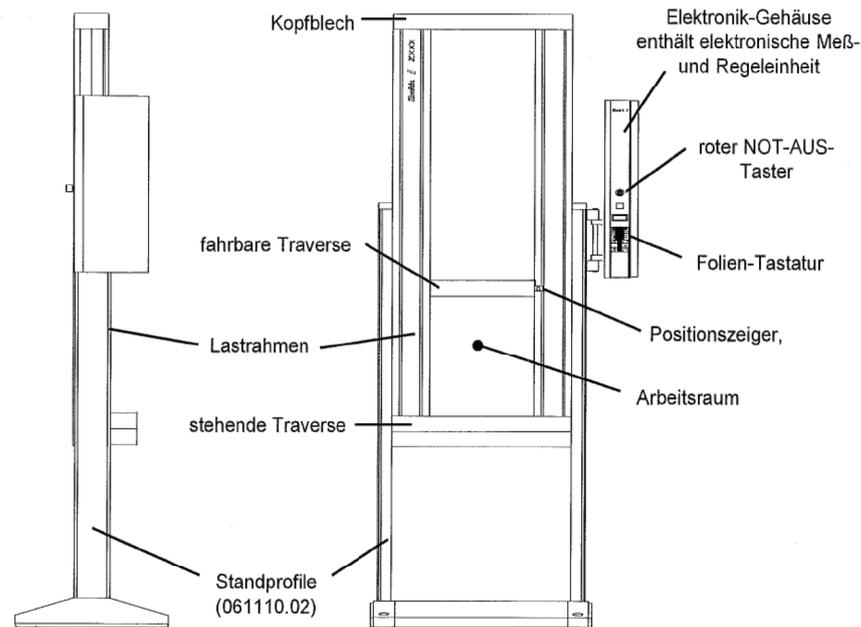


Bild 5.8. Universalprüfmaschine Zwick Z10

In dem Programm befinden sich verschiedene Prüfvorschriften als Vorlage, die für die jeweilige Prüfung geladen werden. Es ist mit der Software möglich, diese Prüfvorschriften zu ändern oder neue selbst zu erstellen.

Die Vermessungsdaten werden in die in der Software vorgesehenen Felder (Bild 5.9) für die einzelnen Probekörper eingegeben. Nachdem die Auflagerdistanz eingestellt und die Probe auf die Auflager aufgelegt sowie alle erforderlichen Daten bzw. Parameter eingegeben wurden, wird per Mausclick die Prüfung gestartet.

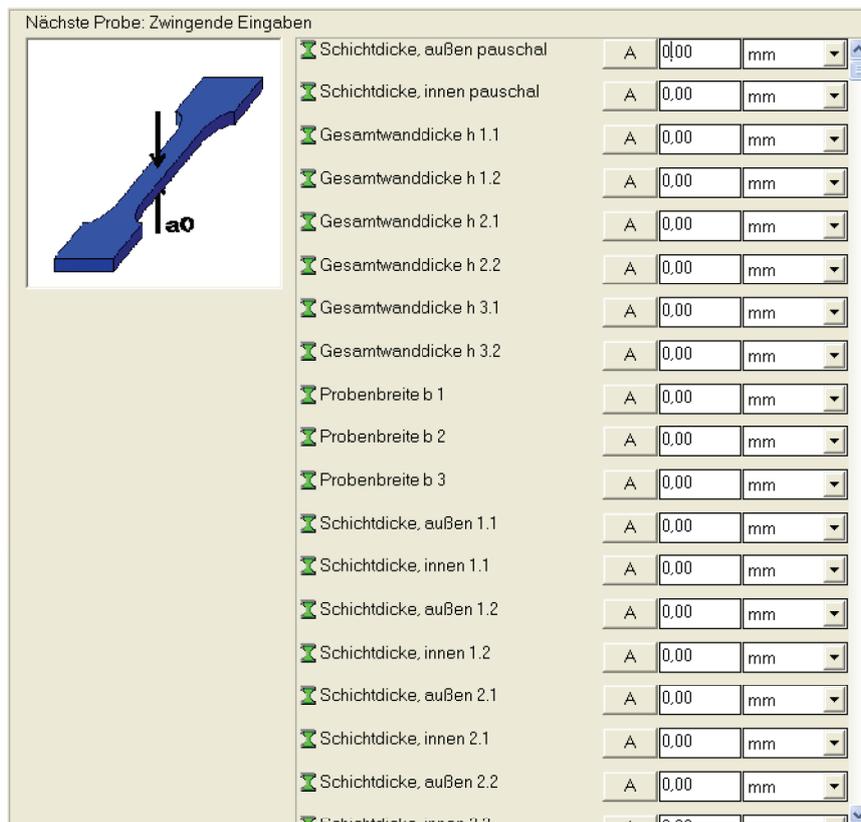


Bild 5.9. Bedienfenster der Prüfsoftware mit vorgesehenen Feldern für die Eingabe der Probenparameter

Die Prüfung erfolgt, indem der Probekörper durch ein langsames Senken der Traverse mit einer konstanten Vortriebsgeschwindigkeit auf Druck belastet wird, während die Kraft und der Weg aufgezeichnet werden. Nach Erreichen der Zielparame-ter wird die Probe wieder entlastet und die Traverse fährt in die zuvor gespeicherte Ausgangsposition zurück. Bei mehreren Prüfungen erstellt die Prüfsoftware automatisch eine Seriengrafik und fasst die Daten in Tabellen zusammen.

5.3.1. Scheiteldruckversuch

Der Scheiteldruckversuch erfolgte nach DIN EN 1228, bei dem ein Rohrabschnitt auf Scheiteldruck belastet wird. Dafür ist die Maschine mit den richtigen Auflagern ausgestattet worden und in der Software wurde die Prüfvorschrift für den Versuch geladen.

Die zurechtgeschnittenen Proben wurden auf eine Schablone gelegt, um die 60°-Teilung der Referenzlinien anzuzeichnen. Damit die Linien parallel zur Rohrachse verlaufen, wurde das Rohr auf einen Doppel-T-Träger aufgelegt (Bild 5.10) bzw. ein Stahlwinkel angelegt und mit einem wasserfesten Faserstift auf der Oberfläche angezeichnet. Damit die Messungen im Protokoll (Anlage A1) dokumentiert werden kann, wurden die Referenzlinien durchnummeriert und die Seiten mit A und B gekennzeichnet. Die Probe wurde mit einem Messschieber vermessen und die Daten in das Vermessungsprotokoll übertragen. In diesem Vermessungsprotokoll wurden die Mittelwerte gebildet, die später in die Prüfsoftware eingegeben wurden.

Der Probekörper wurde so in die Prüfeinrichtung eingelegt, dass die beiden sich gegenüberstehenden Referenzlinien die Auflager berührten (Bild 5.11). Mit einer manuellen Handsteuerung wurde die Traverse der Prüfmaschine vorsichtig herabgelassen bis die Probe einspannt war. Die Vorkraft für die Einspannung durfte nicht größer als 10 N sein, da der Messschwellenwert bei 10 N liegt. Wird die Messschwelle in der Prüfung überschritten, beginnt die Messung mit einer automatischen Nullpunktkorrektur [23].

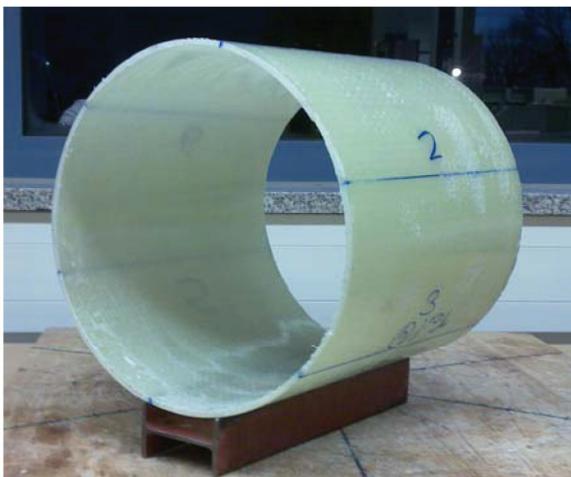


Bild 5.10. Anzeichnen der Referenzlinien an einem Schlauchliner-Rohrabschnitt



Bild 5.11. Eingespannte Probe für den Scheiteldruckversuch

Während der Prüfung wurden die Verformung und die Last aufgezeichnet und in einem Diagramm wiedergegeben. Die Prüfung erfolgte nach der Belastungsart A, bei der die Probe mit einer konstanten Steigungsrate innerhalb von 60 sek auf 3 % Verformung gebracht wurde und dem Prüfverfahren A, bei dem die Last konstant gehalten und nach 2 min die Endverformung ermittelt wurde (Bild 5.12).

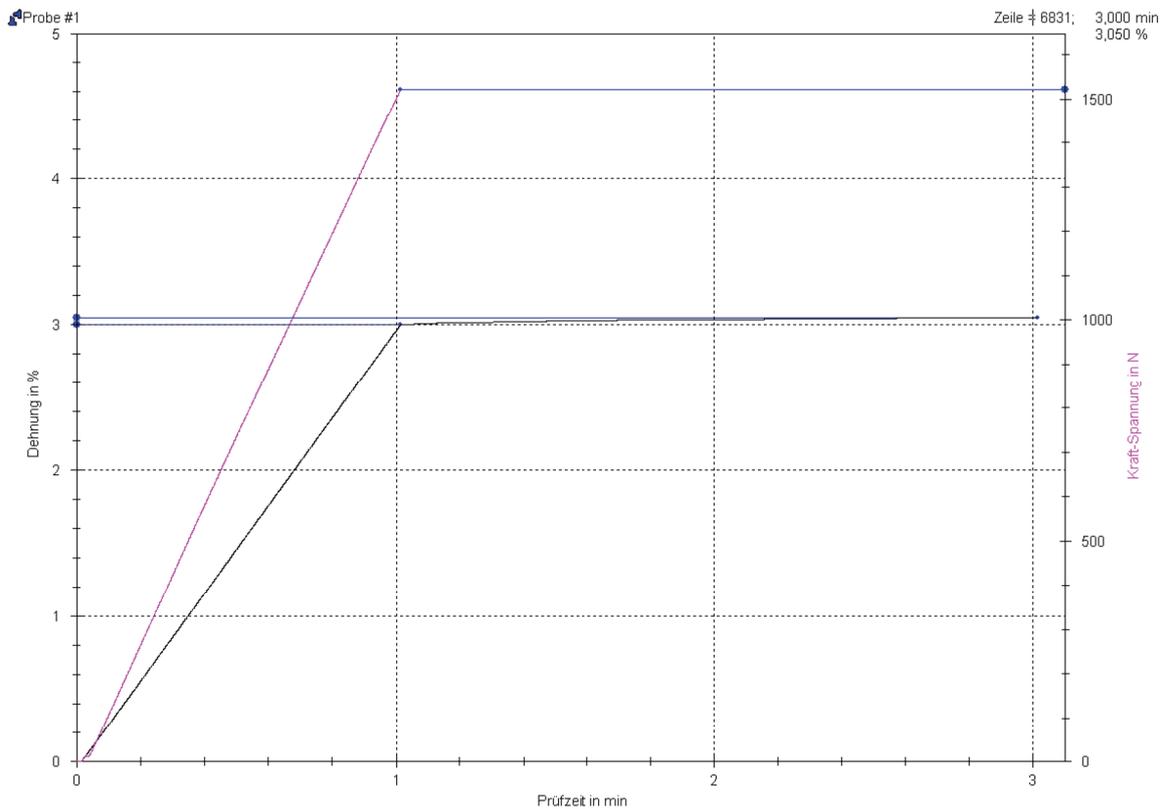


Bild 5.12. Last- und Verformungsaufzeichnung durch die Software

Die Berechnung und Auswertung erfolgte automatisch, da die Formeln in der Software hinterlegt sind. Die Prüfung wurde für jedes Referenzlinienpaar durchgeführt, damit ergaben sich pro Probe drei Prüfungen. Für die Auswertung der Prüfungen erstellte das Programm dann ein Prüfprotokoll (Anlage B1), in dem alle Maße und erbrachten Ergebnisse in Tabellen zusammengefasst wurden. In dem Protokoll wurden die drei Prüfungen als eine Seriengrafik dargestellt und die Mittelwerte der Ergebnisse zur Auswertung gebildet.

5.3.2. Ermittlung der Ringspannung

Nach dem Scheiteldruckversuch konnte der Rohrabschnitt für die Entnahme der Probekörper für den Dreipunkt-Biegeversuch vorbereitet werden. Dazu wurde ein „schmaler Ring“ mit der Breite von 50 mm von dem Rohrabschnitt abgetrennt. Dieser Ring wurde später in die Probekörper des Dreipunkt-Biegeversuchs zerteilt.

Bei dem Durchtrennen der Ringe zeigten sich unterschiedliche innere Spannungen. Die Ringe sprangen entweder leicht auf oder sprangen ineinander bzw. blieben unverändert. Um zu prüfen, ob innere Ringspannung sich auf das E-Modul auswirkt, wurden diese an den Ringen untersucht. Da wesentlich höhere Kräfte benötigt wurden, um die Ringe auseinanderzuziehen, als die aufgesprungenen Ringe wieder zusammendrücken, wurden nur die ineinander gesprungenen Ringe (Bild 5.13) auf die innere Spannung untersucht.



Bild 5.13. Zusammenpringen des Ringes durch innere Spannungen

Die Universalprüfmaschine wurde mit Spannbacken ausgerüstet, in denen für diese Arbeit selbst angefertigte Haken eingespannt wurden (Bild 5.14). Die ineinander gesprungenen Ringe wurden mit einem modifizierten Zugversuch wieder in die Ausgangsposition zurückgezogen (Bild 5.15) und die dabei auftretenden Kräfte gemessen.

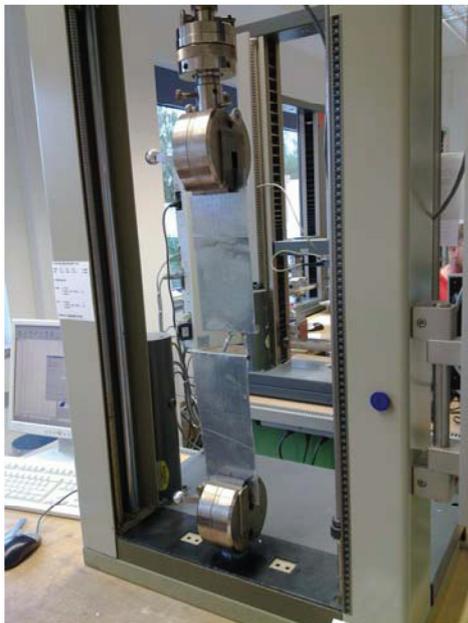


Bild 5.14. Prüfmaschine, mit Spannbacken und Haken ausgerüstet, für die Messung der Ringspannung

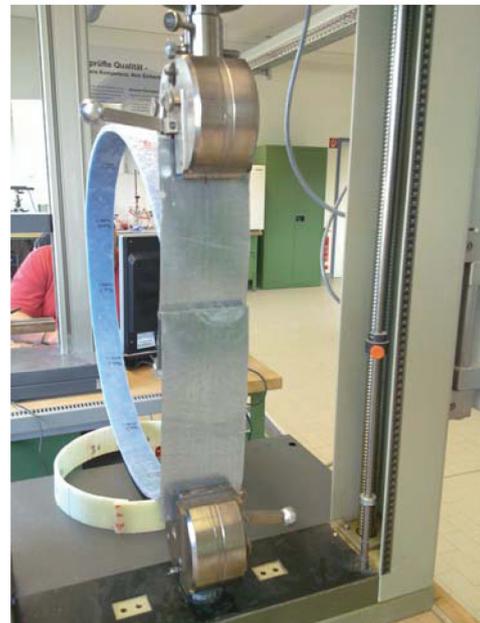


Bild 5.15. Umgerüstete Prüfmaschine mit eingespannter Probe

Die Traverse wurde so weit abgesenkt, dass die Haken sich überlappten. Die Probe wurde in die Haken eingehängt, sodass die Schnittkanten des Ringes die Haken kraftlos berührten. Das wurde überprüft, indem der Kraftaufnehmer der Universalprüfmaschine keinerlei Belastung aufzeichnete. Diese Position wurde in der Software als Ausgangsposition gespeichert.

Während der Prüfung wurde die Kraft sowie der dazugehörige Weg aufgenommen und als eine Kraft-Weg-Kurve dargestellt. Der Ring wurde bis in seiner Ursprungslage zurückgezogen und die Werte für die Kraft und den Weg aus der Kurve abgelesen. Da der Ring ineinander gesprungen war und die Haken dazwischen geklemmt wurden, kam es während der Prüfung zu Reibungskräften. Die Probe wurde soweit auseinander gezogen, bis sich die Überlappung löste. Es kam zu einem kurzzeitigen Kraftabfall, da die Ringenden aufeinander lagen und sich gegenseitig stützten. Die danach benötigte Kraft für das Öffnen der Probe, ist die zu messende Kraft (Bild 5.16).

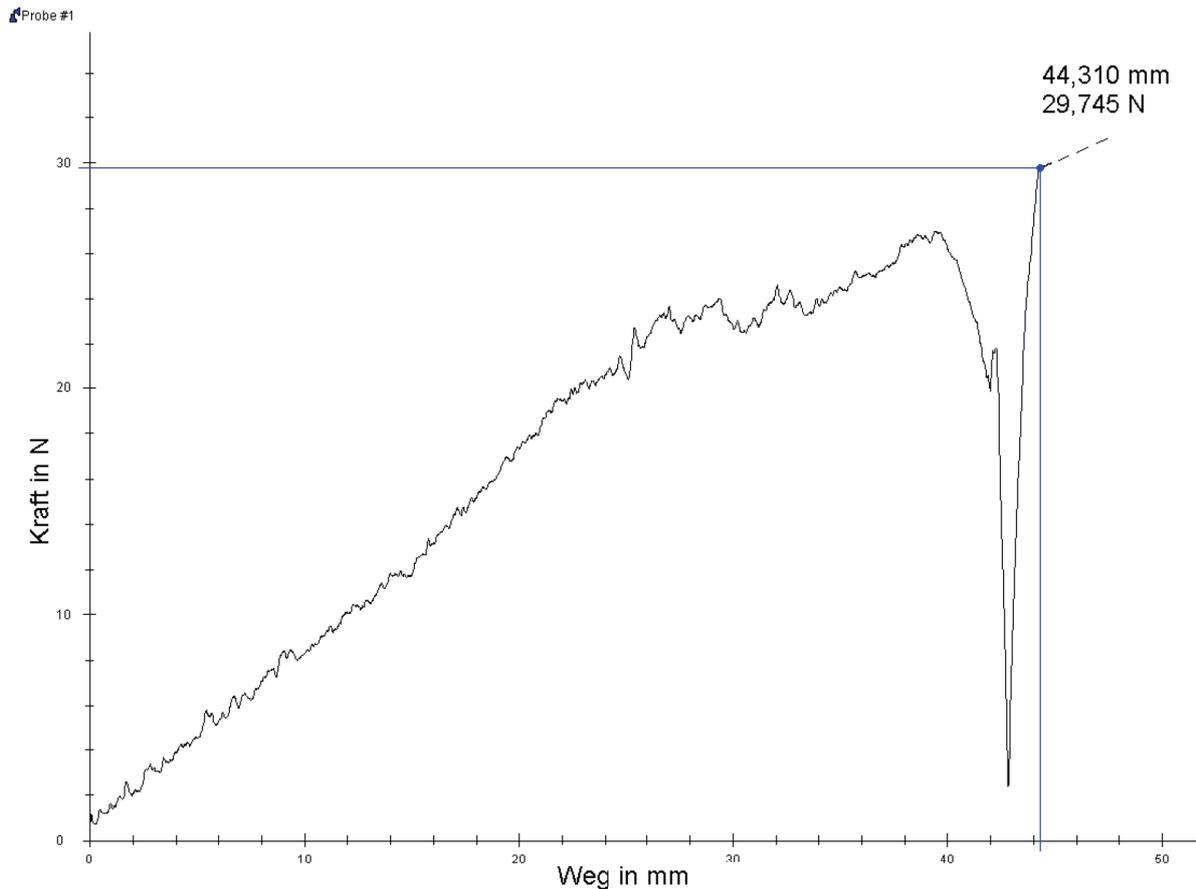


Bild 5.16. Kraft-Weg-Diagramm zur Ermittlung der inneren Ringspannung

Dieser Zugversuch wurde dreimal an der Probe nacheinander ausgeführt, um die Fehlerwahrscheinlichkeit zu minimieren. Die Auswertung erfolgte über ein Protokoll (Anlage B2), in dem die Ergebnisse in Tabellen aufgelistet und die Versuche in einer Seriengrafik dargestellt wurden.

5.3.3. Dreipunkt-Biegeversuch

Nachdem die Ringprobe auf innere Spannungen untersucht wurde, wurde diese in Probekörper für die Dreipunkt-Biegeversuch zersägt. Die Anzahl der Probekörper richtete sich nach dem Ringumfang und der sich ergebenden Auflagerdistanz. Um so viele Probekörper wie möglich aus dem Ring zu gewinnen, wurde bei vereinzelt Schlauchlinern der Überstand der Probekörper soweit verringert, dass ein zusätzlicher Probekörper entnommen werden konnte. So wurde das Biege-E-Modul über den Rohrumfang ermittelt. Es wurden im Durchschnitt ca. 10 Probekörper aus den Ringen entnommen (Bild 5.17).

Die Probekörper wurden gesäubert und die 6 Messpunkte im mittleren Drittelbereich der Probenlänge angezeichnet (siehe Abschnitt 5.2.1). Die Verbundwanddicke und Probenbreite wurden ermittelt und in dem Vermessungsprotokoll festgehalten (Anlage A2).

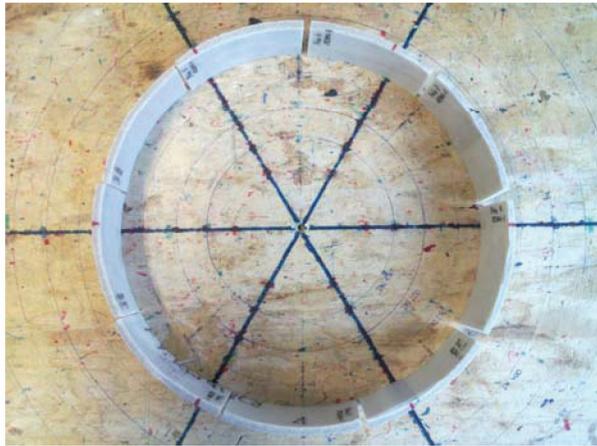


Bild 5.17. Ringprobe geteilt in Probekörper

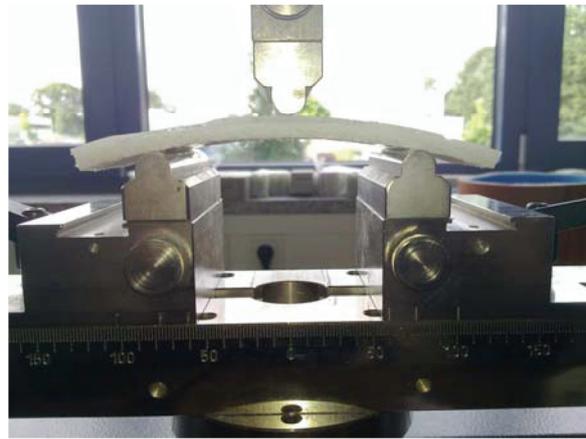


Bild 5.18. Einstellen der Auflagerdistanz mit aufliegendem Probekörper

Die Prüfeinrichtung wurde mit den vorgesehenen Auflagern sowie der Druckfinne ausgestattet und der Prüfplatz in der Software neu eingerichtet. Die Prüfvorschrift für den Dreipunkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 / DIN EN 13566-4 wurde in das Programm geladen. Die Auflagerdistanz wurde mit einer aufgelegten Probe eingestellt (Bild 5.18). Da der Versuch nach ZTV - Materialprüfung erfolgte, wurde jeder Probekörper einzeln vor der Prüfung vermessen.

Damit die Druckfinne während der Prüfung vollständig auf der Probenoberfläche auflag, begann die Prüfung bei einer Vorkraft von 1 - 5 Newton. Der Probekörper wurde durch die abwärts fahrende Traverse mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min belastet. Der zurückgelegte Weg und die dazugehörige Kraft wurden aufgezeichnet und als eine Spannungs-Dehnungs-Kurve (Bild 5.19) dargestellt.

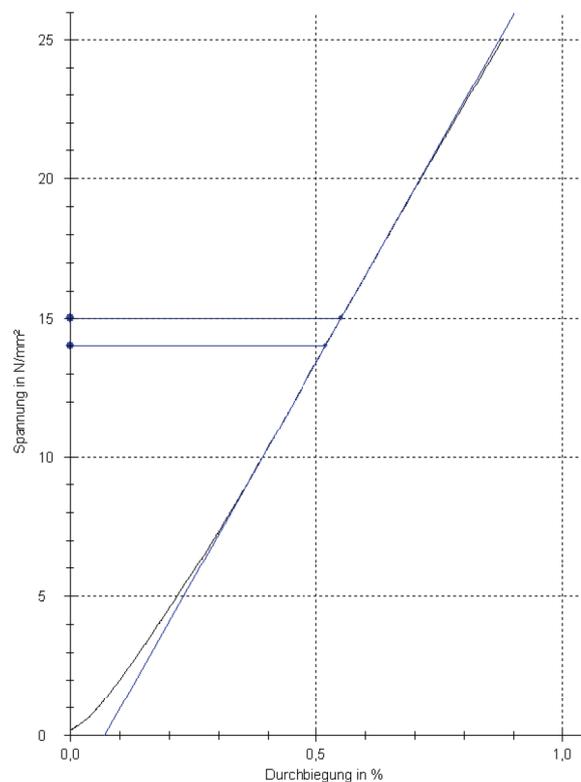


Bild 5.19. Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Dreipunkt-Biegeversuchs

Damit die Prüfung keinen schädigenden Einfluss auf die Probe hatte, wurde für jeden Probensatz ein Prüfungsende durch eine Maximalbelastung festgelegt.

Die E-Modulermittlung fand im Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve statt, in dem das Schlauchlinermaterial ein linear-elastisches Verhalten (Hook'sche Gesetz) aufweist.

Es wurde eine Anfangs- (σ_{f1}) und Endspannung (σ_{f2}) festgelegt und in der Prüfung durch die Prüfmaschine die dazugehörigen Dehnungen ($\varepsilon_{f1}, \varepsilon_{f2}$) ermittelt. Da in der Software die Formel für das Biege-E-Modul hinterlegt wurde (siehe Gleichung 1, Abschnitt 3.1.1), wird Das E-Modul automatisch errechnet.

Die Auswertung der Probensätze erfolgte in einem Prüfprotokoll (Anlage B3), in dem folgende Ergebnisse der Prüfung aufgelistet werden: das Biege-E-Modul, die Bruchspannung, die Maximalspannung und die Dehnung.

6. Ergebnisse

Die Ergebnisse des Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuchs, sowie weitere Untersuchungen werden hier in Tabellen aufgeführt. Es werden ausschließlich die Mittelwerte der einzelnen Versuche aufgeführt. Von den Ergebnissen werden Abweichungen mit den dazugehörigen Standardabweichungen errechnet, die mit in den Tabellen aufgeführt werden.

6.1. Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen

In dieser Arbeit wurden mit Hilfe des Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuchs das E-Modul von 36 Schlauchlinern ermittelt. Es wurden 195 Scheiteldruckversuche, 565 Dreipunkt-Biegeversuche nach ZTV - Materialprüfung, 1186 einfache Dreipunkt-Biegeversuche und 98 Dreipunkt-Biegeversuche in axialer Richtung durchgeführt.

Die gewonnenen Ergebnisse und die errechneten Abweichungen von dem ermittelten E-Modul und der Verbundwanddicke werden in Tabellen aufgeführt.

6.1.1. Übersicht der Ergebnisse aus den Versuchen

Das Umfangs-E-Modul wurde mit dem Biege-E-Modul verglichen und die Differenz als prozentuale Abweichung angegeben. Ebenso wurden die Verbundwanddicken aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch miteinander verglichen.

In der Tabelle 6.1. wurden alle Versuche zum E-Modulvergleich zusammengetragen. Es wurde für die Auswertung der Vergleichbarkeit der E-Modulermittlung der Versuch mit dem Durchmesser DN 150 nicht mehr gewertet und deshalb nur noch grau in der Tabelle dargestellt (siehe Kapitel 7.2.1). Dieser Versuch trägt nicht mehr zur Errechnung der Abweichung bei. Die große ermittelte Abweichung wird in der Auswertung näher beschrieben (siehe Abs. 7.2.1).

Die Summe aller Prüfungen weist einen negativen Trend in der Abweichung auf. Die ermittelten E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch weisen im Mittel eine Abweichung von -9,7 % auf. Die Standardabweichung des Mittelwertes, beträgt $\pm 10,6$ %. Diese zeigt die Grenzen der Ungenauigkeit auf, mit einem Maximum bei +0,9 % und einem Minimum bei -20,3 %. Daher wird im Weiteren die Abweichung als Größe mit der Standardabweichung zusammen angegeben, folglich: -9,7 ($\pm 10,6$) %.

Tabelle 6.1. Vergleich der ermittelten E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
1	150	1566	2,88	2133 (+36,2%)	3,04 (+5,6%)
2	200	3060	3,22	2904 (-5,1%)	3,38 (+5,0%)
3	200	3656	3,13	2947 (-19,4%)	3,41 (+8,9%)
4	250	7500	4,64	6569 (-12,4%)	5,39 (+16,2%)
5	225	3752	5,35	2668 (-28,9%)	5,48 (+2,4%)
6	250	3447	4,09	3269 (-5,2%)	4,10 (+0,2%)
7	250	3021	5,94	2668 (-11,7%)	5,93 (-0,2%)
8	300	3369	5,61	3047 (-9,6%)	5,63 (+0,4%)
9	300	4107	5,11	3305 (-19,5%)	5,30 (+3,7%)
10	250	2409	3,42	2436 (+1,1%)	3,45 (+0,9%)
11	300	3386	5,35	3333 (-1,6%)	5,24 (-2,1%)
12	300	3852	5,37	3531 (-8,3%)	5,22 (-2,8%)
13	300	3844	6,41	3048 (-20,7%)	6,55 (+2,2%)
14	300	13216	5,80	11856 (-10,3%)	5,20 (-10,3%)
15	300	16830	6,37	15095 (-10,3%)	5,78 (-9,3%)
16	300	14055	4,62	12801 (-8,9%)	4,47 (-3,2%)
17	300	11126	6,56	9282 (-16,6%)	6,74 (+2,7%)
18	300	14064	5,10	12905 (-8,2%)	5,15 (+1,0%)
19	400	10045	5,92	9629 (-4,1%)	5,81 (-1,9%)
20	400	9576	5,01	10020 (+4,6%)	4,78 (-4,6%)
21	400	7871	5,37	9524 (+21,0%)	5,14 (-4,3%)
22	400	8619	5,05	9968 (+15,7%)	4,83 (-4,4%)
23	600	2155	8,39	2274 (+5,5%)	7,97 (-5,0%)
24	600	2647	8,03	2540 (-4,0%)	7,85 (-2,2%)
25	300	2708	6,37	2324 (-14,2%)	6,28 (-1,4%)
26	300	3072	6,08	2495 (-18,8%)	6,40 (+5,3%)
27	300	2953	6,15	2362 (-20,0%)	6,40 (+4,1%)
28	600	3291	12,07	2628 (-20,1%)	12,41 (+2,8%)
29	600	3302	11,90	2673 (-19,0%)	12,14 (+2,0%)
30	600	3421	11,84	2773 (-18,9%)	11,99 (+1,3%)
31	300	13950	5,12	12072 (-13,5%)	5,12 (0,0%)
32	300	14035	4,96	12753 (-9,1%)	4,98 (+0,4%)
33	300	14096	4,97	12521 (-11,2%)	5,03 (+1,2%)
34	400	9387	5,24	8799 (-6,3%)	5,29 (+1,0%)
35	400	10582	5,16	7998 (-24,4%)	5,48 (+6,2%)
36	400	9030	5,22	8427 (-6,7%)	5,27 (+1,0%)
(S)				-9,7 (±10,6)%	+0,5 (±4,9)%

Dem Probekörper aus dem Scheiteldruckversuch wurde ein schmaler Abschnitt von 50 mm Breite entnommen und ebenfalls daran in Anlehnung der DIN EN 1228 ein Scheiteldruckversuch durchgeführt.

Die Versuche mit den „schmalen Ringen“ wurden an insgesamt 23 Schlauchlinern (Versuchsnr.: 14 – 36) durchgeführt und wurden in der Tabelle 6.2 mit dem normativen Scheiteldruckversuch verglichen. Anschließend wurden die Messwerte des E-Moduls aus dem Dreipunkt-Biegeversuch mit den Ergebnissen des Scheiteldruckversuchs mit „schmalen Ringen“ auf deren Abweichung untersucht.

Tabelle 6.2. Vergleich von breiten mit schmalen Rohrabschnitten und mit dem Dreipunkt-Biegeversuch

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Schmale Ringe		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
14	300	13216	5,80	11569 (-12,5%)	5,60 (-3,5%)	11856 (+2,5%)	5,20 (-7,1%)
15	300	16830	6,37	17059 (+1,4%)	6,09 (-4,4%)	15095 (-11,5%)	5,78 (-5,1%)
16	300	14055	4,62	14565 (+3,6%)	4,49 (-2,8%)	12801 (-12,1%)	4,47 (-0,4%)
17	300	11126	6,56	10894 (-2,1%)	6,63 (+1,1%)	9282 (-14,8%)	6,74 (+1,7%)
18	300	14064	5,10	14229 (+1,2%)	5,03 (-1,4%)	12905 (-9,3%)	5,15 (+2,4%)
19	400	10045	5,92	8960 (-10,8%)	6,01 (+1,5%)	9629 (+7,5%)	5,81 (-3,3%)
20	400	9576	5,01	9744 (+1,8%)	4,80 (-4,2%)	10020 (+2,8%)	4,78 (-0,4%)
21	400	7871	5,37	8483 (+7,8%)	5,18 (-3,5%)	9524 (+12,3%)	5,14 (-0,8%)
22	400	8619	5,05	8607 (-0,1%)	4,98 (-1,4%)	9968 (+15,8%)	4,83 (-3,0%)
23	600	2155	8,39	1940 (-10,0%)	8,37 (-0,2%)	2274 (+17,2%)	7,97 (-4,8%)
24	600	2647	8,03	2203 (-16,8%)	8,12 (+1,1%)	2540 (+15,3%)	7,85 (-3,3%)
25	300	2708	6,37	2171 (-19,8%)	6,48 (+1,7%)	2324 (+7,0%)	6,28 (-3,1%)
26	300	3072	6,08	2703 (-12,0%)	6,08 (0,0%)	2495 (-7,7%)	6,40 (+5,3%)
27	300	2953	6,15	2540 (-14,0%)	6,13 (-0,3%)	2362 (-7,0%)	6,40 (+4,4%)
28	600	3291	12,07	3054 (-7,2%)	11,90 (-1,4%)	2628 (-13,9%)	12,41 (+4,3%)
29	600	3302	11,90	2983 (-9,7%)	11,79 (-0,9%)	2673 (-10,4%)	12,14 (+3,0%)
30	600	3421	11,84	2963 (-13,4%)	12,02 (+1,5%)	2773 (-6,4%)	11,99 (-0,2%)
31	300	13950	5,12	11993 (-14,0%)	5,18 (+1,2%)	12072 (+0,7%)	5,12 (-1,2%)
32	300	14035	4,96	13009 (-7,3%)	4,99 (+0,6%)	12753 (-2,0%)	4,98 (-0,2%)
33	300	14096	4,97	12992 (-7,8%)	4,98 (+0,2%)	12521 (-3,6%)	5,03 (+1,0%)
34	400	9387	5,24	8778 (-6,5%)	5,25 (+0,2%)	8799 (+0,2%)	5,29 (+0,8%)
35	400	10582	5,16	8581 (-5,0%)	5,15 (-0,2%)	7998 (-6,8%)	5,48 (+6,4%)
36	400	9030	5,22	9214 (-12,9%)	5,18 (-0,8%)	8427 (-8,5%)	5,27 (+1,7%)
			(S)	-7,2 (±7,2)%	-0,7 (±1,9)%	-1,4 (±9,9)%	-0,1 (±3,5)%

Die „schmalen Ringe“ fallen im Vergleich zu den normativen Scheiteldruckversuchen im E-Modul um -7,2 (±7,2) % geringer aus. Die Verbundwanddicke ist nahezu unverändert geblieben, mit einer Abweichung von -0,7 (±1,9) %.

Im Vergleich des normativen Scheiteldruckversuchs mit dem Dreipunkt-Biegeversuch erreichten die 23 Schlauchliner eine Abweichung des E-Moduls von -8,6 (±11,4) %. Wird der Dreipunkt-Biegeversuch mit den „schmalen Ringen“ verglichen, ist die Abweichung nur noch bei -1,4 (±9,9) %. Die Verbundwanddicke bleibt fast unverändert. Es ergab sich eine Abweichung zwischen dem Dreipunkt-Biegeversuch und dem normativem Scheiteldruckversuch von -0,8 (±4,2) % und dem Scheiteldruckversuch mit den „schmalen Ringen“ von -0,1 (±3,5) %.

6.2. Unterteilung der Prüfergebnisse in Gruppen

Es erfolgte eine Unterteilung nach Trägermaterial (Synthesefaserliner und Glasfaserliner) sowie nach Produkt und Durchmesser. Bei Produkten, die aus nur einer Schlauchliner-materialprobe bestanden, konnte keine Standardabweichung errechnet werden. Diese Ergebnisse dienen lediglich zur Veranschaulichung, dass sich Abweichungen über die gesamte Bandbreite der Produkte erstrecken können.

6.2.1. Unterteilung nach Trägermaterial

In den Prüfungen ist aufgefallen, dass die verschiedenen Linertypen auch unterschiedlich starke Abweichungen aufweisen. Die Schlauchliner wurden in den Trägermaterialien „Synthesefaserliner“ und „Glasfaserliner“ unterteilt.

Die „Synthesefaserliner“ hatten eine mittlere Abweichung von -12,5 ($\pm 9,2$) % im E-Modul, während die Wanddicke im Mittel um +0,7 ($\pm 2,7$) % abwich (Tabelle 6.3). Bei einer fast gleich bleibenden Wanddickenermittlung fällt das mittlere E-Modul deutlich schlechter gegenüber der Gesamtstatistik mit -9,7 ($\pm 10,6$) % aus.

Tabelle 6.3. Vergleich des Scheiteldruckversuchs mit dem Dreipunkt-Biegeversuch von „Synthesefaserlinern“

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
2	200	3060	3,22	2904 (-5,1%)	3,38 (+5,0%)
3	200	3656	3,13	2947 (-19,4%)	3,41 (+8,9%)
5	225	3752	5,35	2668 (-28,9%)	5,48 (+2,4%)
6	250	3447	4,09	3269 (-5,2%)	4,10 (+0,2%)
7	250	3021	5,94	2668 (-11,7%)	5,93 (-0,2%)
8	300	3369	5,61	3047 (-9,6%)	5,63 (+0,4%)
9	300	4107	5,11	3305 (-19,5%)	5,30 (+3,7%)
10	250	2409	3,42	2436 (+1,1%)	3,45 (+0,9%)
11	300	3386	5,35	3333 (-1,6%)	5,24 (-2,1%)
12	300	3852	5,37	3531 (-8,3%)	5,22 (-2,8%)
13	300	3844	6,41	3048 (-20,7%)	6,55 (+2,2%)
23	600	2155	8,39	2274 (+5,5%)	7,97 (-5,0%)
24	600	2647	8,03	2540 (-4,0%)	7,85 (-2,2%)
25	300	2708	6,37	2324 (-14,2%)	6,28 (-1,4%)
26	300	3072	6,08	2495 (-18,8%)	6,40 (+5,3%)
27	300	2953	6,15	2362 (-20,0%)	6,40 (+4,1%)
28	600	3291	12,07	2628 (-20,1%)	12,41 (+2,8%)
29	600	3302	11,90	2673 (-19,0%)	12,14 (+2,0%)
30	600	3421	11,84	2773 (-18,9%)	11,99 (+1,3%)
(S)				-12,5 ($\pm 9,2$)%	+1,3 ($\pm 3,3$)%

Die mittlere Abweichung des „Glasfaserliners“ ist mit -6,3 ($\pm 11,4$) % geringer als die aus der Gesamtstatistik mit -9,7 ($\pm 10,6$) %. Die Wanddickenermittlung ist mit -0,5 ($\pm 6,2$) % ebenso wie bei den „Synthesefaserlinern“ gleichbleibend, besitzt aber eine deutlich höhere Standardabweichung (Tabelle 6.4).

Tabelle 6.4. Vergleich des Scheiteldruckversuchs mit der Dreipunkt-Biegeversuch von „Glasfaserlinern“

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
4	250	7500	4,64	6569 (-12,4%)	5,39 (+16,2%)
14	300	13216	5,80	11856 (-10,3%)	5,20 (-10,3%)
15	300	16830	6,37	15095 (-10,3%)	5,78 (-9,3%)
16	300	14055	4,62	12801 (-8,9%)	4,47 (-3,2%)
17	300	11126	6,56	9282 (-16,6%)	6,74 (+2,7%)
18	300	14064	5,10	12905 (-8,2%)	5,15 (+1,0%)
19	400	10045	5,92	9629 (-4,1%)	5,81 (-1,9%)
20	400	9576	5,01	10020 (+4,6%)	4,78 (-4,6%)
21	400	7871	5,37	9524 (+21,0%)	5,14 (-4,3%)
22	400	8619	5,05	9968 (+15,7%)	4,83 (-4,4%)
31	300	13950	5,12	12072 (-13,5%)	5,12 (0,0%)
32	300	14035	4,96	12753 (-9,1%)	4,98 (+0,4%)
33	300	14096	4,97	12521 (-11,2%)	5,03 (+1,2%)
34	400	9387	5,24	8799 (-6,3%)	5,29 (+1,0%)
35	400	10582	5,16	7998 (-24,4%)	5,48 (+6,2%)
36	400	9030	5,22	8427 (-6,7%)	5,27 (+1,0%)
(S)				-6,3 (±11,4)%	-0,5 (6,2)%

Es wurden die Werte der „schmalen Ringe“ nach dem Trägermaterial ebenso sortiert und verglichen. In der Tabelle 6.5 wurden nur noch 8 von 17 Synthesefaserlinern zusammengefasst. Von den Glasfaserlinern konnten 15 von 16 in der Tabelle 6.6 zusammengefasst werden. Die „schmalen Ringe“ wurden mit dem normativen Scheiteldruckversuch verglichen und anschließend der Dreipunkt-Biegeversuch mit den nicht normativen „schmalen Ringen“.

Tabelle 6.5. Vergleich „schmale Ringe“ mit dem Dreipunkt-Biegeversuch „Synthesefaserliner“

Nr.	DN	Schmale Ringe		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
23	600	1940 (-10,0%)	8,37 (-0,2%)	2274 (+17,2%)	7,97 (-4,8%)
24	600	2203 (-16,8%)	8,12 (+1,1%)	2540 (+15,3%)	7,85 (-3,3%)
25	300	2171 (-19,8%)	6,48 (+1,7%)	2324 (+7,0%)	6,28 (-3,1%)
26	300	2703 (-12,0%)	6,08 (0,0%)	2495 (-7,7%)	6,40 (+5,3%)
27	300	2540 (-14,0%)	6,13 (-0,3%)	2362 (-7,0%)	6,40 (+4,4%)
28	600	3054 (-7,2%)	11,90 (-1,4%)	2628 (-13,9%)	12,41 (+4,3%)
29	600	2983 (-9,7%)	11,79 (-0,9%)	2673 (-10,4%)	12,14 (+3,0%)
30	600	2963 (-13,4%)	12,02 (+1,5%)	2773 (-6,4%)	11,99 (-0,2%)
(S)		-12,9 (±4,1)%	+0,2 (±1,1)%	-0,7 (±10,5)%	+0,7 (±3,7)%

Die „schmalen Ringe“ aus Synthesefaser fallen um -12,9 (±4,1) % geringer aus als die normative Scheiteldruckprüfung, während die Verbundwanddicke mit +0,2 (±1,1) % nur sehr gering verändert wurde. Bei dem Vergleich des nicht normativen Scheiteldruckversuchs mit dem Dreipunkt-Biegeversuch ergab sich eine geringe Abweichung von -0,7 (±10,5) % im E-Modul.

Tabelle 6.6. Vergleich „schmale Ringe“ mit dem Dreipunkt-Biegeversuch „Glasfaserliner“

Nr.	DN	Schmale Ringe		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
14	300	11569 (-12,5%)	5,60 (-3,5%)	11856 (+2,5%)	5,20 (-7,1%)
15	300	17059 (+1,4%)	6,09 (-4,4%)	15095 (-11,5%)	5,78 (-5,1%)
16	300	14565 (+3,6%)	4,49 (-2,8%)	12801 (-12,1%)	4,47 (-0,4%)
17	300	10894 (-2,1%)	6,63 (+1,1%)	9282 (-14,8%)	6,74 (+1,7%)
18	300	14229 (+1,2%)	5,03 (-1,4%)	12905 (-9,3%)	5,15 (+2,4%)
19	400	8960 (-10,8%)	6,01 (+1,5%)	9629 (+7,5%)	5,81 (-3,3%)
20	400	9744 (+1,8%)	4,80 (-4,2%)	10020 (+2,8%)	4,78 (-0,4%)
21	400	8483 (+7,8%)	5,18 (-3,5%)	9524 (+12,3%)	5,14 (-0,8%)
22	400	8607 (-0,1%)	4,98 (-1,4%)	9968 (+15,8%)	4,83 (-3,0%)
31	300	11993 (-14,0%)	5,18 (+1,2%)	12072 (+0,7%)	5,12 (-1,2%)
32	300	13009 (-7,3%)	4,99 (+0,6%)	12753 (-2,0%)	4,98 (-0,2%)
33	300	12992 (-7,8%)	4,98 (+0,2%)	12521 (-3,6%)	5,03 (+1,0%)
34	400	8778 (-6,5%)	5,25 (+0,2%)	8799 (+0,2%)	5,29 (+0,8%)
35	400	8581 (-5,0%)	5,15 (-0,2%)	7998 (-6,8%)	5,48 (+6,4%)
36	400	9214 (-12,9%)	5,18 (-0,8%)	8427 (-8,5%)	5,27 (+1,7%)
(S)		-4,2 (±6,7)%	-1,1 (±2,1)%	-1,8 (±9,0)%	-0,5 (±3,3)%

Ähnliches wurde auch bei den „Glasfaserlinern“ beobachtet. Dort lag die Abweichung des E-Moduls im Vergleich der „schmalen Ringe“ mit dem Dreipunkt-Biegeversuch bei -1,8 (±9,0) %, während die Verbundwanddicke nur um -1,1 (±2,1) % durch die „schmalen Ringe“ verändert wurde, so dass die Abweichung der Wanddicke bei -0,5 (±3,3) % lag.

6.2.2. Unterteilung nach Produkt und Durchmesser

Bereits in der Voreinschätzung zeigte sich, dass die mittlere Abweichung einen negativen Trend aufweist, indem die E-Module aus dem Dreipunkt-Biegeversuch geringer sind als in dem Scheiteldruckversuch. Um die Einflüsse besser erfassen zu können, wurden die Schlauchliner weiter in einzelne Gruppen, nach Produkt und Durchmesser, unterteilt. Den einzelnen Produkten wurde ein Buchstabe zugeordnet und nach „Synthesefaserliner“ oder „Glasfaserliner“ unterschieden.

In der Tabelle 6.7 wurde die mittlere Abweichung von -8,5 (±4,6) % bei dem E-Modul und +0,0 (±0,3) % in der Verbundwanddicke des Produktes A, DN 250 ermittelt.

Tabelle 6.7. Produkt A Synthesefaserliner DN 250

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
6	250	3447	4,09	3269 (-5,2%)	4,10 (+0,2%)
7	250	3021	5,94	2668 (-11,7%)	5,93 (-0,2%)
(S)				-8,5 (±4,6)%	+0,0 (±0,3)%

In der nächsten Tabelle (Tabelle 6.8) wurde dasselbe Produkt A mit der Größe DN 300 zusammengestellt. In der Gruppe wurde eine mittlere Abweichung von -14,6 ($\pm 7,0$) % im E-Modul und +2,1 ($\pm 2,3$) % in der Verbundwanddicke festgestellt.

Tabelle 6.8. Produkt A Synthesefaserliner DN 300

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
8	300	3369	5,61	3047 (-9,6%)	5,63 (+0,4%)
9	300	4107	5,11	3305 (-19,5%)	5,30 (+3,7%)
(S)				-14,6 ($\pm 7,0$)%	+2,1 ($\pm 2,3$)%

Für das Produkt B mit dem Durchmesser DN 300 (Tabelle 6.9) wurde an 3 Schlauchlinern eine mittlere Abweichung des E-Moduls von -17,7 ($\pm 3,1$) % und in der Verbundwanddicke eine Abweichung von +2,7 ($\pm 3,6$) % ermittelt.

Tabelle 6.9. Produkt B Synthesefaserliner DN 300

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
25	300	2708	6,37	2324 (-14,2%)	6,28 (-1,4%)
26	300	3072	6,08	2495 (-18,8%)	6,40 (+5,3%)
27	300	2953	6,15	2362 (-20,0%)	6,40 (+4,1%)
(S)				-17,7 ($\pm 3,1$)%	+2,7 ($\pm 3,6$)%

Das Produkt B, DN 300, wurde an denselben 3 Schlauchlinern mit dem nicht normativen Scheiteldruckversuch (Tabelle 6.10) untersucht, dabei wurde eine Abweichung zu dem normativen Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1228 von -15,3 ($\pm 4,1$) % im E-Modul ermittelt. Im Vergleich zum Dreipunkt-Biegeversuch weist der Scheiteldruckversuch mit den „schmalen Ringen“ nur noch eine Abweichung von -2,6 ($\pm 8,3$) % im E-Modul auf. Die Wanddicke veränderte sich um +0,5 ($\pm 1,1$) % zur ermittelten Wanddicke des normativen Scheiteldruckversuchs.

Tabelle 6.10. Produkt B Synthesefaserliner DN 300 mit „schmalen Ringen“

Nr.	DN	Schmale Ringe		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
25	300	2171 (-19,8%)	6,48 (+1,7%)	2324 (+7,0%)	6,28 (-3,1%)
26	300	2703 (-12,0%)	6,08 (0,0%)	2495 (-7,7%)	6,40 (+5,3%)
27	300	2540 (-14,0%)	6,13 (-0,3%)	2362 (-7,0%)	6,40 (+4,4%)
(S)		-15,3 ($\pm 4,1$)%	+0,5 ($\pm 1,1$)%	-2,6 ($\pm 8,3$)%	+2,2 ($\pm 4,6$)%

An dem Produkt B wurden drei weitere Schlauchliner der Nennweite DN 600 auf ihre Abweichung untersucht. Zwischen dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch ergibt sich eine Abweichung von -19,3 ($\pm 0,7$) % im E-Modul und +2,0 ($\pm 0,8$) % in der Verbundwanddicke (Tabelle 6.11).

Tabelle 6.11. Produkt B Synthesefaserliner DN 600

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
28	600	3291	12,07	2628 (-20,1%)	12,41 (+2,8%)
29	600	3302	11,90	2673 (-19,0%)	12,14 (+2,0%)
30	600	3421	11,84	2773 (-18,9%)	11,99 (+1,3%)
(S)				-19,3 (±0,7)%	+2,0 (±0,8)%

Von den Schlauchlinern (Produkt B) DN 600 konnten „schmale Ringe“ geprüft werden, siehe Tabelle 6.12. Die „schmalen Ringe“ hatten zum normativen Scheiteldruckversuch eine Abweichung im E-Modul von -10,1 (±3,1) % und ergaben zu dem Dreipunkt-Biegeversuch eine Abweichung von -6,4 (±7,1) %. Die Wanddicken blieben mit -0,3 (±1,6) % zum Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1228 fast unverändert.

Tabelle 6.12. Produkt B Synthesefaserliner DN 600 mit „schmalen Ringen“

Nr.	DN	Schmale Ringe		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
28	600	3054 (-7,2%)	11,90 (-1,4%)	2628 (-13,9%)	12,41 (+4,3%)
29	600	2983 (-9,7%)	11,79 (-0,9%)	2673 (-10,4%)	12,14 (+3,0%)
30	600	2963 (-13,4%)	12,02 (+1,5%)	2773 (-6,4%)	11,99 (-0,2%)
(S)		-10,1 (±3,1)%	-0,3 (±1,6)%	+6,4 (±7,1)%	+2,3 (±3,3)%

Das Produkt C der Nennweite DN 300 (Tabelle 6.13) ergab mit drei verschiedenen Schlauchlinern eine Abweichung von -10,2 (±9,7) % im E-Modul und in der Verbundwanddicke von -0,9 (±2,7) %. Es wurden an diesem Produkt keine Vergleichsversuche mit „schmalen Ringen“ durchgeführt.

Tabelle 6.13. Produkt C Synthesefaserliner DN 300

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
11	300	3386	5,35	3333 (-1,6%)	5,24 (-2,1%)
12	300	3852	5,37	3531 (-8,3%)	5,22 (-2,8%)
13	300	3844	6,41	3048 (-20,7%)	6,55 (+2,2%)
(S)				-10,2 (±9,7)%	-0,9 (±2,0)%

Das Produkt D, DN 200, ergab mit zwei Schlauchlinern eine Abweichung im E-Modul von +12,3 (±10,1) %, sowie in der Verbundwanddicke von +7,0 (±2,8) %, siehe Tabelle 6.14.

Tabelle 6.14. Produkt D Synthesefaserliner DN 200

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
2	200	3060	3,22	2904 (-5,1%)	3,38 (+5,0%)
3	200	3656	3,13	2947 (-19,4%)	3,41 (+8,9%)
(S)				-12,3 (±10,1)%	+7,0 (±2,8)

Das Produkt D, DN 600, ergab mit zwei Schlauchlinern eine Abweichung im E-Modul von +0,8 (±6,7) %, sowie in der Verbundwanddicke von -3,6 (±2,0) %, siehe Tabelle 6.15.

Tabelle 6.15. Produkt D Synthesefaserliner DN 600

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
23	600	2155	8,39	2274 (+5,5%)	7,97 (-5,0%)
24	600	2647	8,03	2540 (-4,0%)	7,85 (-2,2%)
(S)				+0,6 (±7,0)%	-3,6 (±2,0)%

Es wurden von dem Produkt D, DN 600, die „schmalen Ringe“ entnommen und im Scheiteldruckversuch geprüft, um das E-Modul zu ermitteln. Die E-Module wichen im Mittel mit -13,4 (±4,8) % vom normativen Scheiteldruckversuch (Tabelle 6.16) ab und vergrößerten die Abweichung zum Dreipunkt-Biegeversuch auf +16,3 (±1,3) %.

Tabelle 6.16. Produkt D Synthesefaserliner DN 600 mit „schmalen Ringen“

Nr.	DN	Schmale Ringe		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
23	600	1940 (-10,0%)	8,37 (-0,2%)	2274 (+17,2%)	7,97 (-4,8%)
24	600	2203 (-16,8%)	8,12 (+1,1%)	2540 (+15,3%)	7,85 (-3,3%)
(S)		-13,4 (±4,8)%	+0,5 (±0,9)%	+16,3 (±1,3)%	-4,1 (±1,1)%

Der Glasfaserliner des Produktes E (DN 300) mit 5 Schlauchlinerproben erbrachte eine Abweichung des E-Moduls von -11,7 (±3,4) % und die Verbundwanddicke wich um +1,1 (±1,0) % ab (Tabelle 6.17).

Tabelle 6.17. Produkt E Glasfaserliner DN 300

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
17	300	11126	6,56	9282 (-16,6%)	6,74 (+2,7%)
18	300	14064	5,10	12905 (-8,2%)	5,15 (+1,0%)
31	300	13950	5,12	12072 (-13,5%)	5,12 (0,0%)
32	300	14035	4,96	12753 (-9,1%)	4,98 (+0,4%)
33	300	14096	4,97	12521 (-11,2%)	5,03 (+1,2%)

$$(S) \quad \left| \begin{array}{cc} -11,7 (\pm 3,4)\% & +1,1 (\pm 1,0)\% \end{array} \right.$$

Es konnten von allen 5 Schlauchlinerproben „schmale Ringe“ gewonnen und auf das E-Modul untersucht werden. Die Abweichungen der „schmalen Ringe“ zum normativen Scheiteldruckversuch betrug $-6,0 (\pm 5,8) \%$ und erreichte im Vergleich zum Dreipunkt-Biegeversuch eine Abweichung von $-5,8 (\pm 6,2) \%$. Die Verbundwanddicke änderte sich mit $+0,3 (\pm 1,1) \%$ geringfügig (Tabelle 6.18).

Tabelle 6.18. Produkt E Glasfaserliner DN 300 mit „schmalen Ringen“

Nr.	DN	Schmale Ringe		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
17	300	10894 (-2,1%)	6,63 (+1,1%)	9282 (-14,8%)	6,74 (+1,7%)
18	300	14229 (+1,2%)	5,03 (-1,4%)	12905 (-9,3%)	5,15 (+2,4%)
31	300	11993 (-14,0%)	5,18 (+1,2%)	12072 (+0,7%)	5,12 (-1,2%)
32	300	13009 (-7,3%)	4,99 (+0,6%)	12753 (-2,0%)	4,98 (-0,2%)
33	300	12992 (-7,8%)	4,98 (+0,2%)	12521 (-3,6%)	5,03 (+1,0%)
(S)		-6,0 ($\pm 5,8$)%	+0,3 ($\pm 1,1$)%	-5,6 ($\pm 6,2$)%	+0,7 ($\pm 1,4$)%

Von dem gleichen Produkt (E) wurden 6 Schlauchliner mit der Nennweite DN 400 untersucht (Tabelle 6.19). Es wurde eine mittlere Abweichung des E-Moduls von $+0,7 (\pm 16,6) \%$ und in der Verbundwanddicke von $-0,9 (\pm 4,4) \%$ ermittelt.

Tabelle 6.19. Produkt E Glasfaserliner DN 400

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
20	400	9576	5,01	10020 (+4,6%)	4,78 (-4,6%)
21	400	7871	5,37	9524 (+21,0%)	5,14 (-4,3%)
22	400	8619	5,05	9968 (+15,7%)	4,83 (-4,4%)
34	400	9387	5,24	8799 (-6,3%)	5,29 (+1,0%)
35	400	10582	5,16	7998 (-24,4%)	5,48 (+6,2%)
36	400	9030	5,22	8427 (-6,7%)	5,27 (+1,0%)
(S)				+0,7 ($\pm 16,6$)%	-0,9 ($\pm 4,4$)%

Von dem Produkt E (DN 400) konnten von allen Schlauchlinern „schmale Ringe“ entnommen und der Scheiteldruckversuch durchgeführt werden (Tabelle 6.20). Die Abweichungen waren gegenüber dem normativen Scheiteldruckversuch mit $-2,5 (\pm 7,2) \%$ vereinzelt hoch und ergaben eine Abweichung gegenüber des E-Moduls aus dem Dreipunkt-Biegeversuch von $+2,6 (\pm 9,9) \%$. Die Wanddicke wurde bei den „schmalen Ringen“ um $-1,7 (\pm 1,8) \%$ geringer als im normativen Scheiteldruckversuch ermittelt. Die Wanddicken der „schmalen Ringe“ passten aber besser zu den Versuchen der Dreipunktbiegung, die eine Abweichung von $+0,8 (\pm 3,2) \%$ voneinander hatten.

Tabelle 6.20. Produkt E Glasfaserliner DN 400 mit „schmalen Ringen“

Nr.	DN	Schmale Ringe		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
20	400	9744 (+1,8%)	4,80 (-4,2%)	10020 (+2,8%)	4,78 (-0,4%)
21	400	8483 (+7,8%)	5,18 (-3,5%)	9524 (+12,3%)	5,14 (-0,8%)
22	400	8607 (-0,1%)	4,98 (-1,4%)	9968 (+15,8%)	4,83 (-3,0%)
34	400	8778 (-6,5%)	5,25 (+0,2%)	8799 (+0,2%)	5,29 (+0,8%)
35	400	8581 (-5,0%)	5,15 (-0,2%)	7998 (-6,8%)	5,48 (+6,4%)
36	400	9214 (-12,9%)	5,18 (-0,8%)	8427 (-8,5%)	5,27 (+1,7%)
(S)		-2,5 (±7,2)%	-1,7 (±1,8)%	+2,6 (±9,9)%	+0,8 (±3,2)%

Das Produkt F (DN 300) ist ebenfalls ein „Glasfaserliner“ (Tabelle 6.21) und erlangt mit zwei Schlauchlinerproben eine mittlere Abweichung im E-Modul von -10,3 (±0,0) % und in der Verbundwanddicke von -9,8 (±0,7) % und durch das nachträgliche Entfernen des Zugbandes entsteht.

Tabelle 6.21. Produkt F Glasfaserliner DN 300

Nr.	DN	Scheiteldruckversuch		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
14	300	13216	5,80	11856 (-10,3%)	5,20 (-10,3%)
15	300	16830	6,37	15095 (-10,3%)	5,78 (-9,3%)
(S)				-10,3 (±0,0)%	-9,8 (±0,7)%

An beiden Schlauchlinern des Produktes F konnte das E-Modul von den „schmalen Ringen“ ermittelt werden. Es ergab sich eine Abweichung im E-Modul zum Scheiteldruckversuch von -5,6 (±9,8) % und näherte sich damit mit -4,5 (±9,9) % den Werten aus dem Dreipunkt-Biegeversuch. Die Wanddickenbestimmung weist dabei jedoch eine größere Abweichung gegenüber dem normativen Scheiteldruckversuch von -4,0 (±0,6) % auf. Die Abweichung der ermittelten Wanddicke in dem Dreipunkt-Biegeversuch wurde mit den „schmalen Ringen“ auf -6,1 (±1,4) % verringert.

Tabelle 6.22. Produkt F Glasfaserliner DN 300 mit „schmalen Ringen“

Nr.	DN	Schmale Ringe		Dreipunkt-Biegeversuch	
		Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Wanddicken [mm]
14	300	11569 (-12,5%)	5,60 (-3,5%)	11856 (+2,5%)	5,20 (-7,1%)
15	300	17059 (+1,4%)	6,09 (-4,4%)	15095 (-11,5%)	5,78 (-5,1%)
(S)		-5,6 (±9,8)%	-4,0 (±0,6)%	-4,5 (±9,9)%	-6,1 (±1,4)%

6.3. Ermittlung der Ringspannung

Häufig wurde nach dem Durchtrennen der Rohrabschnitte eine innere Spannung festgestellt. Um den möglichen Einfluss auf das E-Modul zu untersuchen, wurde die Länge der Überlappung gemessen. Mit einer für diese Arbeit angefertigten Zugvorrichtung wurde mittels der

Universalprüfmaschine der zusammengesprungene Ring wieder in die ursprüngliche Ausgangsposition gezogen und die dafür benötigte Zugkraft aufgezeichnet.

An 17 Schlauchlinern wurde das Zusammenspringen der Ringe beobachtet und dokumentiert, sowie anschließend die Zugkraft ermittelt. An den ersten fünf Schlauchlinern wurde die Durchtrennung am ganzen Rohrabschnitt vorgenommen. Alle nachfolgenden Ermittlungen der Ringspannungen wurden nur noch am „schmalen Ring“ (insgesamt 12) durchgeführt, der unabhängig vom Durchmesser immer 50 mm breit war.

In der Tabelle 6.23 werden die gemessenen Werte aus der Zugprüfung aufgeführt.

Tabelle 6.23. Innere Ringspannung der zusammengefallenen Ringe

Abk.	1	2	3	4	9	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	34	35	
DN	150	200	200	250	300	300	300	300	300	300	400	400	400	400	600	600	400	400	[mm]
Probenbreite	150	200	200	250	300	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	[mm]
Wanddicke	2,88	3,22	3,13	4,64	5,11	5,80	6,37	4,62	6,56	5,10	5,92	5,01	5,37	5,05	8,39	8,03	5,24	5,16	[mm]
Überlappung	16,9	16,1	12,5	28,9	7,7	40,9	44,5	30,1	18,6	24,2	4,6	52,3	51,7	48,5	102,2	74,3	31,3	24,3	[mm]
Zugkraft	2,9	5	3,7	51,9	5,2	12,5	29,9	7,1	8,9	6,9	3,4	3,8	4,0	3,8	2,6	2,2	2,8	2,2	[N]
Ringspannung	0,007	0,008	0,006	0,045	0,003	0,043	0,094	0,031	0,027	0,027	0,011	0,015	0,015	0,015	0,006	0,005	0,011	0,009	[N/mm ²]

6.4. Bestehende Prüfergebnisse

Die bestehenden Prüfergebnisse sind Messdaten von Baustellenproben, die zur statistischen Auswertung von einem Hersteller für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurden.

672 Schlauchliner in verschiedenen Durchmessern standen dabei zur Verfügung. Diese Baustellenergebnisse mussten zuvor für die Vergleichbarkeit der E-Module sortiert werden. Denn lediglich an 336 Schlauchlinern wurden die beiden Prüfungen vergleichsweise durchgeführt. Davon fehlten bei 17 Schlauchlinern wichtige Information wie Durchmesser oder Prüfrichtung. Weitere 130 Schlauchliner wurden zwar untereinander verglichen, jedoch nur in axialer Richtung und waren \leq DN 200. Damit blieben nur noch 189 Vergleichsversuche an Schlauchlinern übrig, die auf ihre Abweichungen hin untersucht werden konnten.

Bei den Baustellenproben ergab sich eine mittlere Abweichung im E-Modul zwischen Scheitel-druck- und Dreipunkt-Biegeversuch von $-14,7 (\pm 12,6) \%$. Die Proben zeigten eine hohe Standardabweichung auf, obwohl die Probenanzahl relativ hoch war. Die höchsten Abweichungen zwischen den E-Modulermittlungen bei der Unterbewertung der E-Module bei $-49,8 \%$ und bei der Überbewertung $+41,3 \%$.

Die Baustellenprüfungen (DN 200 bis DN 500) bestanden vorrangig aus den Nennweiten DN 250 (96 Versuche) und DN 300 (54 Versuche). Die Abweichungen der E-Module und der Wanddicken zwischen den beiden Versuchen werden für die unterschiedlichen Durchmesser in der Tabelle 6.24 aufgeführt.

Tabelle 6.24. Abweichungen der Baustellenproben, unterteilt nach Durchmesser

DN	Anzahl	Abweichung des E-Moduls [%]	Abweichung der Wanddicke [%]
200	17	-7,8 ($\pm 21,2$)%	-4,8 ($\pm 5,5$)%
250	96	-16,1 ($\pm 12,3$)%	-2,0 ($\pm 5,7$)%
300	54	-13,2 ($\pm 9,1$)%	-1,8 ($\pm 4,5$)%
350	7	-21,4 ($\pm 11,5$)%	-0,2 ($\pm 3,3$)%
400	13	-14,5 ($\pm 10,1$)%	+0,4 ($\pm 3,8$)%
500	2	-22,1 ($\pm 12,9$)%	-0,6 ($\pm 4,2$)%

| 189 | -14,7 ($\pm 12,6$)% | -1,9 ($\pm 5,2$)%

7. Bewertung der Ergebnisse

Diese Arbeit basiert sowohl auf selbst ermittelten sowie auch auf zur Verfügung gestellten Prüfergebnissen von Schlauchlinern, an denen ein Vergleich zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch durchgeführt wurde.

In der Auswertung erfolgte eine nähere Betrachtung der erbrachten E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch. Um diese zu vergleichen, wurden die gemessenen E-Module aus den Prüfungen der Schlauchlinerproben gegenübergestellt und deren prozentuale Abweichungen errechnet.

In dem Vergleich des Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuchs sollte nicht nur die Abweichung, sondern auch deren Ursache ermittelt werden. Dafür wurden visuelle Untersuchungen an Feinschnitten von Probekörpern durchgeführt.

7.1. Auswertung der durchgeführten Versuche

Zur Betrachtung der ermittelten E-Module werden diese als ein Balkendiagramm grafisch über dem Ring dargestellt. Ein Beispiel dafür ist in Bild 7.1 abgebildet worden.

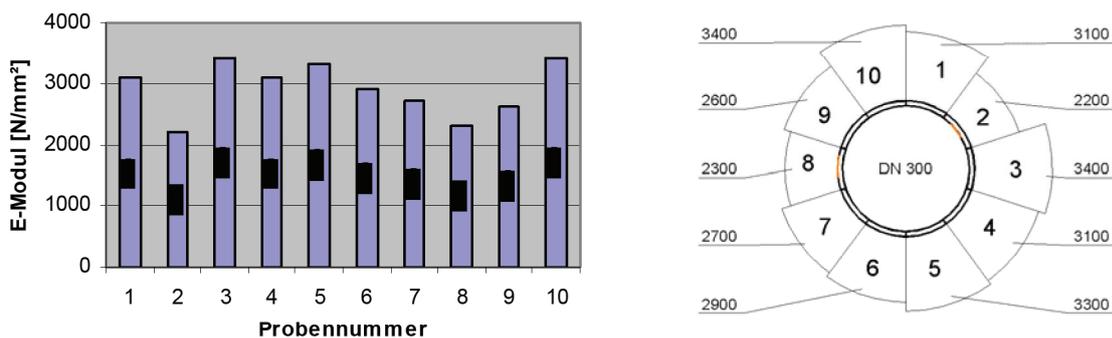


Bild 7.1. Beispiel für die grafische Darstellung der E-Module im Balkendiagramm und über dem Ring

In einem Balkendiagramm werden nur die Unterschiede zwischen den einzelnen Proben sichtbar. Werden die E-Module aber über den Ringumfang dargestellt, lassen sich aus der Lage und Anordnung (Bild 7.1) weitere Schlussfolgerungen ziehen, wie z.B. auf Tränkungsdefizite oder die Lage der Nahtbereiche (farbig markiert).

Die Ringe konnten nicht nach Sohle und Scheitel ausgerichtet werden, da es nicht an den Proben gekennzeichnet wurde. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Innennaht im oberen Drittel anzutreffen ist [20]. Die Proben wurden im Uhrzeigersinn aufsteigend der Nummerierung angeordnet.

Neben der E-Moduldarstellung wird auch zur Auswertung eine Darstellung der Wanddicke über dem Ring für die jeweiligen Versuche dargestellt (Bild 7.2). Da die Wanddicke in die Formel in der dritten Potenz eingeht, wurde diese ebenso in der Grafik in der dritten Potenz dargestellt. Die errechneten Werte wurden normiert und über dem Ring angeordnet.

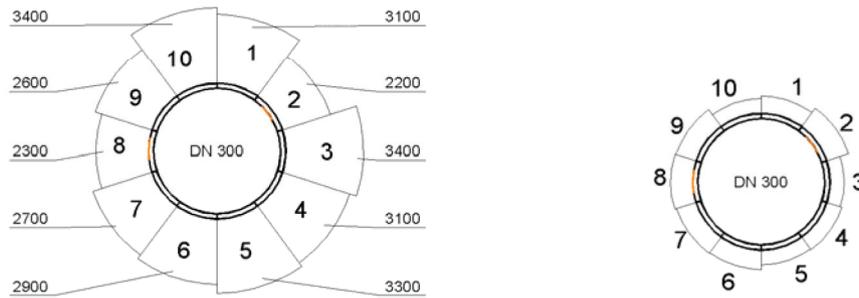


Bild 7.2. Beispiel der grafischen Darstellung der E-Module und der Wanddicke über dem Ring

7.2. Auswertung einzelner Versuche

Um die Abweichung zwischen dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch näher zu untersuchen, wurden Schlauchliner mit einer signifikanten Abweichung ausgewertet. Es wurde von beispielhaften Proben Feinschnitte entnommen und anschließend visuell untersucht. Dafür wurden die Feinschnitte mit Hilfe eines Scanners hochauflösend (2400dpi) digitalisiert. In den Feinschnitten wurden Luftporen, Harzdefizite, Faltenbildungen und Reinharzschichten festgestellt. Diese Störungen werden Imperfektionen genannt und können einen großen Einfluss auf das E-Modul der Probe haben.

Im Folgenden werden exemplarisch einige Schlauchliner mit hohen Abweichungen und später mit den geringsten Abweichungen zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch ausgewertet.

7.2.1. Auswertung des Versuches 1

Im Versuch 1 wurde ein Synthefaserliner mit der Nennweite DN 150 aus dem Produkt D untersucht. In dem Scheiteldruckversuch erreichte dieser Schlauchliner ein mittleres E-Modul von 1566 N/mm². Die Grafik (Bild 7.3) stellt die erbrachten E-Module der Einzelproben über dem Ring dar. Die Proben des Liners zeigten einseitig ein niedrigeres E-Modul. Die Naht befindet sich in der Probe 6. Der Wandaufbau ist relativ homogen über den Ring verteilt und weist im Nahtbereich eine ausgeprägte Verdickung auf.



Bild 7.3. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 1

Im Bild 7.4 wird der Feinschnitt der Probe 5 aus dem Versuch 1 gezeigt. An diesem Probekörper sind kleine helle Poren zu erkennen. Diese Poren sind auch in den Probekörpern 1, 4 und 6 vorhanden. Die Poren beeinträchtigen das Material, da der Querschnitt geschwächt wird. Das Material wird in seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Verformung gemindert.



Bild 7.4. Feinschnitt der Probe 5 mit kleinen Poren

In dem Bild 7.5 ist der Feinschnitt der Probe 6 mit der Innennaht zu sehen. Die Nahtstelle befindet sich in der Mitte der Probe und ist etwas dunkler als das restliche Schlauchliner-material. Im nicht gehärteten Zustand werden die Enden des Trägermaterials auf Stoß durch die Verschweißung des Coatings zusammengehalten. Das Coating ist eine innenseitige Beschichtung, die nach der Herstellung im Rohr verbleibt. Die Naht zieht sich beim Aufstellen des Liners leicht auseinander und es bildet sich eine Reinharzschicht im Nahtbereich aus. Eine ca. 45 mm breite und ca. 1,5 mm dicke Synthefaserlage überdeckt die Stoßstelle der Naht (siehe Bild 7.5). Links und rechts am Ende der Probe bilden sich Reinharzschichten, da diese Lage dort endet. Innenseitig ist die Naht mit einer Schutzband verschweißt worden. Rechts neben der Naht lag der Verschweißungsbereich der Außenfolie (Pfeil im Bild), der die Verbundwanddicke an dieser Stelle reduzierte. Die Schweißnaht verlief axial in Schlauchachse.



Bild 7.5. Feinschnitt der Probe 6 mit Innennaht und oben liegender Überlappung

Dieser Schlauchliner zeigte die größte Abweichung zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch, mit +36,2 %. Die defekte Naht wirkte sich in allen drei Prüfungen des Scheiteldruckversuchs als Gelenk aus und führte deshalb zu einem deutlich geringeren E-Modul (1566 N/mm²). In dem Dreipunkt-Biegeversuch erreichte die Probe mit dem Nahtbereich ein E-Modul von 1633 N/mm² und ist damit ähnlich hoch wie das Ergebnis aus dem Scheiteldruckversuch. Dadurch weicht der Scheiteldruckversuch nur noch um +4,3 % vom Dreipunkt-Biegeversuch ab und steht in guter Näherung.

7.2.2. Auswertung des Versuches 3

Im Versuch 3 wurde an einem Schlauchliner des Produktes D der Größe DN 200 das E-Modul untersucht (Bild 7.6).

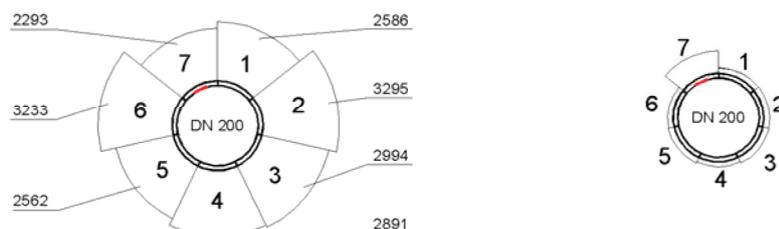


Bild 7.6. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 3

Ein E-Modul von 3656 N/mm² wurde in der Scheiteldruckprüfung erreicht. In dem Dreipunkt-Biegeversuch wurde ein mittleres E-Modul von 2947 N/mm² erreicht. Die Abweichung zwischen den ermittelten E-Modulen ist mit -19,4 % deutlich höher als im Versuch 2. Dort wurde eine Abweichung von -5,1 % des gleichen Materials und Durchmessers ermittelt. Ein Grund für diese hohe Abweichung aus dem Versuch 3 ist eine Unterbewertung der Verbundwanddicke in dem Scheiteldruckversuch, gegenüber der Verbundwanddicke die in dem Dreipunkt-Biegeversuch ermittelt wurde. Die Proben mit den geringeren E-Modulen sind in Bild 7.7 abgebildet.



Bild 7.7. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 5 und 7

In der Probe 5 sind lokal konzentriert Luftporen vorhanden, die zu einem geringeren E-Modul von 2562 N/mm² führten. Bei der Probe 1 kommen diese Poren ähnlich häufig im Biegebereich vor.

Die Probe 7 besitzt eine unvernähte Naht, bei dem die Enden des Trägermaterials auf Stoß verbunden wurden (ähnlich dem Versuch 1). Eine ca. 50 mm breite und ca. 2,3 mm dicke Synthesefaserlage überdeckt die Nahtstelle (Verdickung, siehe Bild 7.6). Die Naht kann nur zu einem geringen Maß zu Verstärkung beitragen, so dass die darüberliegende Lage die Biegespannung aus dem nicht verstärkten Bereich mit aufnimmt. Deshalb wird nur ein geringes E-Modul für die ermittelte Verbundwanddicke erreicht.

7.2.3. Auswertung des Versuches 4

Der Versuch 4 erfolgte an einem Glasfaserliner des Produktes E mit der Nennweite DN 250 (Bild 7.8). Die E-Module der Glasfaserliner sind deutlich höher als die der Synthesefaserliner. Die E-Module wurden daher mit einem anderen Verhältnis über dem Ring dargestellt.

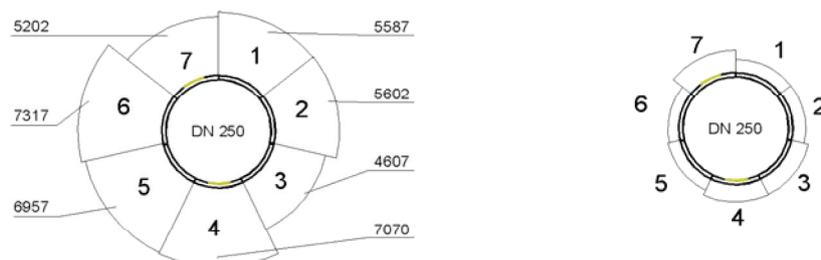


Bild 7.8. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 4

In dem Scheiteldruckversuch erreichte der Schlauchliner ein mittleres E-Modul von 7500 N/mm², während der Dreipunkt-Biegeversuch mit 6569 N/mm² um -12,4 % niedriger ausfiel.

Die Wanddickenermittlung wurde durch eine ausgeprägte Oberflächentopografie erschwert. Die Wanddicke nahm von der Seite A zur Seite B im Scheiteldruckversuch (Anlage A1) ab.

Die Proben wurden von der Seite A entnommen und waren deshalb im Durchschnitt dicker als der Mittelwert aus dem Scheiteldruckversuch. Die ausgeprägte Oberflächentopografie hatte in dem Dreipunkt-Biegeversuch einen größeren Einfluss auf die Ermittlung der Verbundwanddicke als in dem Scheiteldruckversuch. Der Grund dafür ist die unterschiedliche Anzahl an Messungen bei der Wanddickenermittlung. In dem Scheiteldruckversuch wird die Wanddicke an 12 Messstellen ermittelt, dem stehen insgesamt 42 Messungen (6 Messungen an 7 Probekörpern) aus dem Dreipunkt-Biegeversuch gegenüber. In dem Scheiteldruckversuch werden Nahtbereiche zwischen den Referenzlinien gelegt, damit nicht über eine Nahtstelle geprüft wird. Diese Bereiche sind oft dicker und gehen somit nicht in die Wanddickenermittlung des Scheiteldruckversuchs mit ein.

Bild 7.9 zeigt die Feinschnitte der Proben 3, 4 und 7, die im Rahmen der optischen Untersuchung gemacht worden sind.

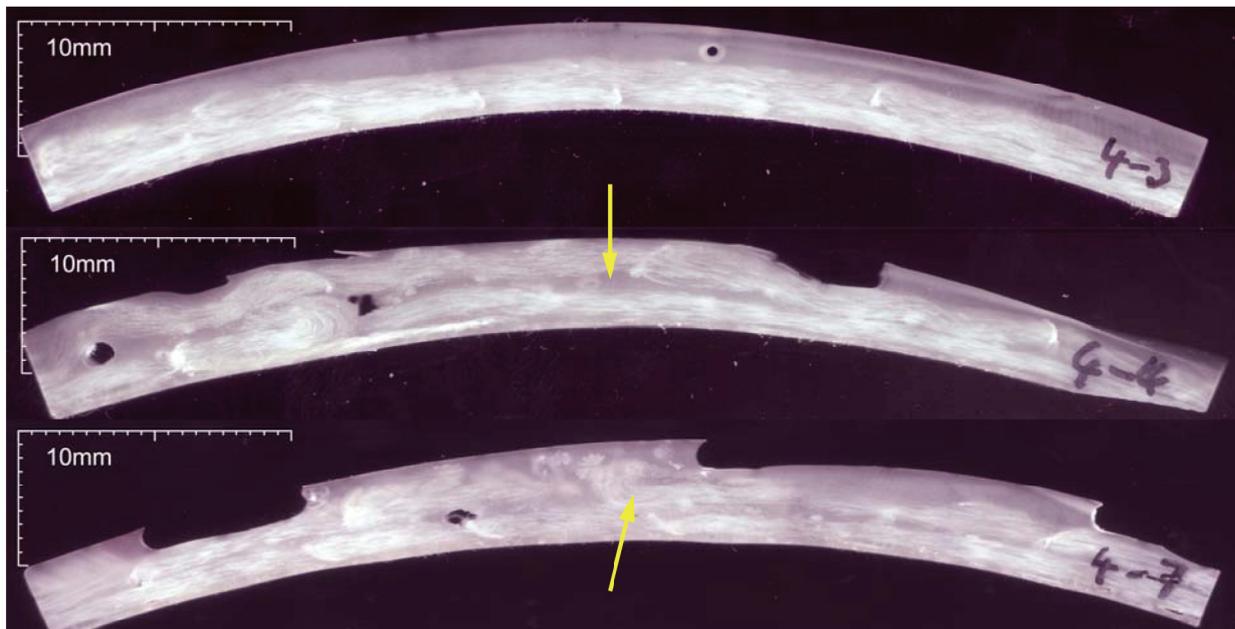


Bild 7.9. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 3, 4 und 7

Erst bei den Feinschnitten wurde die optische Trennung zwischen Reinharz und statisch tragendem Laminat möglich. Die Probe 3 zeigt eine dicke Reinharzschicht, die in der Mitte des Probekörpers fast so dick ist wie die Wanddicke des statisch tragenden Laminats. Dadurch wird eine korrekte Ermittlung der Verbundwanddicke erschwert und der Probekörper erreicht ein niedriges E-Modul.

In der Probe 4 befindet sich die Innennaht auf der linken Seite. Von der Naht bis zur Falte befindet sich zwischen der oberen und unteren Glaslage eine ca. 1-2 mm dicke interlaminare Reinharzschicht (Pfeil im Bild). Durch einen Harzüberschuss ist es an der Stelle zu einer Faltenbildung der Außenfolie und Verwerfungen der Glaslagen gekommen. In den Nahtbereichen befinden sich häufig größere Lufteinschlüsse. Diese Probe erreichte jedoch ein hohes E-Modul. Eine interlaminare Reinharzschichten hat nur geringfügig Auswirkung auf das E-Modul, können jedoch zu einem frühzeitigen Versagen (so genannte interlaminare Scherbrüche) führen.

Die Probe 7 wies ebenfalls eine ausgeprägte Oberflächentopografie auf, die durch Faltenbildung der Außenfolie und Luftblasen (links) in der Reinharzschicht hervorgerufen wurde. Anhand der undefinierten Struktur in der Mitte der Probe wird angenommen, dass es zu Verwerfungen der obersten Glaslage kam (Pfeil). Das verringert die Aufnahme von Spannungen bei einer Belastung und wirkt sich negativ auf das E-Modul aus.

Auffallend ist, dass der Schlauchliner einseitig ein geringeres E-Modul aufwies. Die Probekörper mit einem geringen E-Modul weisen auch eine höhere Wanddicke auf (siehe Bild 7.8). Durch eine oberflächige Reinharzschicht werden die Verbundwanddicken der Proben 3 und 7 zu dick bestimmt und das E-Modul fällt zu gering aus.

7.2.4. Auswertung des Versuches 5

Im Versuch 5 wurde ein Synthesefaserliner des Produktes A mit der Nennweite DN 225 untersucht (Bild 7.10).

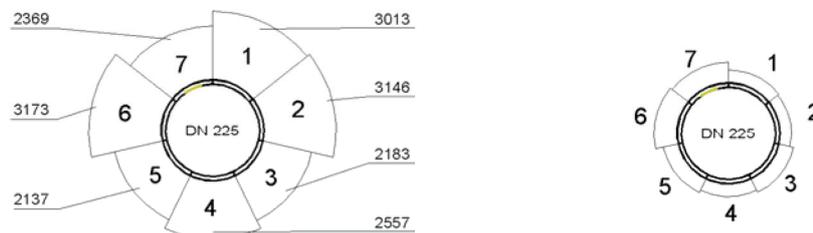


Bild 7.10. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 5

Es wurde in der Scheiteldruckprüfung ein E-Modul von 3752 N/mm² erreicht. In dem Dreipunkt-Biegeversuch wurde ein mittleres E-Modul von 2668 N/mm² ermittelt und zeigte damit eine hohe Abweichung (-28,9 %) gegenüber dem Scheiteldruckversuch. Die Wanddicke wies nahezu gleich große Ergebnisse auf. In dem Bild 7.11 wurden die Feinschnitte von drei Probekörpern abgebildet, die ein geringeres E-Modul erreichten.

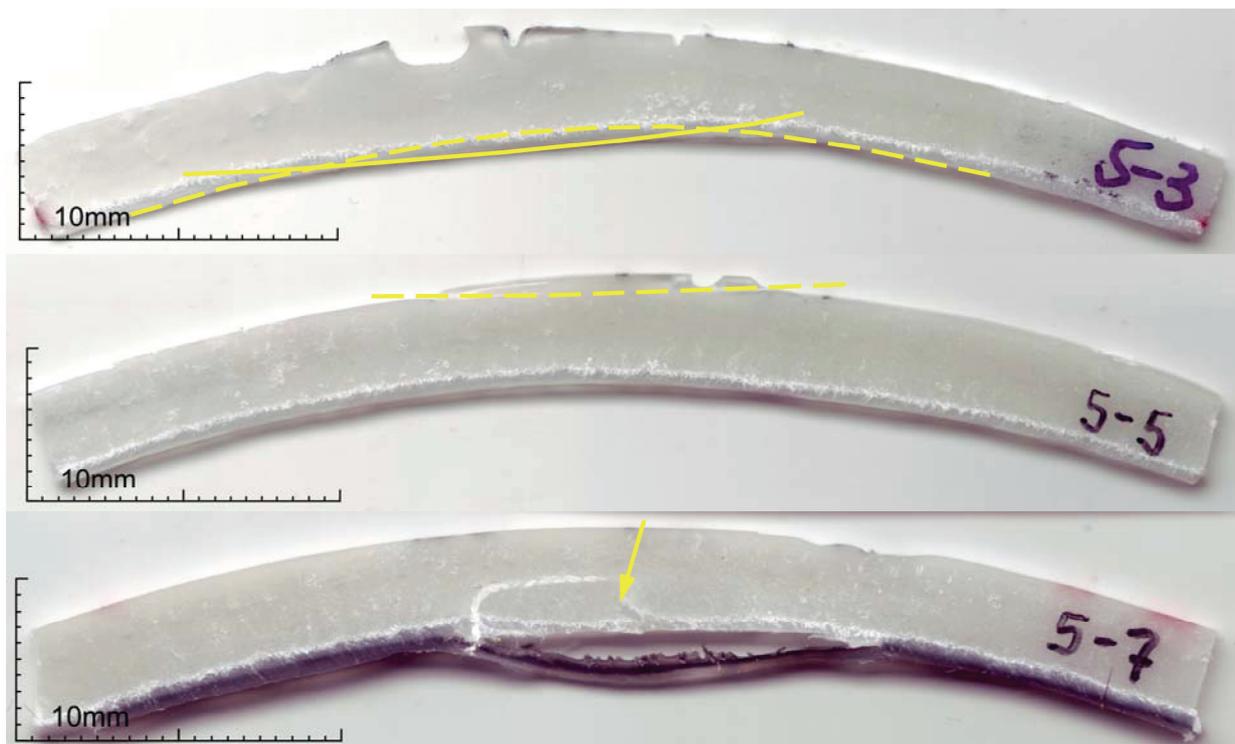


Bild 7.11. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 3, 5 und 7

In dem Feinschnitt der Probe 3 ist der Abdruck eines Thermokabels zu erkennen, das sich zwischen dem Kanal und Schlauchliner befand. Das Kabel wurde bei den vorbereitenden Arbeiten entfernt. Beim Einbau sammelte sich an der Oberfläche um das Kabel herum Reinharz. Auf der Außenseite des gesamten Probekörpers wurde eine ausgeprägte Faltenbildung festgestellt. Das Kabel beult den Liner nach innen ein. An der Unterseite ist dadurch eine Einbeulung von ca. 3 cm Breite zu erkennen. Der rechte Rand der Beule befindet sich im Biegebereich. Hier ändert sich die Krümmung der Probe auf Grund der Beule sprunghaft (siehe Makierungen). Es wird vermutet, dass die Probe an dieser Stelle weniger Widerstand gegenüber einer Belastung bietet als bei einer gleich bleibenden Krümmung.

Bei der visuellen Untersuchung des Feinschnittes wurde festgestellt, dass die Probe 5 in der Mitte dünner ist als an den Rändern. Das wurde durch eine Falte in der Außenfolie ausgelöst. Das Trägermaterial wurde komprimiert und es entstand an der Oberfläche eine unregelmäßige Reinharzschicht. Von der Oberfläche aus wurden tiefer liegende Luftporen festgestellt. Der Probekörper wurde daher in der Verbundwanddicke überbewertet. Beides führt zu einer Unterbewertung des E-Moduls.

In dem Feinschnitt der Probe 7 ist die Innennaht mit innenseitiger Verschweißung abgebildet. Der Faden der Vernähung stört das Gefüge. Bei der Durchführung der Feinschnitte wurde festgestellt, dass der Faden der Vernähung nur wenig Harz aufgenommen hatte und nur bedingt mit der Probe verbunden war (leicht zu entfernen). Daher wirkt der Faden im System schwächend. Die Naht besteht aus zwei Enden, die durch eine Vernähung im ungetränkten Zustand zusammengehalten werden. Das Coating überlappt sich im Nahtbereich, da es durch die Vernähung gegeneinander gedrückt wurde. In diesem Fall (siehe Bild 7.11, untere Probe) wird das Coating nach oben in das System gedrückt. Da das Coating aus einem wesentlich weichen Material (PP-Polypropylen) besteht, gehört es nicht zum statisch tragenden Laminat. Die Verbundwanddicke wird in diesem Fall deutlich verringert. Das wurde bei der E-Modulermittlung nicht berücksichtigt und führt zu einer deutlichen Unterbewertung des E-Moduls.

7.2.5. Auswertung des Versuches 16

In dem Versuch 16 wurde ein Glasfaserliner des Produktes G der Nennweite DN 300 (Bild 7.12) untersucht, der ein E-Modul im Scheiteldruckversuch von 14055 N/mm^2 und im Dreipunkt-Biegeversuch von 12801 N/mm^2 erreichte. Es ergab sich eine Abweichung zwischen im E-Modul von $-8,9 \%$.

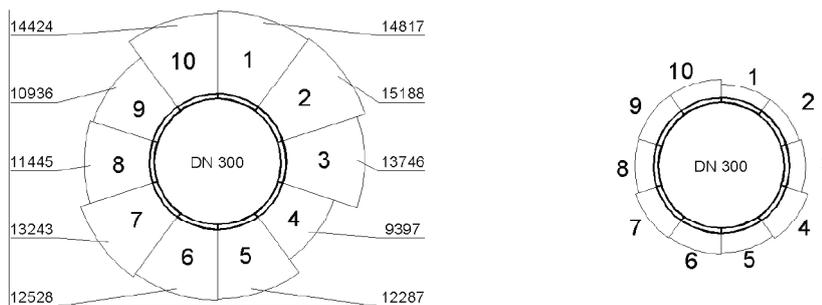


Bild 7.12. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 16

In der E-Modulabbildung ist klar zu erkennen, dass die Probe 4, sowie 8 und 9 ein geringeres E-Modul aufweisen. Die Bereiche mit einem niedrigeren E-Modul liegen in dem Ring gegenüber. Das Produkt G besitzt keine Nähte, die ein Grund für eine schlagartige Veränderung des E-Moduls sein können, wie es in Falle des Produktes E (Abs. 7.2.3 Versuch 4) ist. Die Probe 2 erreichte bei der Untersuchung das höchste E-Modul mit 15188 N/mm^2 , während die Probe 4 mit einem gleichen Wandaufbau den geringsten E-Modul mit 9397 N/mm^2 erreichte. Von beiden Proben wurden Feinschnitte genommen und im Bild 7.13 abgebildet.

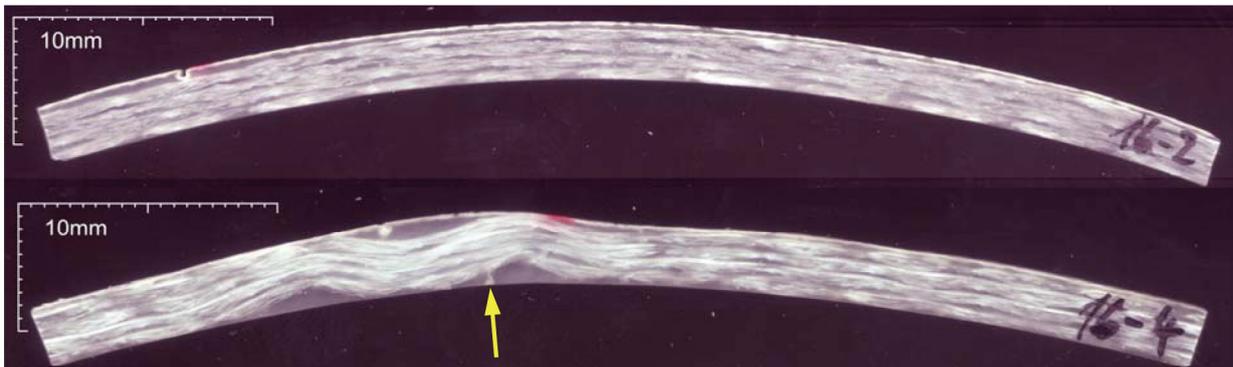


Bild 7.13. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 2 und 4

In der Probe 2 liegen die Fasern dicht übereinander und sind mit einer dünnen Reinharzschicht an der Oberfläche überzogen. Dadurch konnte die Verbundwanddicke eindeutig ermittelt werden.

Die Probe 4 hingegen wies im Biegebereich eine erhebliche Störung auf. Der Liner wurde an der Stelle vermutlich gestaucht. Es kommt zu einer beginnenden Faltenbildung der Glaslagen. Im Zwischenraum zwischen Glas und Außenfolie befindet sich Reinharz. Die verstärkenden Glasfasern liegen somit nicht mehr optimal, um eine Belastung aufzunehmen. Von der unteren Reinharzschicht können die Zugkräfte nicht aufgenommen werden. Das führte zu einem Riss in der Reinharzschicht (Bild 7.13).

Es wurden ebenso von der Probe 7 und 9 Feinschnitte zur optischen Untersuchung gemacht und im Bild 7.14 abgebildet.

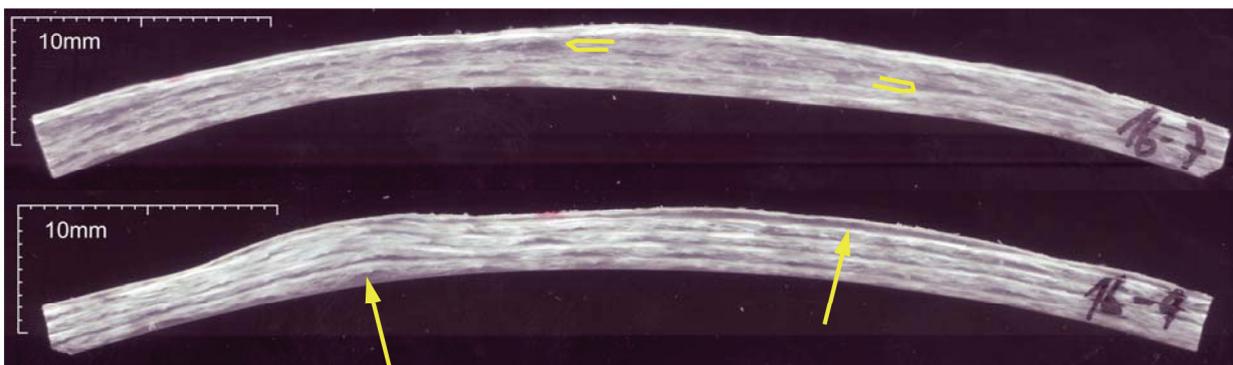


Bild 7.14. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 7 und 9

Beide Proben zeigen im Biegebereich eine Wanddickenänderungen. Bei der Probe 7 ist in der Mitte eine Veränderung der Verbundwanddicke zu erkennen. In diesem Bereich überlappen sich die dritte und vierte Glaslage, die jeweils nach rechts und links wieder enden (Bild 7.14

oben, Markierungen). Die Lagen liegen dicht aneinander, daher hatte diese Art der Wanddickenänderung keinen negativen Einfluss auf das E-Modul.

Hingegen wird bei der Probe 9 erst im Feinschnitt erkennbar, dass die Erhebung durch eine Reinharzschicht verursacht wird. Auf der linken Seite der Probe ist der Beginn einer Faltenausbildung der Glaslage zu erkennen, ähnlich wie in der Probe 4. Die Faltenbildung der Glaslagen und die sich auf der Oberfläche befindende Reinharzschicht führen zu einer zu dick ermittelten Verbundwanddicke. Dadurch wird in dem Dreipunkt-Biegeversuch ein niedriges E-Modul ermittelt.

7.2.6. Auswertung des Versuches 17

Im Versuch 17 wurde ein Glasfaserschlauchliner des Produktes E mit der Nennweite DN 300 untersucht. Der Schlauchliner hatte eine Abweichung von -16,6 % zwischen dem Scheiteldruckversuch (11126 N/mm^2) und dem Dreipunkt-Biegeversuch (9282 N/mm^2). In der Abbildung (Bild 7.15) sind zwei Bereiche mit niedrigeren E-Modulen zu erkennen, die sich gegenüberliegen. Auffällig dabei ist, dass die Wanddicken nicht immer mit den E-Modulen korrelieren, jedoch die niedrigen E-Module eine deutlich größere Verbundwanddicke besitzen.

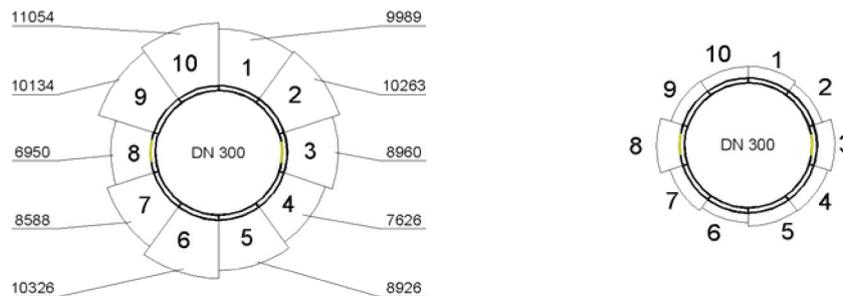


Bild 7.15. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 17

Die Probe 3 (Innennaht) und Probe 8 (Außennaht) liegen sich gegenüber und besitzen ein geringes E-Modul. Die Nähte erreichen ein E-Modul von 8960 N/mm^2 (innen) und 6950 N/mm^2 (außen). In dem Bild 7.16 wurden Feinschnitte von den Proben abgebildet, die die Nahtstellen zeigen.

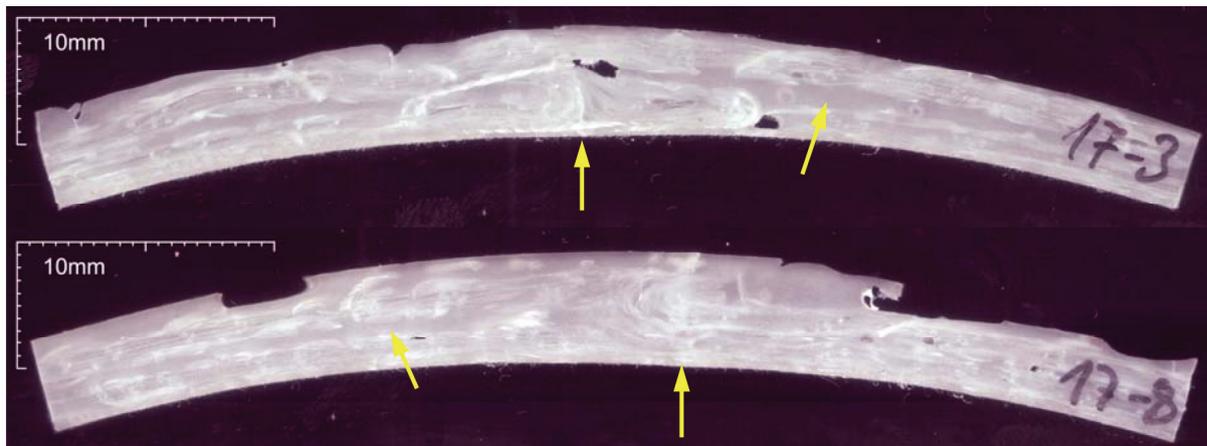


Bild 7.16. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 3 und 8

Die Innennaht (Probe 3) besitzt zwischen den Glaslagen Reinharzschichten. An der Nahtstelle ändert das Gewebe die Ausrichtung. Die Glaslagen liegen in dem Bereich

ungünstig zur Belastung. Bei der mechanischen Prüfung entstand genau an dieser Stelle ein Riss. Im Bereich der Vernähung sind Schwächungen durch Lufteinschlüsse zu erkennen.

Die Außennaht (Probe 8) besitzt eine ausgeprägte Oberflächentopografie, die durch eine Faltenbildung der Außenfolie und Lufteinschlüsse in der oberflächigen Reinharzschicht entstanden sind. Auf der linken Seite der Probe ist eine Reinharzschicht zwischen den Lagen zu erkennen. Genauso wie in Probe 3 ist eine Richtungsänderung der Glaslagen im Nahtbereich zu erkennen. An dieser Stelle entstand bei der E-Moduluntersuchung ebenfalls ein Riss. Durch die Richtungsänderung der Glaslagen wird die Spannung nur noch von der Harzmatrix und nicht von den Glasfasern aufgenommen. Dadurch entfällt in dieser Zone die Verstärkung. Es wird angenommen, dass auch bei diesem Produkt die Vernähung die Ursache für die Verwerfungen der Glaslage ist. Diese Verwerfung erhöht die Verbundwanddicke der Probe. Durch die ungünstige Ausrichtung der Glaslage war die Probe nur gering-fügig in der Lage, eine Belastung aufzunehmen. Das führt zu einem geringeren E-Modul.

Die Feinschnitte im Bild 7.17 zeigen die Probe 4 mit einem niedrigen E-Modul und die Probe 10 mit dem höchsten E-Modul in dem Dreipunkt-Biegeversuch.

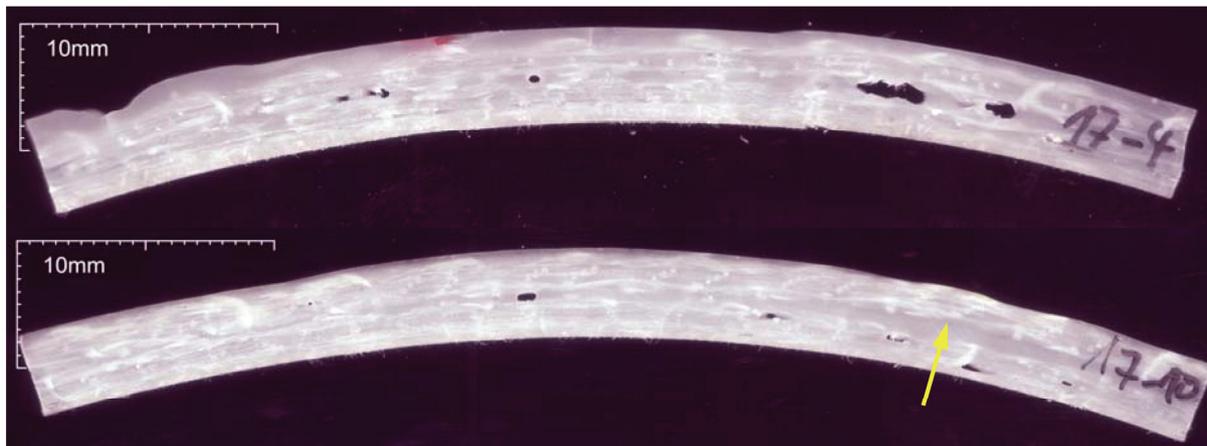


Bild 7.17. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 4 und 10

Die Probe 4 hatte nach der Naht das niedrigste E-Modul (7626 N/mm^2). Das lag daran, dass die Verbundwanddicke der Probe durch eine Reinharzschicht an der Oberfläche zu dick ermittelt wurde. Weiterhin befinden sich Luftporen zwischen den Glaslagen. Die umliegenden Proben 3 und 5 besaßen vergleichbare Luftporen, was ebenfalls zu einer Unterbewertung des E-Moduls führt.

Die Probe 10 zeigte das höchste E-Modul des Schlauchliners und dient als Vergleich zu den Proben mit geringerem E-Modul. Die obere Reinharzschicht ist nur sehr dünn und nur teilweise vorhanden, so dass die Glaslagen nahe der Oberfläche liegen. Auf der rechten Seite ist eine interlaminaire Reinharzschicht zu erkennen. Diese Reinharzschicht befindet sich im Bereich der Spannungsnulllinie und hat daher keinerlei negativen Einfluss auf das E-Modul. Interlaminaire Reinharzschichten können aber zu Scherbrüchen und dadurch zu einem frühzeitigen Versagen führen.

7.2.7. Auswertung des Versuches 6

Der Versuch 6 erfolgt an dem gleichen Produkt (A) wie im vorher beschriebenen Versuch 5, aber mit einem größeren Durchmesser DN 250 (Bild 7.18). Dieser Schlauchliner gehörte zu denen, die eine geringe Abweichung zwischen den beiden E-Modulermittlungen aufwiesen. Der Scheiteldruckversuch ergab einen E-Modul von 3447 N/mm² und der Dreipunkt-Biegeversuch von 3269 N/mm². Die Abweichung zwischen den beiden Versuchen betrug -5,2 %.

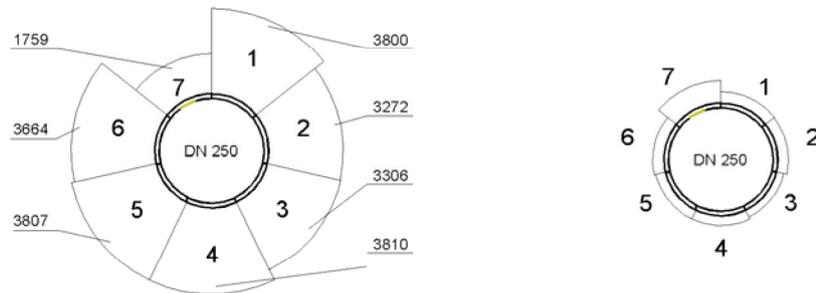


Bild 7.18. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 6

Die E-Module und die Wanddicken korrelieren miteinander. Die Probe 7 besaß ein niedrigeres E-Modul bei einer deutlich größeren Wanddicke. Die Proben 2 und 3 hingegen besaßen unterschiedliche Wanddicken, hatten jedoch ein geringeres E-Modul als die umliegenden Proben. Für die visuelle Untersuchung wurden Feinschnitte von den Proben entnommen und in Bild 7.19 abgebildet.

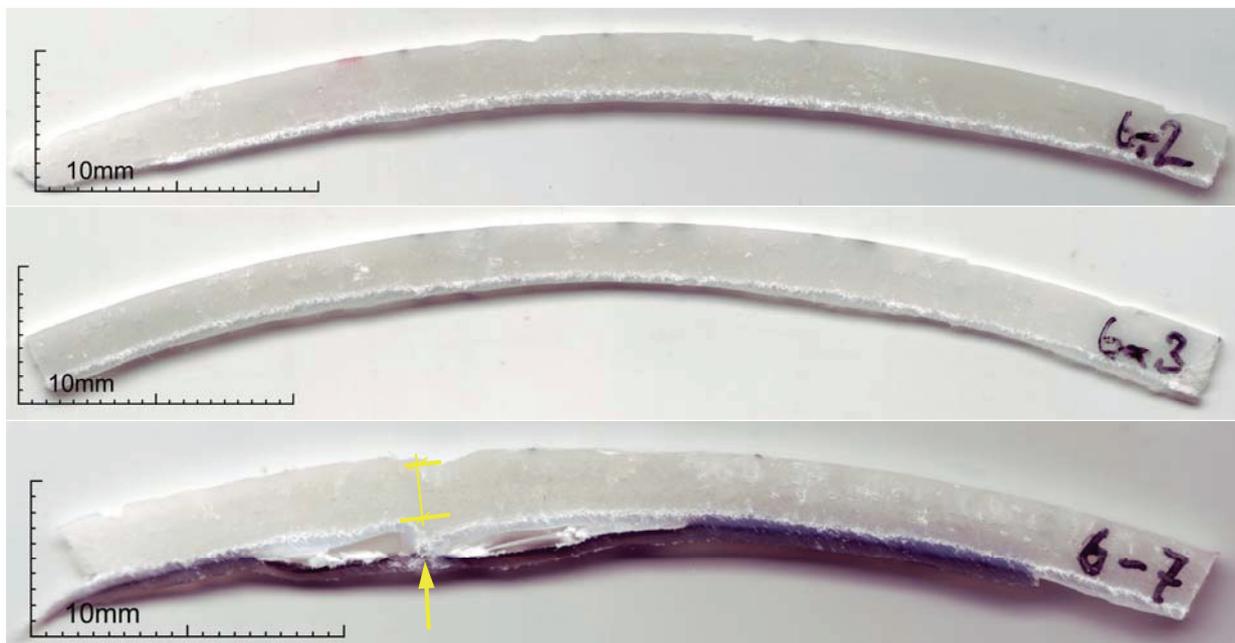


Bild 7.19. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 2, 3 und 7

Die Proben 2 und 3 hatten ein um ca. 13 % niedrigeres E-Modul als die umliegenden Proben, die im Durchschnitt ein E-Modul von ca. 3800 N/mm² besaß. Ursache dafür sind Luftporen in den Proben. Je dünner die Probe ist, umso größer wird der negative Einfluss der Poren auf das E-Modul.

In der Probe 7 befand sich die Innennaht mit innenseitiger Verschweißung (Schutzband). Die Vernähung presste die Enden zusammen und drückte die Innenfolie in den Innenraum

des Rohres. Dadurch wurde die Probe im Nahtbereich dicker. Die Außenfolie besaß an einer Stelle eine Verschweißung, die direkt über der Naht lag und den Liner eindrückte. Diese ungünstige Kombination verringerte die Verbundwanddicke auf ca. 3,7 mm, im Vergleich der ursprünglich ermittelten Verbundwanddicke von ca. 5,3 mm.

7.2.8. Auswertung des Versuches 19

Der Versuch 19 an dem Produkt H (Glasfaserliner) mit dem Durchmesser DN 400 ergab eine Abweichung zwischen den beiden Versuchen von -4,1 %. Die erbrachten E-Module und die Verbundwanddicken in der dritten Potenz wurden im Bild 7.20 über dem Ring aufgetragen.

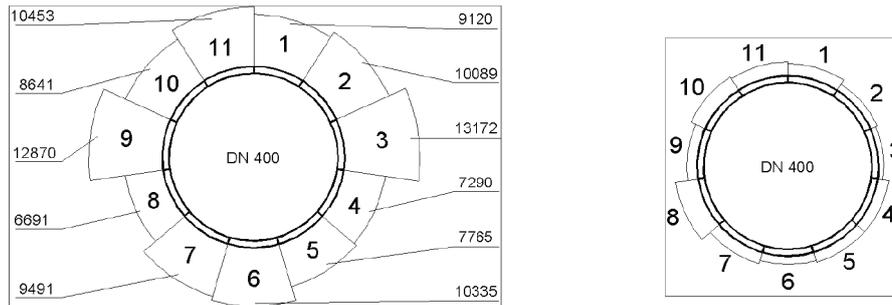


Bild 7.20. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 19

Das Produkt besaß keine Nähte. Jedoch wurden starke Schwankungen in den Verbundwand-dicken festgestellt. Die Verbundwanddicken korrelierten mit den E-Modulen aus dem Dreipunkt-Biegeversuch sehr gut. Dabei erzielten dünne Proben hohe E-Module und umgekehrt.

Der gesamte Schlauchliner war zwischen der Außenfolie und dem faserverstärkten Laminat mit einer unterschiedlich dicken Reinharzschicht überzogen. In dieser Reinharzschicht befanden sich große Lufteinschlüsse. Um den Schlauchliner visuell zu untersuchen, wurden von den Proben Feinschnitte entnommen. Die Proben 4, 5 und 8 erreichten die geringsten E-Module. Die Feinschnitte werden in der nächsten Abbildung (Bild 7.21) gezeigt.

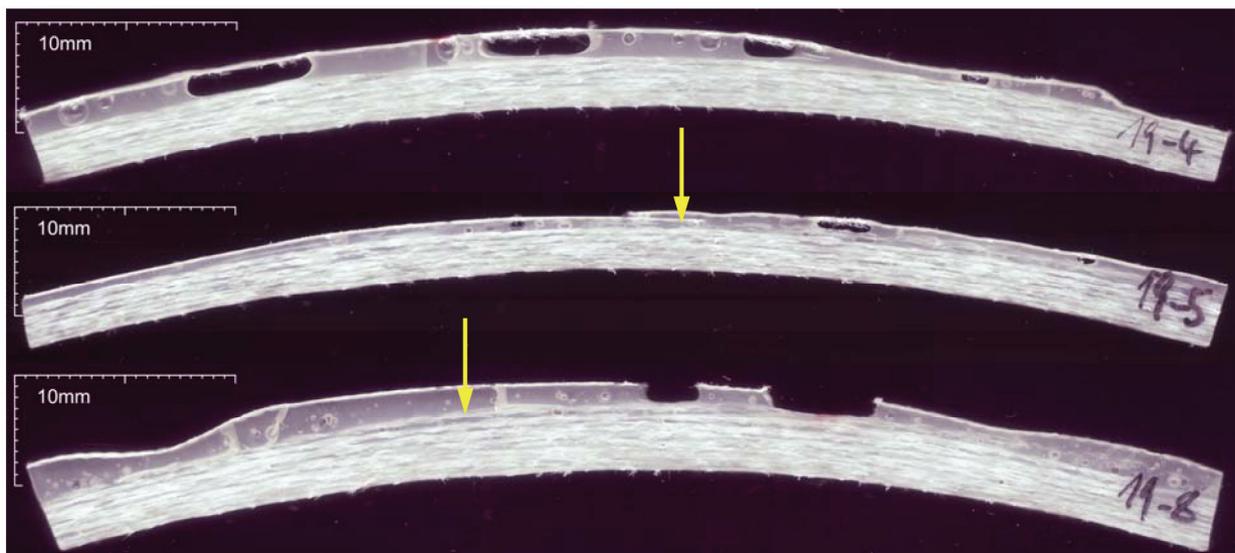


Bild 7.21. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 4, 5 und 8

Auf der Probe 4 befindet sich eine Reinharzschicht mit Lufteinschlüssen, die zur rechten Seite hin abnehmend sind. Die Glaslagen liegen dicht beieinander und besitzen keinerlei

Störungen. Durch die Reinharzschicht wurde die Verbundwanddicke der Probe als zu dick bemessen und das E-Modul fiel daher zu niedrig aus.

Auf der Probe 5 ist in der Mitte der Probe ein Überlappungsbereich der Außenfolien zu erkennen, der diagonal über der Oberfläche der Probe verläuft. Dieser Überlappungsbereich, in denen zwei Außenfolien übereinander liegen (siehe Pfeil), erschwert die Ermittlung der Verbundwanddicke. Zwischen den Folien und zum Liner sammelt sich Reinharz an. Erst im Feinschnitt können die Folien von dem statisch tragenden Laminat unterschieden werden.

Probe 8 wies die größte Verbundwanddicke auf. Bei der visuellen Untersuchung des Feinschnittes wurde festgestellt, dass die obere Glaslage durch das überschüssige Harz angehoben wurde. Die ausgeprägte Oberflächentopografie führt zu einer Fehleinschätzung der Verbundwanddicke und dadurch fiel das E-Modul zu gering aus.

Die Probe 3 war die dünnste Probe des Schlauchliners und erreichte auch das größte E-Modul. Es wurde von dieser Probe ebenfalls ein Feinschnitt entnommen und abgebildet (Bild 7.22).

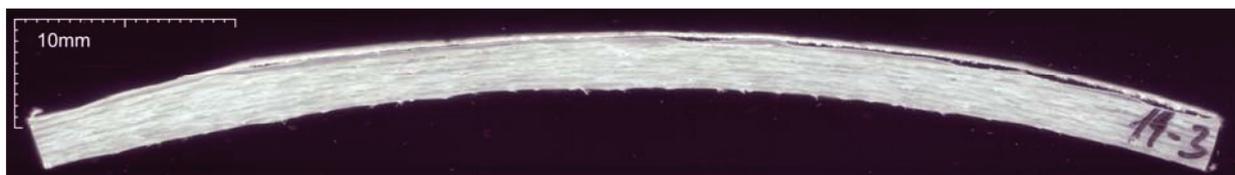


Bild 7.22. Aufnahme des Feinschnittes der Probe 3

Auf der Oberfläche der Probe befand sich, im Gegensatz zu den anderen Proben, eine sehr dünne Reinharzschicht. Daher wurde die Verbundwanddicke ohne Abzug der Reinharzschicht ermittelt. Anhand der Feinschnitte ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die anderen Proben ein ähnliches E-Modul erreichen könnten, da der Aufbau des Laminats über den Ring gleich ist und nur die oberflächige Reinharzschicht die Verbundwanddicken beeinflusst. Die Reinharzschicht hatte einen großen Einfluss auf das E-Modul in dem Dreipunkt-Biegeversuch, da diese die Ermittlung der Verbundwanddicke für die einzelnen Proben stark schwanken ließ.

7.2.9. Auswertung des Versuches 24

In dem Versuch 24 wurde das Produkt D mit dem Durchmesser DN 600 untersucht. Auf dem Bild 7.23 wurden die E-Module und Verbundwanddicken über dem Ring aufgetragen.

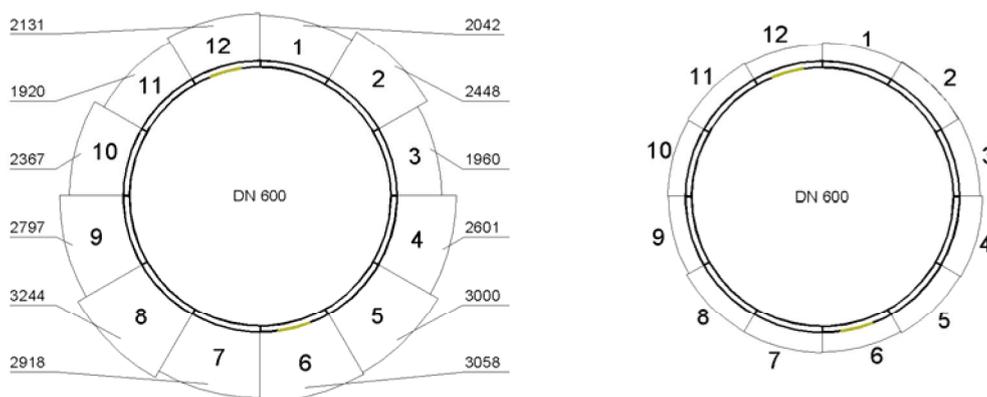


Bild 7.23. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 24

Dieser Schlauchliner erreichte in dem Scheiteldruckversuch ein E-Modul von 2647 N/mm² und in dem Dreipunkt-Biegeversuch von 2540 N/mm². Die Abweichung zwischen den beiden Versuchen liegt bei -4,0 %.

Dieser Schlauchliner ist ein sehr positives Beispiel für eine gleichmäßig verteilte Verbundwanddicke, obwohl das Produkt eine Innen- und Außennaht besaß. Das E-Modul war in dem Ring einseitig niedrig ausgefallen. Es wurden Feinschnitte von den Proben 2, 8, 11 und 12 entnommen (Bild 7.24).

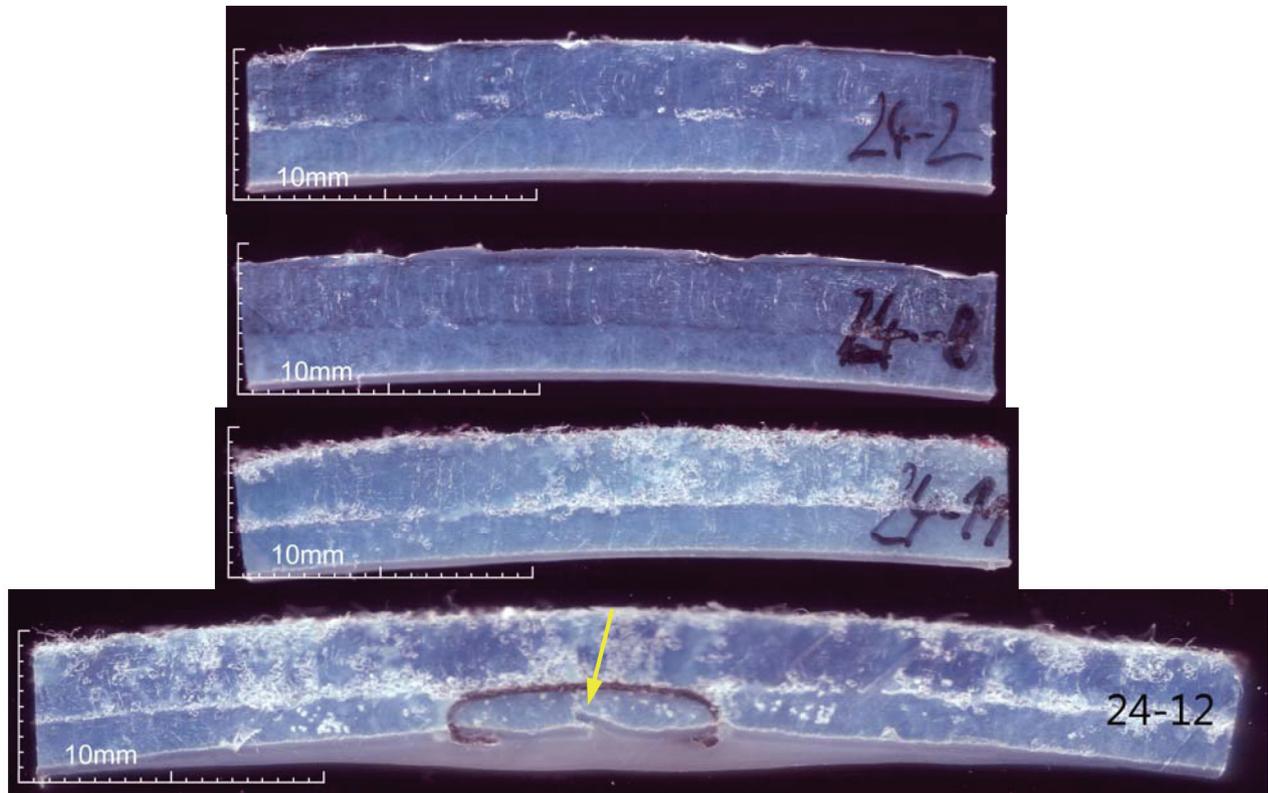


Bild 7.24. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 2, 8, 11 und 12

Die Feinschnitte des Versuchs 24 waren Abschnitte aus den Probekörpern, da diese zu groß für die Feinsäge waren.

Ab der Probe 10 (im Uhrzeigersinn) bis zur Probe 3 war die Oberfläche filzig, d.h. dass das Trägermaterial ohne Harz an der Oberfläche zu erkennen war. Der Schlauchliner besaß an dieser Stelle ein Tränkungsdefizit. Zwischen den Lagen verteilten sich horizontal Luftporen, die über den ganzen Ring lokal auftraten.

Die Probe 2 besaß die gleiche Verbundwanddicke wie die umliegenden Proben, schnitt jedoch besser im E-Modul ab. Diese Probe war im Biegebereich lokal gut mit Harz getränkt. Die Ränder der Probe wiesen eine filzige Oberfläche auf. Es ist davon auszugehen, dass Imperfektionen im Biegebereich (mittleren Drittel der Probe) einen größeren Einfluss auf das E-Modul haben als in den Randbereichen.

Die Probe 8 wies das höchste E-Modul mit 3244 N/mm² auf. Die Oberfläche wies eine leichte Faltenbildung in der Außenfolie auf, jedoch keine filzige Oberfläche. Die Lufteinschlüsse zwischen den Lagen waren bei dieser Probe am seltensten und die damit negativen Einflüsse durch Luftporen bei dieser Probe am geringsten. Deshalb erreichte diese Probe das höchste E-Modul.

Das niedrigste E-Modul erreichte die Probe 11. Die Oberfläche war an dieser Probe durchgehend filzig. In dem Feinschnitt der Probe ist zu erkennen, dass die oberste Lage von Luftporen durchzogen ist. Auch in der unteren Lage befinden sich Luftporen, die von der Unterseite der Probe als helle Stellen zu erkennen sind. Die Poren schwächen das Material, sodass es weniger Widerstand gegenüber einer Verformung aufbringen kann. Demzufolge sinkt das E-Modul.

In dem Feinschnitt der Probe 12 ist die Naht zu sehen. Die Naht überlappt sich und drückt das Coating in die Verbundwanddicke hinein. Da das Coating nicht zur Verbundwanddicke zählt, ist der verengte Bereich der maßgebende. Dadurch ist die Probe zu dick bestimmt. Die Probe besaß ebenso wie Probe 11 Luftporen. Beides gilt als Ursache für das niedrige E-Modul.

Obwohl der Schlauchliner erhebliche Imperfektionen aufwies, lagen die Ergebnisse der beiden Versuche mit einer Abweichung von -4,0 % sehr dicht beieinander. Das ist zurückzuführen auf die relativ gleich bleibende Verbundwanddicke, da keine Reinharzschicht vorhanden ist. Das E-Modul wurde nicht durch eine ausgeprägte Oberflächentopografie beeinflusst. Der Einfluss erfolgt vorrangig durch die Schwächung des Materials durch Luftporen. Da diese nicht nur lokal auftreten, sondern in ihrer Häufigkeit langsam zunehmend und über mehrere Proben wieder abnehmen, versagen keine vereinzelt Proben in den Versuchen mit der Dreipunktbiegung. Der Dreipunkt-Biegeversuch zeigte, dass das Produkt in der Lage ist, ein E-Modul von 3000 N/mm² zu erreichen. Die großflächig verteilte Imperfektion beeinflusste die Proben aus dem Scheiteldruckversuch (2647 N/mm²) genauso stark, wie die einzelnen Probekörper in dem Dreipunkt-Biegeversuch. Deshalb erreichten beide Versuche trotz der Imperfektionen ein ähnliches E-Modul.

7.2.10. Auswertung des Versuches 11

Der Schlauchliner aus dem Versuch 11 des Produkts D erreichte die geringste Abweichung bei den beiden Versuchen. In dem Scheiteldruckversuch wurde ein E-Modul von 3386 N/mm² und in dem Dreipunkt-Biegeversuch eines von 3333 N/mm² erreicht. Damit ergab sich eine Abweichung von - 1,6 % bei den Versuchen.

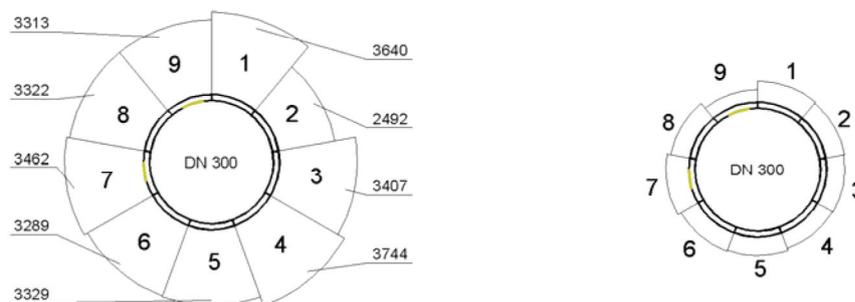


Bild 7.25. Darstellung der E-Module und der Wanddicken von Versuch 11

Der Synthesefaserliner besaß keine Reinharzschicht. Lediglich bei drei Proben kam es zu einer geringen Faltenbildung der Außenfolie. Die Grafik mit den Wanddicken (Bild 7.25) zeigt, dass die Proben eine relativ gleiche Verbundwanddicke besaßen, mit Ausnahme der Probe 9, in der sich die Innennaht befand. Ebenso sind die E-Module relativ gleich über den Ring verteilt, mit der Ausnahme, dass die Probe 2 (2492 N/mm²) deutlich unter den anderen

E-Modulen lag. Von den Proben 2 und 4, sowie Probe 9 wurden Feinschnitte entnommen und hier abgebildet (Bild 7.26).

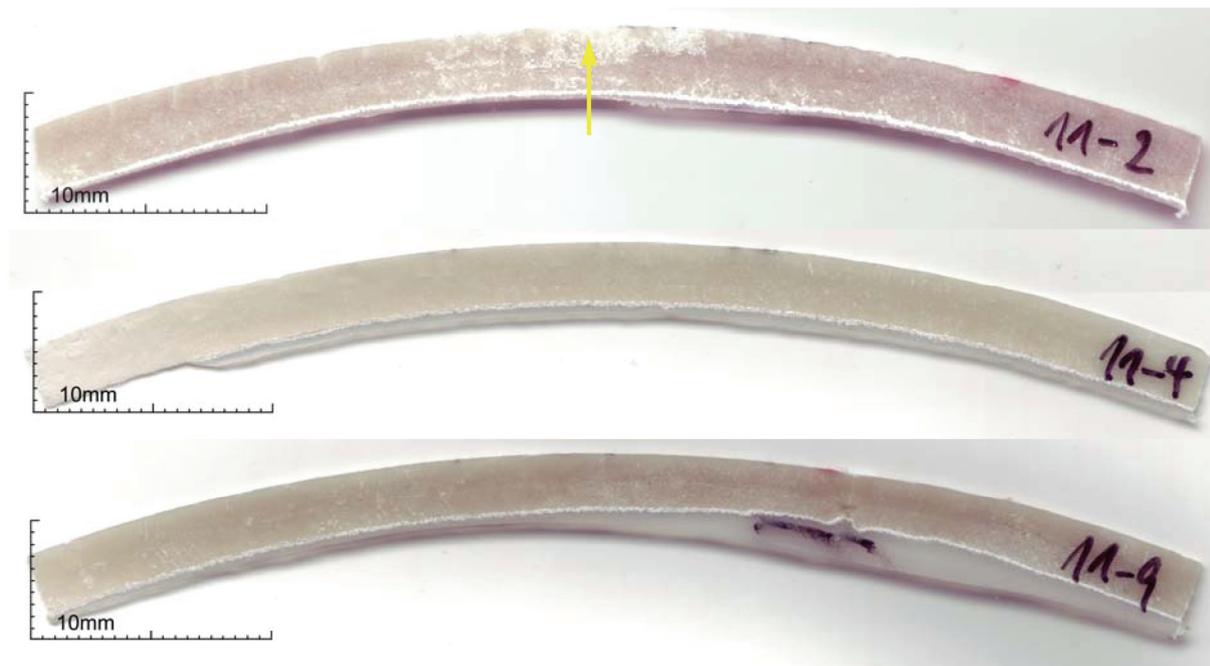


Bild 7.26. Aufnahmen der Feinschnitte der Probe 2, 4 und 9

In der Mitte des Feinschnittes der Probe 2 sind Luftporen zu erkennen, die sich im Biegebereich befinden. Die Schwächung durch Luftporen verlief quer über dem Probekörper und längs des gesamten Rohrabschnittes. Diese Imperfektion hatte somit einen negativen Einfluss auf beide Versuche und führt zu einem geringeren E-Modul.

Der Feinschnitt der Probe 4 zeigt einen störungsfreien Zustand. Es wurden keine Luftporen entdeckt. Die Oberfläche der Probe ist glatt und besitzt eine gleich bleibende Krümmung. Die Verbundwanddicke konnte ohne erschwerende Einflüsse ermittelt werden. Die Probe erreichte das höchste E-Modul des Schlauchliners mit 3744 N/mm^2 .

Die Probe 9 besaß die Innennaht und eine innenseitige Verschweißung. Die Nahtstelle war im Vernähungsbereich dünner als die umliegenden Bereiche. Durch die Vernähung wurden die Enden zusammengedrückt und verschoben sich. Das Coating eines Endes wurde nach oben in die Verbundwanddicke gedrückt. Da sich die Nahtstelle nicht mehr direkt im Biegebereich befand, hatte diese nur noch einen geringen Einfluss auf das E-Modul.

Bei diesem Schlauchliner ist der negative Einfluss auf das E-Modul ausschließlich von den lokal verteilten Poren verursacht worden. Die drei einzelnen Prüfungen in dem Scheiteldruckversuch wichen erheblich von einander ab. In der ersten Prüfung lag das E-Modul bei 3095 N/mm^2 , in der zweiten bei 3421 N/mm^2 und in der dritten bei 3641 N/mm^2 . Die hohe Schwankung (ca. 550 N/mm^2) von der ersten bis zur dritten Prüfung kann dadurch erklärt werden, dass die längs des Liners verlaufende Schwachstelle (Probe 2), durch die Drehung um jeweils 60° nach jeder Prüfung zu einem anderen Einfluss führt. Der Mittelwert des Scheiteldruckversuchs ist daher genauso groß wie der Mittelwert der einzelnen Prüfungen des Dreipunkt-Biegeversuchs.

7.3. Vergleichende Betrachtung der Einzelversuche

Die Absolutwerte der E-Module wurden grafisch in einem Diagramm (Bild 7.27) ansteigend zusammengestellt. Aus der Gegenüberstellung der E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch sind die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den Versuchen gut zu erkennen. Das E-Modul aus dem Dreipunkt-Biegeversuch fällt tendenziell niedriger aus als das aus dem Scheiteldruckversuch. Zur besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Systeme wurden die Abweichungen der E-Module (Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch) im Diagramm (Bild 7.28) normiert dargestellt.

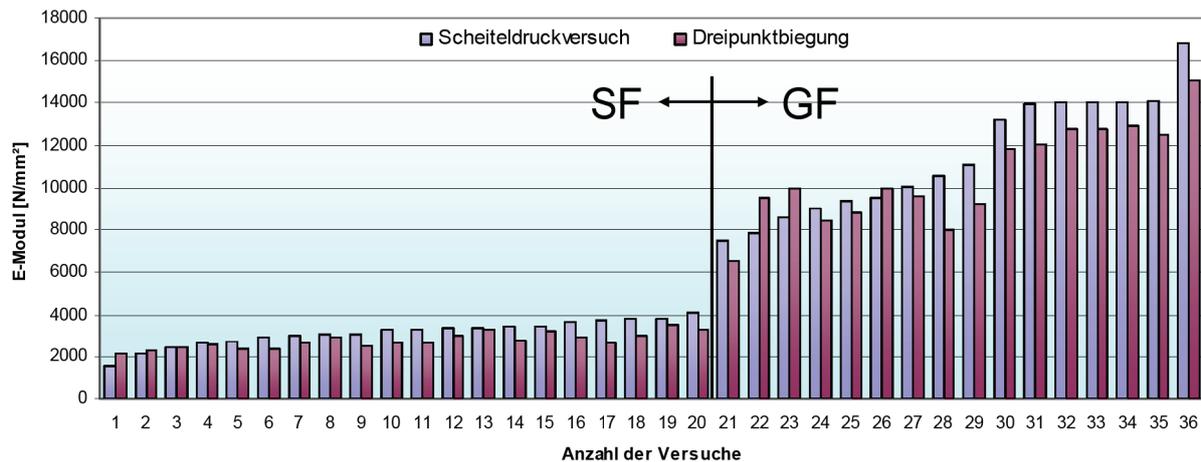


Bild 7.27. Vergleich E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch

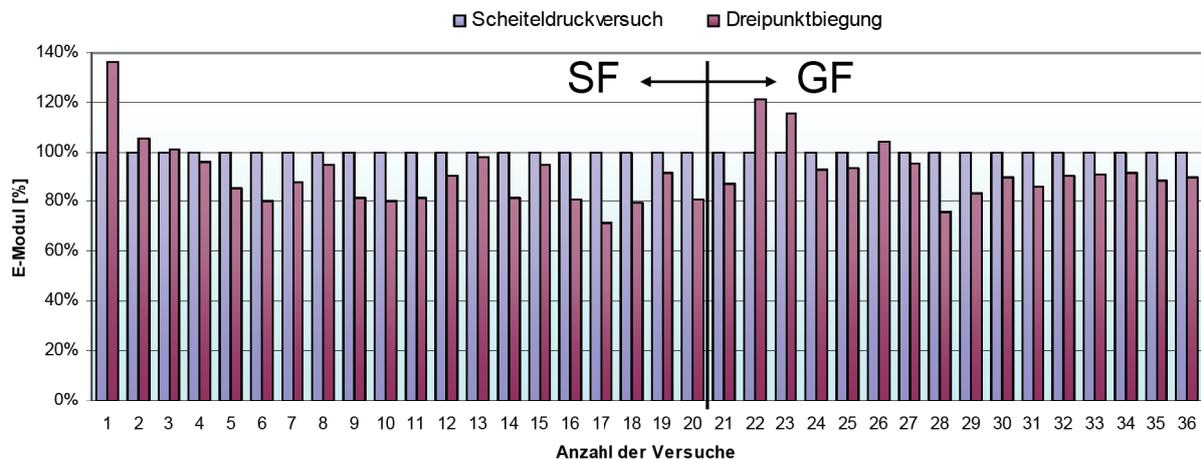


Bild 7.28. Vergleich normierte E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch

Der Vergleich zwischen Synthesefaser- und Glasfasersystemen zeigt, dass beide Systeme tendenziell niedrigere Werte in dem Dreipunkt-Biegeversuch aufweisen als in dem Scheiteldruckversuch. Grundsätzlich sind die Systeme, unabhängig von ihrer Materialzusammensetzung (GFK und SF-UP/EP) bezüglich der Abweichung des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch vergleichbar.

Um das Überhöhungsverhältnis in dem Dreipunkt-Biegeversuch zu gewährleisten, wurde bei kleinen Durchmessern mit großen Wanddicken die Auflagerdistanz verringert. Die Verwendung eines Stützweiten/Dicken-Verhältnisses unter 16 kann zu einer geringen Unterbewertung des Elastizitätsmoduls bei Biegung und Biegefestigkeit führen [4].

Die größte Anzahl der Schlauchliner, die in dieser Arbeit geprüft wurden, hatten die Nennweite DN 300. Der Versuch 1 (DN 150) ist der einzige Versuch dieser Nennweite und hatte die größte Abweichung (+36,2 %) des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch. Später wurde festgestellt, dass die Abweichung auf einem Nahtdefekt zurückzuführen ist (siehe Kapitel 7.2.1), deshalb wurde der Versuch 1 als Ausreißer gewertet.

Die Summe aller gewerteten Versuche aus der Tabelle 6.1 weist eine Abweichung des E-Moduls von -9,7 ($\pm 10,6$) % zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch auf. Die Verteilung der Häufigkeit, die die 36 Schlauchliner in der Abweichung zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch aufweisen, wird in Bild 7.29 gezeigt.

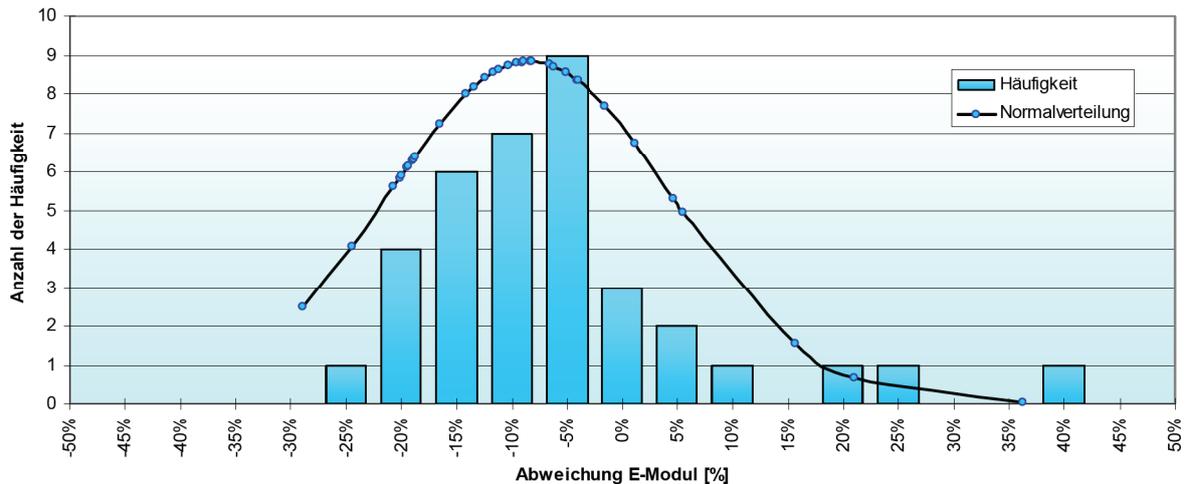


Bild 7.29. Häufigkeit der Abweichung des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch

Durch den Einfluss von Imperfektionen in den Probekörpern und unregelmäßig verteilte Reinharzschichten auf der Oberfläche der Probe kommt es zu einer tendenziellen Verschiebung der Verteilung.

7.4. Auswertung nach Unterteilung in Gruppen

Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse sicherzustellen, wurden Unterteilungen nach Material sowie Produkt und Durchmesser vorgenommen.

7.4.1. Unterteilung nach Trägermaterial

In der ersten Unterteilung wurden die Schlauchliner in die zwei Gruppen, der Synthefaser- und Glasfaserliner unterteilt. Die unterschiedlichen Matrixsysteme (ungesättigte Polyesterharze oder Epoxidharz) wurden dabei nicht berücksichtigt.

Die Synthefaserliner wurden in der Tabelle 6.3 (Kapitel - Ergebnisse) zusammengefasst und erreichten eine mittlere Abweichung von -12,5 ($\pm 9,2$) % des E-Moduls, während die Verbundwanddicke im Mittel um +1,3 ($\pm 3,3$) % abwich. Im Gegensatz zu der Gesamtstatistik (-9,7 ($\pm 10,6$) %) fällt die mittlere Abweichung des E-Moduls größerer aus. Ursache für die Abweichung der E-Module zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch bei Synthefaserlinern waren hauptsächlich Imperfektionen wie Tränkungsdefizit oder Luftporen in den Probekörpern. Die Untersuchung mit „schmalen Ringen“ hatte eine

wesentliche Annäherung an die Messergebnisse der E-Module des Dreipunkt-Biegeversuchs zur Folge (-0,7 ($\pm 10,5$) %).

Die Glasfaserliner wurden in der Tabelle 6.4 zusammengestellt und hatten eine mittlere Abweichung des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch von -6,3 ($\pm 11,4$) %. Die Abweichung war gegenüber der Gesamtstatistik (-9,7 ($\pm 10,6$) %) geringer. Die Verbundwanddicke der Glasfaserliner war deutlich homogener ausgeprägt als die der Synthefaserliner. Die Lamine wiesen eine gute Verdichtung auf, Poren und Luftporen wurden nur in einzelnen Proben gefunden. Die Inhomogenität der Glasfaserliner wurde primär durch Reinharzschichten und Faltenbildungen verursacht, die sowohl in dem Dreipunkt-Biegeversuch als auch im Scheiteldruckversuch das E-Modul beeinflusste. Grundsätzlich jedoch führten bei den Glasfaserlinern lokal über die Probenbreite sich erstreckende Reinharzschichten zu den Abweichungen der E-Module zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch. Die Reinharzschicht erschwert die sichere Ermittlung der Verbundwanddicke und kann zu einer Fehlbewertung führen. Die E-Module der „schmalen Ringe“ verglichen mit den E-Modulen aus dem Dreipunkt-Biegeversuch hatten ebenfalls eine geringere Abweichung -1,8 ($\pm 9,0$) % voneinander.

7.4.2. Unterteilung nach Produkt und Durchmesser

In der zweiten Unterteilung wurden die Schlauchliner nach Produkt und deren Durchmesser geordnet. Die Tabelle 7.1 fasst die Gruppen mit den mittleren Abweichungen und der Standardabweichung im E-Modul zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch zusammen.

Tabelle 7.1. Vergleich Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch, unterteilt nach Gruppen

Produkt	DN	Abweichung E-Modul [%]
A	250	-8,5 ($\pm 4,6$)%
A	300	-14,6 ($\pm 7,0$)%
B	300	-17,7 ($\pm 3,1$)%
B	600	-19,3 ($\pm 0,7$)%
C	300	-10,2 ($\pm 9,7$)%
D	200	-12,3 ($\pm 10,1$)%
D	600	+0,6 ($\pm 7,0$)%
E	300	-11,7 ($\pm 3,4$)%
E	400	+0,7 ($\pm 16,6$)%
F	300	-10,3 ($\pm 0,0$)%
G*	300	-8,9 %
H*	400	-4,1 %

*Einzelproben

Aus der Unterteilung nach Produkten und Durchmessern ist zu entnehmen, dass die Größe der Abweichung zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch produktabhängig ist. Bestätigt sich aufgrund der Charakteristika des Produktes die Abweichung, ist zu empfehlen, diese in der Zulassung mit aufzunehmen.

7.5. Schmale Ringe

Um den Einfluss der Bauteile in dem Scheiteldruckversuch zu untersuchen, wurden von den normativ geprüften Rohrabschnitten „schmale Ringe“ entnommen und vergleichsweise in Anlehnung der DIN EN 1228 im Scheiteldruckversuch geprüft.

Lokale Imperfektionen treten unregelmäßig über den Schlauchliner auf und sind üblicherweise 5 - 15 cm groß. Bei einem breiten Bauteil (300 mm) werden die lokalen Imperfektionen über das Bauteil aufgefangen und der Einfluss auf das E-Modul ist daher vergleichsweise gering. Aufgrund der geringeren Bauteilbreite (50 mm) wiesen die „schmalen Ringe“ bei lokal auftretenden Imperfektionen ein geringeres E-Modul (- 7,2 %) auf als die breiten Bauteile.

Die Bauteilbreite der „schmalen Ringe“ wurde auf 50 mm festgelegt, da es der Probenbreite der Probekörper aus dem Dreipunkt-Biegeversuch entspricht. Da die Probekörper für die Dreipunktbiegung später dem „schmalen Ring“ in Umfangsrichtung entnommen werden, ist der Einfluss von Imperfektionen gleich groß. Durch derselben Entnahmestelle und der gleichen Probenbreite ergibt sich in dem Vergleich der E-Module (Scheiteldruckversuch „schmale Ringe“ und Dreipunkt-Biegeversuch) eine geringere Abweichung von -1,4 ($\pm 9,9$)%.

Bei den Synthefaserlinern erreichten die „schmalen Ringe“ eine Annäherung -0,7 ($\pm 10,5$) % zum Dreipunkt-Biegeversuch. Die Abweichung wurde dadurch um ca. 10 % korrigiert. Bei den Glasfaserlinern wurde die Abweichung auf -1,8 ($\pm 9,0$) % reduziert.

Durch die „schmalen Ringe“ werden Imperfektionen in die E-Modulermittlung mit erfasst. Die Umfangs-E-Module der „schmalen Ringe“ sind daher den Biege-E-Modulen aus dem Dreipunkt-Biegeversuch näher. Imperfektionen in normativen Rohrabschnitten haben einen geringeren Einfluss auf das E-Modul.

7.6. Nahtbereiche

Da die Nahtbereiche der gleichen Belastungen im Bauteil ausgesetzt sind wie dem restlichen Trägermaterial, sollten diese auch das gleiche E-Modul erreichen [20]. Probekörper mit Nahtbereich weisen durch Vernähungen, Überlappungen oder Verwerfungen der Lagen eine Verdickung der Verbundwanddicke auf, die oft mehr als 10% von der mittleren Verbundwanddicke abweichen und daher nach den gültigen Prüfvorschriften [4,19] zu verwerfen sind.

Liner werden unabhängig von ihre Dicke und System durch unterschiedlicher Lagenaufbau mit Überlappungen- und Nahtbereichen hergestellt. Die Hersteller achten darauf, dass die Nahtbereiche versetzt im Schlauchliner angeordnet sind. Bei der Probenentnahme für den Dreipunkt-Biegeversuch wurde darauf geachtet, dass sowohl die innere Lage mit Nahtbereich, als auch die äußere Lage mit Nahtbereich berücksichtigt wurde, um an diesen Probekörpern das E-Modul zu ermitteln (Bild 7.30).

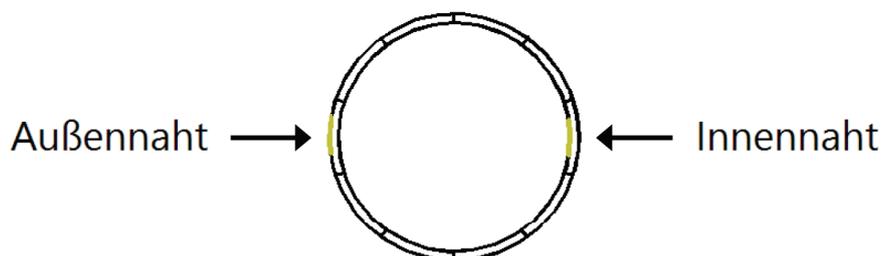


Bild 7.30. Schematische Darstellung der Berücksichtigung von Nahtbereichen bei der Probenentnahme

In der Tabelle 7.2 wurden die Abweichungen der E-Module der Probekörper mit Nahtbereich vom mittleren E-Modul des jeweiligen Schlauchliners aus dem Dreipunkt-Biegeversuch zusammengefasst. Die Probekörper mit Nahtbereich fielen im Durchschnitt (-11,4 %) geringer im E-Modul aus als vergleichbare Probekörper ohne Naht. Es wurde zwischen Innennaht (-17,0 %) und Außennaht (-4,3 %) unterschieden.

Das mittlere E-Modul aus dem Dreipunkt-Biegeversuch wurde anschließend neu berechnet, indem die E-Module der Probekörper mit Nahtbereich vernachlässigt wurden. An Hand von Symbolen wurde verdeutlicht, wie das neue E-Modul des Dreipunkt-Biegeversuchs sich zum Scheiteldruckversuch verhält. Das Dreieck nach oben bedeutet eine Verbesserung und das Dreieck nach unten eine Verschlechterung der Annäherung der E-Module. Bei einer nur geringfügigen Veränderung wurden die Dreiecke nur angedeutet. Schlauchliner ohne Veränderung erhielten einen Punkt.

Tabelle 7.2. Auswirkungen der Nahtbereiche auf das E-Modul der Schlauchliner

Versuch Nr.:	DN	Produkt	Abweichung vom mittleren E-Modul		E-Modul neu	Wirkung
			Innennaht	Außennaht		
5	225	A	-15,9%	-	+3,1%	▲
6	250	A	-47,0%	-	+7,8%	▲
7	250	A	-36,2%	-	+6,0%	▲
8	300	A	-47,3%	+22,7%	+4,1%	▲
9	300	A	-37,5%	+15,9%	+5,6%	▲
25	300	B	+1,5%	+1,1%*	-0,3%	▽
26	300	B	-10,3%	-9,5%*	+2,4%	▲
27	300	B	-2,6%	-3,7%*	+0,8%	△
28	600	B	+15,3%	-11,1%*	+0,6%	△
29	600	B	-6,1%	-19,7%*	+1,0%	△
30	600	B	-8,0%	+18,5%*	-1,2%	▽
1	150	C	-22,8%	-	+2,7%	▼
2	200	C	-13,1%	-	+2,2%	▲
3	200	C	-13,2%	-	+2,2%	▲
10	250	C	-49,4%	-	+5,5%	▼
23	600	C	-28,1%	+20,5%	+0,6%	▽
24	600	C	-16,1%	+20,4%	-0,4%	▽
11	300	D	-0,6%	+3,9%	-0,5%	▽
12	300	D	-7,0%	-4,4%	+1,6%	▲
13	300	D	-10,8%	-3,2%	+2,0%	▲
4	250	E	-20,5%	+7,3%	+2,6%	▲
17	300	E	-3,5%	-21,5%	+3,6%	▲
18	300	E	-14,6%	-26,5%	+5,9%	▲
20	400	E	-20,5%	-19,7%	+4,5%	▼
21	400	E	-17,4%	-5,5%	+2,5%	▼
22	400	E	-26,0%	-3,0%	+3,2%	▼
31	300	E	-15,6%	-4,3%	+2,9%	▲
32	300	E	+3,2%	-26,7%	+5,3%	▲
33	300	E	-15,0%	-21,1%	+4,5%	▲
34	400	E	-19,3%	-15,2%	+3,4%	▲
35	400	E	-22,3%	-7,7%	+1,5%	▲
36	400	E	-15,8%	-14,9%	+3,1%	▲
14	300	F	-	-	+0,0%	●
15	300	F	-	-	+0,0%	●
16	300	G	-	-	+0,0%	●
19	400	H	-	-	+0,0%	●
			-17,0%	-4,3%	+2,5%	△

*Überlappungen

Durch das Vernachlässigen der Nähte, wurden die E-Module im Durchschnitt um 2,5 % gesteigert. Da durch verringerte sich die Abweichung zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch auf $-4,9 (\pm 13,8)$ % gegenüber der Gesamtstatistik mit $-9,7 (\pm 10,6)$ %.

Da in der Praxis die Probenentnahme selten im Nahtbereich erfolgt, werden die Nähte ungenügend auf ihre Qualität überprüft. Es sollte mindestens im Rahmen der Zulassung eine mechanische Überprüfung der Nähte geben, da diese Bereiche eine Schwachstelle im Schlauchliner darstellen.

7.7. Das Durchmesser-Wanddickenverhältnis

Die Formel der DIN EN 13566-4 berücksichtigt die Probenkrümmung und den Einfluss von Biegemoment, Normal- und Querkraft bei einem Verhältnis von Durchmesser zu Wanddicke ≥ 20 [17]. Ebenso ist ein Vergleich der E-Module aus den Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuchen bei Schlauchlinern $\leq DN 500$ nur eingeschränkt möglich [17].

Die Schlauchliner wurden nach einem Durchmesser-Wanddicken-Verhältnis geordnet (Diagramm 7.31) und deren Abweichung im E-Modul zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch gekoppelt. Die Abweichung des Versuches 1 mit $+36,2$ % wurde als Ausreißer gewertet (Nahtdefekt) und rot markiert.

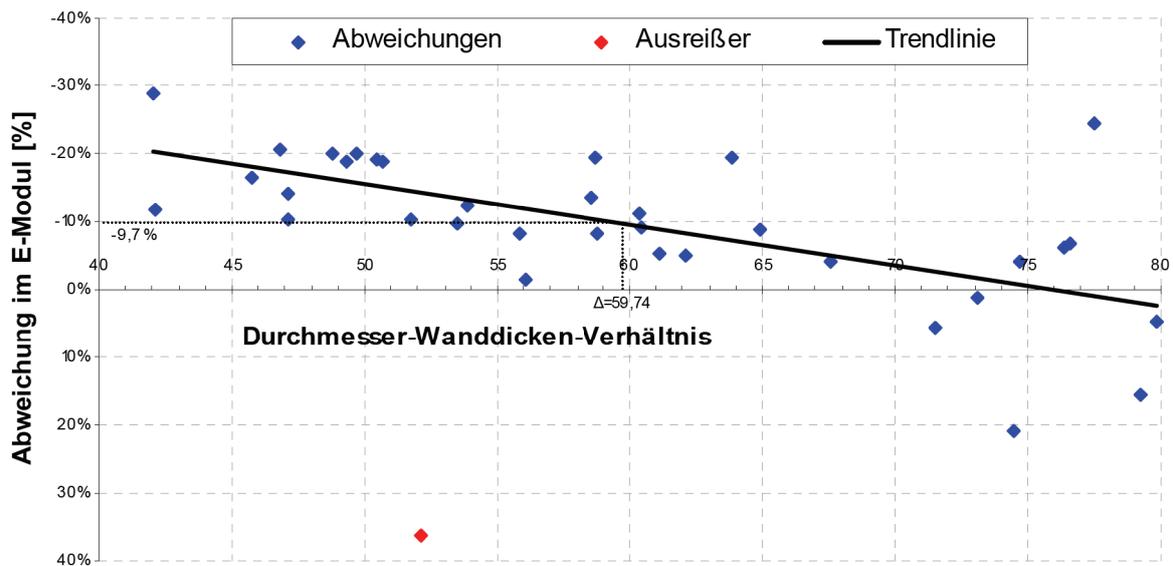


Bild 7.31. Abweichung des E-Moduls in Abhängigkeit des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisses

Anhand des Diagramms 7.31 geht hervor, dass die Abweichungen der E-Module zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch in Abhängigkeit des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnis nahezu linear verteilt sind, deren Tendenz durch eine Trendlinie dargestellt wird. Demnach besitzen Schlauchliner, die im Verhältnis zu ihrem Durchmesser eine dünne Wanddicke aufweisen, eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass die E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch übereinstimmen. Der Mittelwert des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisses (59,74) spiegelt die mittlere Abweichung der Gesamtstatistik von $-9,7$ % wieder (siehe Strichellinie).

In dem nächsten Diagramm 7.32 wurden Ergebnisse nach dem Trägermaterial unterteilt, um deren spezifische Verteilung darzustellen.

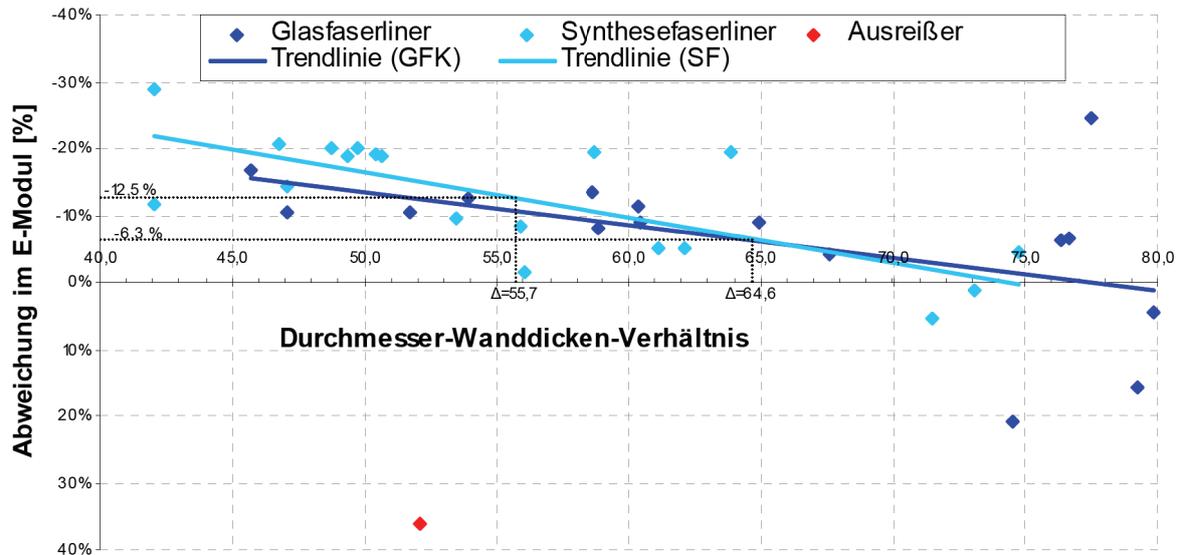


Bild 7.32. Abweichung des E-Moduls von Glasfaser und Synthesefaserlinern in Abhängigkeit des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisses

In dem Diagramm sind die Abweichungen des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch von Glasfaser- und Synthesefaserlinern in Abhängigkeit des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisses dargestellt. Unabhängig vom Trägermaterial ergibt sich eine ähnliche Trendlinie. Schlauchlinern mit einem größeren Durchmesser-Wanddicken-Verhältnis (ca. 75) haben eine bessere Übereinstimmung der E-Module (Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch). In der Tendenz weisen die Synthesefaserliner eine höhere Abweichung der E-Module (Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch) bei einem geringen Durchmesser-Wanddicken-Verhältnis auf als Glasfaserliner mit demselben Verhältnis. Die jeweiligen mittleren Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisse der unterschiedlichen Trägermaterialien spiegeln ebenso die mittlere Abweichung der E-Module wieder (Strichellinien).

Die Trendlinie stellt die ideale Verteilung der Ergebnisse dar. Durch den Einfluss von Imperfektionen und unterschiedlicher Wanddicken in den Versuchen kommt es zu einer Streuung um die Trendlinie des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisses. Unterhalb der jeweiligen Trendlinie (GFK und SF) befinden sich Schlauchliner ohne Imperfektionen und mit einem gut verdichteten Laminat. Im Gegensatz dazu befinden sich oberhalb der jeweiligen Trendlinie Schlauchliner mit erheblichen Imperfektionen bzw. stark ausgeprägten Oberflächentopografien und unterschiedlicher Wanddicken zwischen dem Scheiteldruck- und dem Dreipunkt-Biegeversuch.

Da in dieser Arbeit ein produktabhängiges Verhalten der Abweichungen festgestellt wurde (Kapitel 7.4.2), ist es ebenso zu empfehlen, die Abhängigkeit der Abweichung der E-Module zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch mit dem Durchmesser-Wanddicken-Verhältnis produktspezifisch zu ermitteln.

7.8. Auswertung der Ringspannung

Die einzelnen Schlauchliner mit Ringspannung wiesen keine allgemeine Abhängigkeit in den Abweichungen der E-Module zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch auf. Die Ringspannungen waren sehr gering und nur bei wenigen Schlauchlinern ausgeprägter (Tabelle 6.23). Ein Einfluss der fehlenden inneren Ringspannung auf das E-Modul in den Versuchen der Dreipunktbiegung, in dem das Bauteil sich nach der Durchtrennung entspannt, wurde nicht festgestellt. Die E-Module in den Versuchen der Dreipunktbiegung wurden primär durch lokale Imperfektionen beeinflusst, sodass der Einfluss von inneren Ringspannungen darin unterging. Die inneren Ringspannungen fielen sehr gering aus und hatten keinen maßgeblichen Einfluss auf das E-Modul, sodass diese vernachlässigt werden können.

7.9. Auswertung mit einem Quantilfaktor

Da es sich bei Schlauchlinern um glasfaserverstärkten Bauteile handelt, wurden die ermittelten E-Module der einzelnen Schlauchliner mit einem Quantilfaktor nach DIN 18820-2 „*Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA) - Teil 2: Physikalische Kennwerte der Regellamine*“ [2] untersucht. Synthefaserliner weisen grundsätzlich ein ähnliches Streuverhalten der Messwerte auf, sodass die Norm auch in diesem Punkt anwendbar ist.

Um die Produktstreuung zu berücksichtigen ist das 5%-Quantil unter Annahme einer logarithmierten Normalverteilung und einer 75%igen Aussagewahrscheinlichkeit als charakteristischer Wert zu ermitteln. Nach DIN 18820-2 kann als das 5%-Quantil der 0,8 fache Wert verwendet werden.

Bei der Auswertung der E-Module durch den Quantilfaktor (0,8), fielen lediglich 29 von 454 E-Modulmesswerten unter den abgeminderten Mittelwert des jeweiligen Produktes. Messwerte, die unter den 0,8 fachen Mittelwert fielen, waren 12 Proben mit Nahtbereichen sowie 17 Proben die Störungen aufwiesen wie zum Beispiel lokale konzentrierte Luftporen oder Verwerfungen im Laminat. Anhand der geringen Anzahl der Probekörper die unter den 0,8 fachen Mittelwert fielen, ist zu schließen, dass die Schlauchliner einer normalen Schwankung der Qualität von Bauteilen durch die Produktion und Verarbeitung unterliegen.

Wird der Quantilwert aus der Zulassung als Grenze genommen, erreichten insgesamt 73 Messergebnisse den Quantilwert nicht. 31 von 73 Messergebnissen waren davon lediglich knapp unter dem Quantilwert ($\leq 10\%$) und hätten mit den anderen Probekörpern aus dem Schlauchliner im Mittel den Dreipunkt-Biegeversuch bestanden. Somit erreichten nur vier Schlauchliner in dem Dreipunkt-Biegeversuch nicht den Quantilwert (-14 %, -9 %, -5% und -3 %). Nur der Versuch 1 hatte sowohl im Dreipunkt-Biegeversuch (-9 %) und als auch im Scheiteldruckversuch (-34 %) nicht bestanden. Da die Probekörper im Dreipunkt-Biegeversuch durchschnittlich ca. 18 % über dem Quantilwert der Zulassung liegen, bestätigt das die Auswertung mit den Quantilwert, da dieser den 0,8 fachen Mittelwert darstellt. Im Durchschnitt stimmen die gemessenen Mittelwerte mit den zuvor in der Zulassung ermittelten charakteristischen Mittelwerten (-2 % Abweichung) überein.

7.10. Auswertung bestehender Prüfergebnisse von Baustellen

Ausgehend von bestehenden Prüfergebnissen eines Synthesefaserliner-Herstellers wurden die Abweichungen des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch untersucht. Es ist den Daten zu entnehmen, dass die beiden E-Module (Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch) aus jeweils einer Baumaßnahme ermittelt wurden.

Aus insgesamt 189 Schlauchlinern wurde eine mittlere Abweichung der E-Module von $-14,7 (\pm 12,6)$ % zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch festgestellt. Jedoch zeigen die Messergebnisse erhebliche Abweichungen zwischen den E-Modulen (Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch), mit einem Minimum $-49,8$ % bis zu einem Maximum $+41,3$ %.

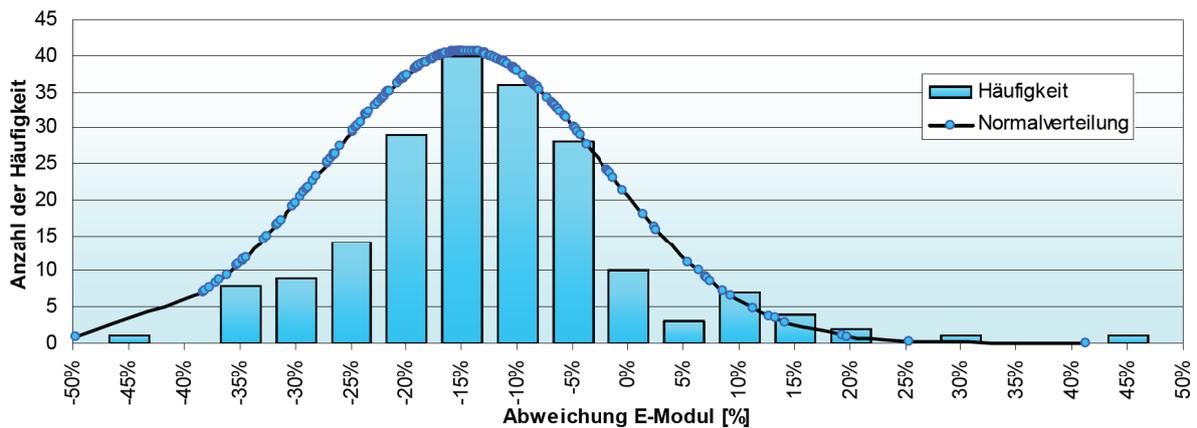


Bild 7.32. Häufigkeit der Abweichung des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch von Baustellenproben

Die Abweichungen der E-Module aus der herstellerunspezifischen Unterteilung nach Synthesefaserlinern ($-12,5 (\pm 9,2)$ %), die in dieser Arbeit gemacht wurde, stehen in guter Näherung zu den mittleren Abweichungen des E-Moduls (Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch) von Baustellenproben des Synthesefaserliner-Herstellers ($-14,7 (\pm 12,6)$ %).

Im Rahmen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass die tendenziell geringeren E-Module aus dem Dreipunkt-Biegeversuch von Imperfektionen in den Probekörpern verursacht wurden, sodass auch hier der Einfluss von Imperfektionen zu einer Verschiebung der Verteilung führt (vergleiche Diagramm 7.29, Abweichungen eigener Versuche). Dieser Effekt wurde produktunabhängig festgestellt.

8. Fehlerbetrachtung

Um zu untersuchen, ob durch systematische Fehler Abweichungen zwischen dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch entstehen, wurde eine Fehlerüberprüfung durchgeführt.

8.1. Messunsicherheit

Beim Messen können Messabweichungen auftreten. Grund dafür sind zufällige und systematische Fehler, die bei der Messung des unbekanntes Ist-Wertes zu einer Abweichung führen. Die Messung wird erschwert, da bei der Probenpräparation die Probe nur hinreichend genau zugeschnitten werden kann. Der Prüfer muss Unregelmäßigkeiten übers Auge erfassen und das Messinstrument dementsprechend anlegen, damit die Messung korrekt erfolgt.

8.2. Bestimmung der Messunsicherheit

Die Messunsicherheit der Messwerte wird als Standardabweichung (Gleichung 13) angegeben. Die Standardabweichung ist die mittlere Abweichung von jeder Einzelmessung und gibt eine Aussage über die Qualität der Messergebnisse. Sie besitzt die gleiche Einheit wie die Messwerte der Beobachtungsreihe. Ist die Standardabweichung sehr gering, ist das Ergebnis von hoher Genauigkeit und kann in der Fehlerbetrachtung als unerheblich eingestuft werden.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (13), \quad \text{mit arithmetische Mittel } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (14)$$

8.2.1. Verbundwanddicke

Falten, Verdickungen und unstrukturierte Reinharzschichten führen zu einer unregelmäßigen Wanddicke des Schlauchliners. Nicht tragende Schichten werden von der Wanddicke rechnerisch abgezogen. Die raue Schnittfläche der Probekörper erlaubt oftmals keine genaue Ermittlung der Verbundwanddicke, da keine klare Trennung zwischen der tragenden und nicht tragenden Schicht zu erkennen ist. Die Ermittlung der Verbundwanddicke liegt deshalb im Ermessensbereich des jeweiligen Prüfers und kann fehlinterpretiert werden.



Bild 8.1. Schematische Darstellung einer Verteilung der Verbundwanddicke über eine Probe

An verschiedenen Probekörpern (Dreipunkt-Biegeversuch) mit unterschiedlichen Oberflächen und Wanddicken wurden Messabweichungen ermittelt. Dazu wurden die Messungen der Verbundwanddicke entlang der Probekörperlänge an 10 Messstellen durchgeführt (Tabelle 8.1).

Tabelle 8.1. Verbundwanddicken von verschiedenen Schlauchlinerproben in [mm]

Probe	n										s	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
glatt (PVC)*	6,91	6,90	6,77	6,75	6,84	6,92	6,94	6,94	6,90	6,81	6,87	0,07
regelmäßig	5,04	5,01	5,06	5,17	5,11	4,73	4,73	4,85	4,65	4,62	4,90	0,20
unregelmäßig	7,36	6,71	7,05	5,73	6,08	7,83	8,17	8,48	8,54	6,56	7,25	0,99
mit abzug	4,97	5,10	5,03	5,27	5,53	5,14	5,36	5,26	5,18	4,85	5,17	0,20
dünn	5,54	5,45	5,65	5,37	5,12	5,04	5,55	5,86	5,94	5,84	5,54	0,30
dick	12,39	12,40	12,66	12,64	12,50	12,59	12,26	12,21	12,40	12,36	12,44	0,15

*Vergleichsprobe

An unterschiedlichen Proben aus dem Schlauchlinerbereich wurde die Standardabweichung ermittelt. Es wurde unter anderen eine Vergleichsprobe aus einem PVC-Rohr mit einer glatten Oberfläche herangezogen, um eine typische Standardabweichung von werkseitig gefertigten Rohren ($s = 0,07$ mm) mit aufzunehmen. Bei einer Schlauchlinerprobe mit einer regelmäßigen Oberfläche wurde eine 3-mal so große Standardabweichung festgestellt. Bei auftretenden Reinharzschichten kann die Standardabweichung sich erheblich vergrößern. Durch den rechnerischen Abzug der Reinharzschicht bei der Ermittlung der Verbundwanddicke ist das Ergebnis extrem abhängig von der Erfahrung des Prüfers (siehe Probe 19-8, Bild 7.21). Insbesondere bei dünnwandigen Proben ist die Standardabweichung groß, da das Verhältnis von Oberflächentopografie zu der Verbundwanddicke ungünstig ist.

8.2.2. Probenbreite in der Dreipunkt-Biegeversuch

Bei der Bestimmung der Breite einer Probe aus dem Dreipunkt-Biegeversuch kommt es ebenfalls zu einer Messabweichung, da die Schnitte nur nahezu parallel und nicht immer senkrecht zur Oberfläche sind (Bild 8.2). Aus der Messung heraus erfolgen ebenfalls Ungenauigkeiten, da das Messinstrument nur relativ parallel zur Oberfläche und die Messpunkte annähernd im rechten Winkel zur Schnittkante sind.

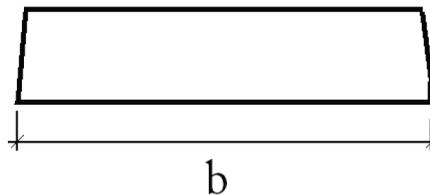


Bild 8.2. Schematische Darstellung der geometrischen Abweichungen der Probenbreite

In der Tabelle 8.2 wurden zwei Proben auf die Messunsicherheit bei der Ermittlung der Probenbreite untersucht. Dazu wurde die Probenbreite an 3 Messstellen längs des Probekörpers nach DIN EN 13566-4 gemessen. In der Mitte der Probe wurde die Breite mit 10 Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die Wiederholungsmessung ergibt die Standardabweichung bei jeder Ermittlung der Probenbreite.

Tabelle 8.2. Ermittelte Messwerte der Breite von zwei Proben in [mm]

Breite	n										s		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
längs	49,44	49,35	49,31									49,37	0,07
Wiederhl.	49,28	49,26	49,31	49,32	49,30	49,26	49,32	49,28	49,28	49,32		49,29	0,02
längs	49,82	49,72	49,63									49,72	0,10
Wiederhl.	49,66	49,61	49,63	49,60	49,64	49,60	49,61	49,65	49,64	49,56		49,62	0,03

Die Wiederholungsmessungen zeigen eine geringe Messabweichung (0,02 mm), die bei einer Messung der Probenbreite in dem Dreipunkt-Biegversuch entsteht. Die Standardabweichung (0,07 und 0,10 mm), die durch das ungenaue Schneiden der Probekörper in der Probenpräparation entsteht, ist im Verhältnis des Messwertes sehr gering.

8.2.3. Länge eines Rohrabschnittes

Bei der Ermittlung der Länge eines Rohrabschnittes kommt es ebenso zu einer Messabweichung. Ursachen dafür ist ein nur hinreichend genaues Abtrennen der Rohrabschnitte (Bild 8.3).

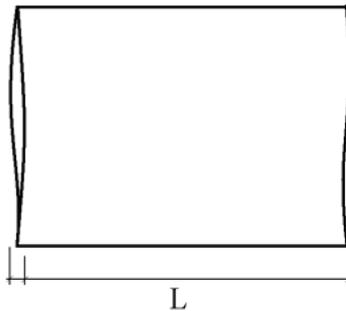


Bild 8.3. Schematische Darstellung der geometrischen Abweichungen eines Rohrabschnittes

Die Vermessung eines Rohrabschnittes erfolgt nach DIN EN 1228. In Tabelle 8.3 wurde die Länge eines Rohrabschnittes an 6 und 12 Referenzlinien gemessen. An einer Referenzlinie wurde eine Wiederholungsmessung durchgeführt. Die Messung erfolgt mit dem Messschieber der Bauform F.

Tabelle 8.3. Ermittelte Messwerte der Länge eines Rohrabschnittes in [mm]

Länge	n												s	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
S6	299,85	299,10	298,55	298,70	298,25	298,90	-	-	-	-	-	-	298,89	0,55
S12	299,90	299,50	299,15	298,30	298,60	297,95	298,70	297,95	298,05	299,10	299,00	299,90	298,84	0,70
Wdhlg.	299,85	299,85	299,90	299,90	299,90	299,85	299,90	299,95	299,85	299,90	-	-	299,89	0,03

Die mittlere Länge wird durch beide Messungen bestätigt, da diese nahezu identisch sind. Es ist daher ausreichend nach DIN EN 1228 an 6 Referenzlinien die Länge eines Rohrabschnittes zu ermitteln. Die Standardabweichung ist bei den 12 Messungen größer als bei 6 Messungen, da durch die kleineren Abstände der Messungen der kleinste Messwert eher getroffen wird. Die Wiederholungsmessung zeigt, dass die Messung mit einem Messschieber der Bauform F mit einer Standardabweichung von 0,03 mm fast genauso präzise Ergebnisse

liefert wie der digitale Messschieber ($s = 0,02 \text{ mm}$) bei der Ermittlung der Probenbreite in dem Dreipunkt-Biegeversuch.

8.2.4. Mittlerer Durchmesser eines Rohrabschnittes

Der Liner wird mit dem mathematischen Modell eines Zylinders beschrieben, dessen Querschnitt ein Kreis ist. Tatsächlich ist der Liner nicht ideal geformt und weist Unregelmäßigkeiten auf. Die Formgebung erfolgt durch das Alt-Rohr, in dem der Liner zur Sanierung eingebracht werden soll. Die Abweichung vom Kreis erfolgt vorrangig durch Unebenheiten an der Kanaloberfläche und der Vorverformung des Kanals selbst (Bild 8.4).

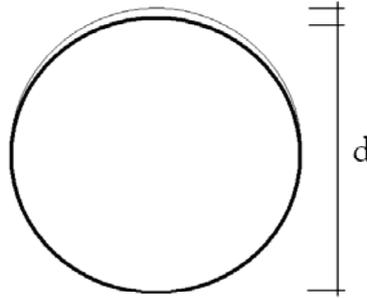


Bild 8.4. Schematische Darstellung einer eventuellen Abweichung im Kreisprofil

Diese Abweichung vom Kreis erzeugt daher bei der Ermittlung des Durchmessers eine höhere Messabweichung. In Tabelle 8.4 wurde ein Schlauchliner mit einer Verformung vermessen. In der ersten Messung wurde an beide Seiten nach DIN EN 1228 (6 Messstellen) und in der zweiten Messung (12 Messstellen) gemessen. Eine Wiederholungsmessung wurde ebenfalls durchgeführt.

Tabelle 8.4. Ermittelte Messwerte der Durchmesser an einem Rohrabschnitt in [mm]

Durchmesser	n												s	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
S6	285,65	284,90	285,65	287,00	286,55	276,80	-	-	-	-	-	-	284,43	3,81
S12	285,75	285,40	285,25	285,30	285,95	287,40	287,15	288,80	286,45	279,90	276,80	285,70	284,98	3,35
Wdhlg.	285,75	285,70	285,55	285,65	285,65	285,65	285,60	285,75	285,70	285,65	-	-	285,67	0,06

Die Messung nach DIN EN 1228 mit 6 Messungen ist ausreichend, um den Durchmesser zu bestimmen, da die beiden mittleren Messwerte des Durchmessers sich nur geringfügig voneinander unterscheiden. Die Wiederholungsmessung ergab eine Standardabweichung von $0,06 \text{ mm}$, die zum Verhältnis der Messgröße nur gering ist. Die hohe Standardabweichung ist auf die Verformung des Schlauchliners zurückzuführen und ist daher auch nicht mit mehreren Messungen zu verkleinern.

8.3. Auswirkung von Messfehlern auf die Versuchsergebnisse

Die Auswirkung eines Messfehlers steht im Verhältnis zu der zu ermittelnden Messgröße und deren späteren Verwendung in der Formel.

Das Verhältnis vom Fehler zur Messgröße ist bei der Verbundwanddicke sehr entscheidend, denn es ist die kleinste Größe, die jedoch am genauesten zu ermitteln ist. Eine Messabweichung von $1/10 \text{ mm}$ bei einer Verbundwanddicke von 5 mm verändert das E-Modul in

dem Dreipunkt-Biegeversuch um 6 %. Bei einer Messabweichung von 1/10 mm und einer Verbundwanddicke von 20 mm beträgt die Änderung des E-Moduls nur noch 1,5 %.

Die ideale Probenbreite soll nach DIN EN ISO 178 / DIN EN 13566-4 bei radialer Prüfung 50 (± 1) mm betragen. Beinhaltet die Messung der Probenbreite einen Fehler von 0,5 mm, wird das E-Modul um 1 % verändert. Die Breite wird mit Hilfe eines Messschiebers nach der ZTV-Materialprüfung an drei Stellen (im mittleren Drittel der Probe) ermittelt. Die Ermittlung der Breite ist daher hinreichend genau und eine geringe Messabweichung hat keinen signifikanten Einfluss auf das E-Modul.

Eine Messfehler von 1 mm ist bei der Ermittlung der Länge eines Rohrabschnittes nach DIN EN 1228 zum Verhältnis zur Länge nur sehr klein (0,3 %). Diese Messabweichung wird in der Fehlerbetrachtung vernachlässigt.

Zur Ermittlung des mittleren Durchmessers wird der Innendurchmesser, die nicht tragende Innenbeschichtung (2x Coating) sowie die Verbundwanddicke miteinander addiert. Messfehler, die bei der Messung bzw. durch die Vorverformung des Schlauchliners auftreten, sind im Verhältnis des Messwertes sehr gering, sodass die E-Modulermittlung nur unwesentlich beeinflusst wird. Ein Fehler aus der Bestimmung des mittleren Durchmessers führt daher nicht zu den Abweichungen der E-Module zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch.

8.4. Verwendete Formeln

Um die Einflüsse der unterschiedlichen Probenparameter auf das E-Modul besser betrachten zu können, wurden die Formeln gekürzt. In der Formel für das Biege-E-Modul aus dem Dreipunkt-Biegeversuch (Gleichung 1) wurden die Spannung (Gleichung 2) und die Dehnung (Gleichung 3) eingesetzt und die Formel gekürzt.

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2) \quad \text{und} \quad \varepsilon_f = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (3) \quad \text{in}$$

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (1) \quad \text{eingesetzt, wobei} \quad h = e_m \quad \text{ist,}$$

$$E_f = \frac{(\Delta F) \cdot L^3}{4(\Delta s) \cdot b \cdot e_m^3} \quad (15)$$

In der Formel für das E-Modul aus dem Scheiteldruckversuch wurden die spezifische Anfangsringsteifigkeit (Gleichung 11) und der Verformungsbeiwert (Gleichung 12)

$$S_0 = \frac{f \cdot F}{L \cdot y} \quad (11) \quad f = (1860 + 2500 \cdot y/d_m) \cdot 10^{-5} \quad (12), \quad \text{mit} \quad y = 0,03 \cdot d_m$$

$$\text{in} \quad E = \frac{12 \cdot S_0 \cdot d_m^3}{e_m^3} \quad (4) \quad \text{eingesetzt. Daraus ergibt sich dann das Umfangs-E-Modul}$$

$$E = \frac{7,74 \cdot F \cdot d_m^2}{L \cdot e_m^3}, \quad \text{bei einer angenommenen Verformung von 3\%}. \quad (16)$$

Die Verbundwanddicke hat einen sehr großen Einfluss auf das E-Modul. In beiden Formeln zur E-Modulberechnung (Gleichung 15 und 16) geht die Verbundwanddicke in der dritten Potenz ein. Aus dem 16-fachen der Verbundwanddicke wird die Auflagerdistanz ermittelt, bei der auch die Messabweichung analog vergrößert wird. Die Auflagerdistanz wird zur Berechnung der Spannung (Gleichung 6) und der Dehnung (Gleichung 7) benötigt. Die Verbundwanddicke wird auch für die Ermittlung des mittleren Durchmessers (d_m) benötigt. Dadurch wird indirekt auch die rechnerische Verformung von 3 % im Scheiteldruckversuch beeinflusst ($y = 0,03 \cdot d_m$).

Es wurde die Vergleichbarkeit der E-Modulermittlung in einem Rechenbeispiel untersucht. In dem Scheiteldruckversuch wurden die geometrischen Parameter und das E-Modul festgelegt. Um mit den gleichen Probenparametern in dem Dreipunkt-Biegeversuch dasselbe E-Modul zu erreichen, wurde aus der Randfaserdehnung (Gleichung 17) nach DIN EN ISO 899-2 [7] die Anfangsdurchbiegung (Gleichung 18) [22] errechnet, durch die ein Probekörper in dem Dreipunkt-Biegeversuch verformt wird, um die gleiche Dehnung wie in dem Scheiteldruckversuch bei einer 3 %igen Verformung zu erzeugen.

$$\varepsilon_r = \frac{6 \cdot s \cdot e_m}{L_v^2} \quad (17), \quad \text{umgestellt nach der Anfangsdurchbiegung (s)}$$

$$s = \frac{\Delta d_v \cdot 2 \cdot L_v^2 \cdot e_m}{\pi \cdot d_m \cdot 0,1548 \cdot 6 \cdot e_m} = \frac{0,0206 \cdot L_v^2}{d_m} \quad (18)$$

Wird die Formel für die E-Modulermittlung für den Dreipunkt-Biegeversuch (Gleichung 16) umgestellt und die Anfangsdurchbiegung sowie das E-Modul aus dem Scheiteldruckversuch eingesetzt, wird die dazugehörige Kraft ermittelt. Die Kraft und die Anfangsdurchbiegung wurden festgesetzt und die Parameter (Verbundwanddicke) schrittweise verändert, um den Fehlereinfluss zu ermitteln. Die Verbundwanddicke wurde dabei um ± 20 % verändert, um den Einfluss auf das E-Modul darzustellen (Bild 8.5).

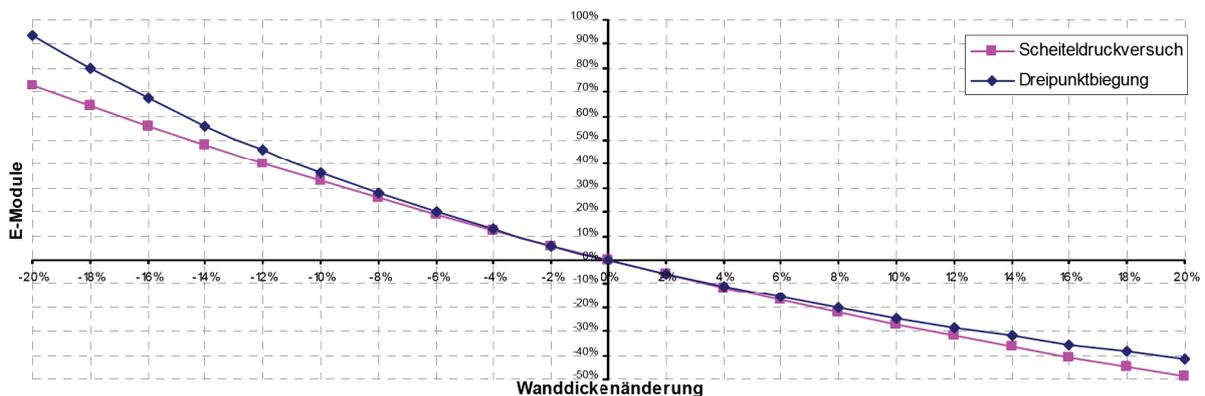


Bild 8.5. Abweichung der veränderten Verbundwanddicke und des errechneten E-Moduls, zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch

Da die Verbundwanddicke in der Formel (siehe Abschnitt 8.2) in der dritten Potenz eingeht, weisen die Kurven ein überproportionales Verhalten auf. Eine Über- und Unterbewertung der Wanddicke von ± 10 % zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen den E-Modulen des Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuchs. Ist die Über- oder Unterbewertung der Wanddicke größer als 10 %, weichen die E-Module zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch deutlich voneinander ab, insbesondere bei der Unterbewertung entsteht eine

große Abweichung. Eine Unterbewertung von -20 % der Wanddicke hat eine doppelte so große Abweichung zwischen den E-Modulen von 20 % zur Folge als eine Überbewertung von +20 % der Wanddicke, mit einer Abweichung von 7 % zwischen den E-Modulen (siehe Diagramm 8.5). Die Verbundwanddicken in dieser Arbeit besitzen eine mittlere Abweichung zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch von +0,5 % mit einer Standardabweichung von 4,9 % (Tabelle 6.1) und liegen damit in dem Bereich der ± 10 %, in denen es zu keinen signifikanten Abweichungen der E-Module kommt. Die Abweichung der E-Module zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch werden nicht durch deren rechnerische Beziehung der unterschiedlichen Prüfmethoden verursacht. Jedoch kann eine unterschiedlich ermittelte und angesetzte Verbundwanddicke bei den beiden E-Modulermittlungs-methoden die Tendenz der Abweichung der E-Module verstärken.

8.5. Einfluss der Probengröße auf die Messergebnisse

Der Scheiteldruckversuch erfolgt an einem Bauteil, einem Rohrabschnitt. Das Bauteil besitzt eine Steifigkeit, die vom E-Modul des Werkstoffes und der geometrischen Anordnung abhängig ist. In der DIN EN 1228 wird deshalb auch von einem scheinbaren E-Modul gesprochen, da es über die Bauteilsteifigkeit rechnerisch ermittelt wird.

Bei dem Dreipunkt-Biegeversuch hingegen wird das E-Modul wie bei einem Träger auf zwei Stützen durch das Verformungsverhalten bei einer Belastung ermittelt.

Da die Schlauchliner ausschließlich in Umfangsrichtung geprüft wurden und deswegen isotrope Eigenschaften unterstellt werden können, müssten sich die E-Module als Materialkennwerte aus den beiden Versuchen (Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch) entsprechen. Der Scheiteldruckversuch ermittelt das gemittelte E-Modul für das gesamte System. Imperfektionen werden durch das System selbst aufgefangen. In dem Dreipunkt-Biegeversuch wirken sich Imperfektionen in den Probekörpern stärker auf das E-Modul aus. Aufgrund der Größe der Probekörper, die in Umfangsrichtung für den Dreipunkt-Biegeversuch dem Schlauchliner entnommen werden, kann das E-Modul an nur durchschnittlich ca. 10 Proben ermittelt werden. Für einen umfassenden Vergleich der E-Module ist die Dichte der Messungen sehr gering, so dass es geringfügig zu verfahrensbedingten Abweichungen kommen kann. Die Abweichung zwischen den Versuchen (Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch) beträgt im Durchschnitt -9,7 % (Kapitel 7.3). Diese Abweichungen sind jedoch nicht auf die Probenanzahl zurückzuführen.

Die „schmalen Ringe“ (50 mm Breite) stellen einen Ausschnitt aus der Scheiteldruckprobe dar und repräsentieren damit nicht den gesamten Rohrausschnitt. Der „schmale Ring“ kann daher eine Streuung, je nach seiner Entnahmestelle, aufweisen. Da die Proben aus dem Dreipunkt-Biegeversuch dieselbe Breite wie die Ringe besitzen und der gleichen Entnahmestelle entstammen, sind auch die E-Module in einer guten Näherung (Tabelle 6.2).

Bei den Prüfungen wurde festgestellt, dass Imperfektionen als Schwachstelle durch eine geringe Probengröße nicht mehr von dem näheren Umfeld aufgefangen werden können. Somit ist grundsätzlich davon auszugehen, dass, je kleiner die Probe zum Gesamtprodukt ausfällt, der Einfluss vorhandener Inhomogenität steigt und zu einer größeren Streuung der Messergebnisse führt.

9. Zusammenfassung

Ein junges, mittlerweile etabliertes Verfahren zur Kanalsanierung ist das Schlauchliningverfahren, bei dem ein mit Harz getränkter Schlauch unter der Erde im Kanal zu einem Kunststoffrohr aushärtet.

Die Kennwerte für die Eigenschaften von Schlauchlinern sind in der jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) festgeschrieben. Ein wichtiger Materialkennwert ist das Elastizitätsmodul, es gibt die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegenüber einer Verformung an. Der Materialkennwert E-Modul kann sowohl im Scheiteldruckversuch nach DIN EN 1228 an Rohrabschnitten (Umfangs-E-Modul), als auch in dem Dreipunkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 / DIN EN 13566-4 (Biege-E-Modul) ermittelt werden. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Messwerte der E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch nicht immer übereinstimmen. Einige Schlauchliner-Hersteller geben für den Biege-E-Modul und Umfangs-E-Modul ihrer Produkte unterschiedliche Werte in ihrer Zulassung an. In dieser Arbeit wurde die Vergleichbarkeit der Messwerte des Elastizitätsmoduls aus dem Dreipunkt-Biegeversuch und dem Scheiteldruckversuch untersucht.

An 36 Schlauchlinerproben unterschiedlicher Dimensionen von verschiedenen Herstellern wurden die E-Module aus dem Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch für die Untersuchung ermittelt. Bei den vergleichenden Prüfungen wurde eine durchschnittliche Abweichung von -9,7 % zwischen den E-Modulen des Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuchs festgestellt.

Zur weiteren Untersuchung dieser Unterschiede wurden Scheiteldruckversuche an Ringen durchgeführt, die abweichend zur DIN EN 1228 5cm breit waren. Die „schmalen“ Ringe entsprechen der Breite von Dreipunktbiege-Proben. Nach der Scheiteldruckprüfung wurden die schmalen Ringe in Dreipunktbiege-Proben zerteilt und gemäß DIN EN ISO 178 geprüft. Die Ergebnisse zwischen dem Scheiteldruckversuch an den schmalen Ringen und dem Dreipunkt-Biegeversuch entsprechen sich in guter Näherung. Der Unterschied zwischen den Prüfungen betrug 1,4%.

Bei der Ermittlung der Ursachen für die Unterschiede zwischen den Ergebnissen Dreipunkt-Biegeversuch, Scheiteldruckversuch am schmalen Ring und dem Scheiteldruckversuch gemäß DIN EN 1228 wurde festgestellt, dass lokale Imperfektionen wie Reinharzschichten, Wanddicken-Unregelmäßigkeiten, Tränkungs- und Verdichtungsdefizite, Poren und Störungen innerhalb des Laminataufbaus im Biegebereich der Probekörper des Dreipunkt-Biegeversuchs zur Unterbewertung des Elastizitätsmoduls an schmalen Proben führen können. An breiten Proben werden lokale Unregelmäßigkeiten über die Bauteilgröße aufgefangen.

Der Einfluss von Messabweichungen auf das E-Modul wurde ebenfalls untersucht. Die Ermittlung der Verbundwanddicke hat dabei den größten Einfluss auf den Wert des E-Moduls, da diese in der dritten Potenz in die Formel eingeht. Die Verbundwanddicke muss von dem Prüfer bewertet werden, was bei Reinharzschichten und ausgeprägten Oberflächentopografien zu Fehlinterpretationen führen kann. Probenbreite, Auflagerabstand und Maschinengenauigkeit führen nur zu geringen Messabweichungen.

Die Abweichungen zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch wurden in Abhängigkeit des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisses untersucht. Trotz der ausgeprägten Streuung der Messwerte, aufgrund von Imperfektionen und ausgeprägten Oberflächentopografien, wurde festgestellt, dass die Messwerte von dem Dreipunkt-Biegeversuch und dem Scheiteldruckversuch bei im Verhältnis großen Durchmessern mit geringen Wanddicken besser übereinstimmen als bei kleinen Durchmessern mit großen Wanddicken. Dieser Effekt wurde bei Glasfaserlinern wie auch bei Synthesefaserlinern beobachtet und konnte für beide Systeme in linearer Abhängigkeit graphisch dargestellt werden.

Nach DIN 18820-2, welche Lamine beschreibt und in diesem Sinne auch für Schlauchliner Anwendung findet, beträgt der Quantilfaktor für Lamine 0,8. Die Auswertung der Messergebnisse des E-Moduls aus dem Dreipunkt-Biegeversuch und dem Scheiteldruckversuch mit dem Quantilfaktor von 0,8 zeigte, dass die Messergebnisse im normativen Toleranzbereich für Lamine von 20 % liegen. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Prüfergebnisse lagen im Mittel 18 % über den jeweiligen Quantilwerten gemäß DIBt-Zulassung und haben damit eine gute Übereinstimmung mit den Vorgaben der Zulassungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch eine statistische Auswertung von Baustellenproben eines Synthesefaserliner-Herstellers durchgeführt. Die Auswertung zeigt, dass die Abweichungen des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch bei -14,7 % liegen. Die in dieser Arbeit ermittelten Messergebnisse weisen hier eine mittlere Abweichung von -12,5 % aus. Somit bestätigen die Ergebnisse dieser Arbeit die Statistik der Baustellenproben.

In dieser Arbeit wurden 3 Haupteinflussgrößen festgestellt, die der Reihe nach im Einfluss abnehmend sind:

- Abhängigkeit der Abweichungen der E-Module zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch vom Durchmesser-Wanddicken-Verhältnis
- Lokale Imperfektionen im Probekörper des Dreipunkt-Biegeversuchs
- Fehlinterpretation der Verbundwanddicke durch ausgeprägte Oberflächentopografien

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Messwerte des Elastizitätsmoduls aus dem Dreipunkt-Biegeversuch und dem Scheiteldruckversuch grundsätzlich gut miteinander vergleichbar sind. Insbesondere bei kleineren Dimensionen führt ein ungünstiges Durchmesser-Wanddicken-Verhältnis jedoch zu einer Unterbewertung des E-Moduls. Schlauchliner weisen aufgrund ihres Herstellungsverfahrens produktspezifisch lokale Imperfektionen auf. Die daraus resultierende Schwankung der Produkteigenschaften liegen gemäß DIN 18820 (Quantilfaktor 0,8) innerhalb der Toleranzgrenzen.

Für Hersteller, die bei ihren Produkten systematische Abweichungen zwischen den Ergebnissen des Dreipunkt-Biegeversuches und des Scheiteldruckversuches feststellen, wird empfohlen, die Abweichungen des E-Moduls zwischen Scheiteldruck- und Dreipunkt-Biegeversuch in Abhängigkeit des Durchmesser-Wanddicken-Verhältnis produktspezifisch zu untersuchen.

10. Danksagung

Ich möchte mich recht herzlich bei allen bedanken, die auf das Zustandekommen dieser Arbeit durch ihre Unterstützung positiven Einfluss genommen haben.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Wagner möchte ich mich für die Überlassung des Themas und die Betreuung bedanken. Ebenso will ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Andreas Haacker für die stetige Unterstützung bei der Erstellung und Betreuung dieser Arbeit bedanken.

Der Firma SIEBERT + KNIPSCHILD GmbH danke ich für die Möglichkeit der praktischen Durchführung der Versuche in ihrem Laboratorium und die Bereitstellung der Materialien. Insbesondere möchte ich den Mitarbeitern des Labors danken, die durch ihre freundliche und kompetente Unterstützung und Hilfsbereitschaft bei der Durchführung meiner Versuche einen wesentlichen Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Für die Hilfe bei Computerproblemen und verschiedenen Programmen bedanke ich mich auch bei Herrn Benjamin Exner.

Mein Dank gilt auch allen Herstellern, die mir Probenmaterial bereitgestellt haben, um genügend Proben für die vorliegende Untersuchung zu erhalten.

Ein großer Dank geht auch an alle Freunde und Bekannte, die mich in dieser Zeit unterstützt haben und hier nicht persönlich erwähnt worden sind.

Zum Schluss möchte mich besonders bei meinen Eltern bedanken, die mir das Studium des Bauingenieurwesens ermöglicht haben und die mich während meines Studiums stets unterstützt haben. Ganz besonders aber auch meiner Verlobten, die durch ihr Zutrauen mir immer wieder neuen Mut und Kraft gegeben und bei der Erstellung dieser Arbeit mich liebevoll unterstützt hat.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 862: Messschieber, Anforderungen, Prüfung, 1988-12
- [2] DIN 18820-2: Lamine aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA) - Teil 2: Physikalische Kennwerte der Regellamine, 1991
- [3] DIN EN 1228: Kunststoff-Rohrsysteme, Rohre aus glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK), Ermittlung der spezifischen Anfangs-Ringsteifigkeit, 1996
- [4] DIN EN 13566-4: Kunststoff-Rohrleitungssysteme für die Renovierung von erdverlegten drucklosen Entwässerungsnetzen (Freispegelleitungen) Teil 4: Vor Ort härtendes Schlauchlining, 2002
- [5] DIN EN 752-5: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden – Teil 5: Sanierung, Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [6] DIN EN ISO 178: Kunststoffe, Bestimmung der Biegeeigenschaften, 2006-04
- [7] DIN EN ISO 899-2: Kunststoffe, Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 2: Zeitstand-Biegeversuch bei Dreipunktbelastung, 2003-10
- [8] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien, 2005-08
- [9] Berger, C.; Falk, C.: Zustand der Kanalisation in Deutschland, Ergebnisse der DWA-Umfrage 2009, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Januar 2011
- [10] Berger, C.; Lohaus, J.: Zustand der Kanalisation in Deutschland – Ergebnisse der ATV-DVWK-Umfrage 2004,
- [11] Berger, C.; Lohaus, J.; Wittner, A.; Schäfer, R.: Zustand der Kanalisation in Deutschland – Ergebnisse der ATV-DVWK-Umfrage 2001, Korrespondenz Abwasser 3/2004, S. 302–311
- [12] Bundesgesetzblatt, Gesetz über das In-Verkehr-Bringen von und den freien Warenverkehr mit Bauprodukten, Jahrgang 1998 , BGBl. I S. 812
- [13] Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Publikation 04.007, Mai 1986
- [14] Keding, M.; Stein, D.; Witte, H.: Ergebnisse einer Umfrage zur Erfassung des Istzustandes der Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland, Korrespondenz Abwasser 2/87, S. 118 – 122
- [15] Keding, M.; Van Riesen, S.; Esch, B.; Sankt Augustin: Der Zustand der öffentlichen Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland, Ergebnisse der ATV-Umfrage 1990, Korrespondenz Abwasser 10/1990, S. 1148-1153

- [16] Merkblatt ATV-M 127-2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen mit Lining- und Montageverfahren, GFA, Hennef, Januar 2000
- [17] Merkblatt DWA-M 143-20: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden Teil 20: Prüfung und Beurteilung von Sanierungsverfahren; Anforderungen, Prüfkriterien und Prüfeempfehlungen – Schlauchliningverfahren und Kurzliner, November 2005
- [18] Merkblatt ATV-M 149: Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, GFA, Hennef, April 1999
- [19] Statistisches Bundesamt: Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung, Fachserie 19 Reihe 2.1, Wiesbaden 2007
- [20] Süddeutsche Kommunen und der Rohrleitungssanierungsverband e.V., Arbeitsgruppe für Schlauchlinersanierungen : Anforderungsprofil für Schlauchliner - Kanalsanierung, 3. Auflage, 2008
- [21] Wagner, V.: 40 Jahre praktische Erfahrung mit dem Schlauchlining, bi Umweltbau Kongressausgabe 2011
- [22] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (ZTV) für die Materialprüfung an Probestücken vor Ort härtender Schlauchliner, Arbeitsgruppe süddeutscher Kommunen, Rohrleitungssanierungsverband RSV e.V. und Hamburger Stadtentwässerung, 2.Auflage, Fassung 29.06.2009
- [23] Zwick (Prüfmaschine für Materialprüfung): Produktinformation – Tischprüfmaschinen Z005 bis Z020 der Allround-Line

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Werken wörtlich oder sinngemäß übernommenen Gedanken sind unter Angabe der Quellen gekennzeichnet.

Ich versichere, dass ich bisher keine Prüfungsarbeit mit gleichem oder ähnlichem Thema bei einer Prüfungsbehörde oder anderen Hochschule vorgelegt habe.

Steffen Dettmann

Hamburg, im April 2011